



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

## «Ένα Νέο Σχήμα Κατανομής Πόρων για Συστήματα OFDMA σε Δίκτυα WiMAX»



Διπλωματική Εργασία

Αθανάσιος Σ. Παπατέρπος

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Επίκουρος Καθηγητής Παντελής Αγγελίδης

Δρ. Παναγιώτης Σαρηγιαννίδης

Κοζάνη, Ιούλιος 2011

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ολοκληρωμένη παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.16 (WiMAX) καθώς και η παρουσίαση των γνωστότερων σχημάτων (αλγορίθμων) κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA. Επιπλέον, στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη, ανάλυση και παρουσίαση ενός νέου βελτιωμένου σχήματος κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA για δίκτυα WiMAX.

Στο **Κεφάλαιο 1** παρέχεται μία σύντομη επισκόπηση της ασύρματης ευρυζωνικότητας. Στόχος είναι να παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο και το πρακτικό πλαίσιο που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της τεχνολογίας WiMAX.

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται τα κύρια γνωρίσματα της τεχνολογίας WiMAX και γίνεται μία περιγραφή των χαρακτηριστικών του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου MAC του προτύπου αυτού.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται και αναλύονται τα σχήματα κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA καθώς και προτείνεται το νέο βελτιωμένο σχήμα κατανομής πόρων.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των αλγορίθμων και συγκρίνεται η απόδοσή τους.

### Λέξεις Κλειδιά

Ασύρματη ευρυζωνικότητα, WiMAX, OFDMA, σχήματα κατανομής πόρων, προσομοιώσεις αλγορίθμων

## Abstract

The purpose of this diplomatic thesis is the complete presentation of the IEEE 802.16 standard (WiMAX) and the presentation of the most recent resource allocation schemes in OFDMA based WiMAX Systems. Moreover, the scope of this thesis is to study, analyze and present a novel resource allocation scheme in OFDMA based WiMAX Systems.

In **Chapter 1**, we provide a brief overview of broadband wireless. The main target is to present the background and practical context necessary for understanding WiMAX.

In **Chapter 2**, we present the main features of WiMAX and describe the physical- and MAC-layer characteristics of WiMAX.

In **Chapter 3**, we present and analyze the resource allocation schemes and the novel resource allocation scheme.

Finally, in **Chapter 4**, we present the simulation results of the resource allocation schemes and we compare their performance.

## Key Words

Broadband wireless, WiMAX, OFDMA, resource allocation schemes, simulation results

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ακόλουθους:

Τους κ. Παντελή Αγγελίδη και κ. Παναγιώτη Σαρηγιαννίδη για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τη συμπαράσταση και εμπιστοσύνη που έδειξαν τόσο καιρό στο πρόσωπό μου και στην δουλειά μου, τόσο στα χρόνια της φοίτησης μου στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, όσο και στην πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τους συμφοιτητές και φίλους μου.

Επιπλέον, τους γονείς μου για την διαρκή συμπαράσταση και αγάπη τους.

## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΣΥΡΜΑΤΗ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΤΗΤΑ.....</b>	<b>8</b>
<b>1.1. Εξέλιξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας .....</b>	<b>9</b>
1.1.1. Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου περιορισμένης ζώνης .....	10
1.1.2. Ευρυζωνικά συστήματα πρώτης γενιάς.....	11
1.1.3. Ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς.....	12
1.1.4. Εμφάνιση τεχνολογίας βασιζόμενη σε πρότυπα .....	13
<b>1.2. Σταθερή ασύρματη ευρυζωνικότητα: Εφαρμογές και στόχοι της αγοράς.....</b>	<b>14</b>
<b>1.3. Κινητή ασύρματη ευρυζωνικότητα: Εφαρμογές και στόχοι της αγοράς .....</b>	<b>17</b>
<b>1.4. Επιλογές φάσματος για την ασύρματη ευρυζωνικότητα .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5. Επαγγελματικές προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα και το WiMAX.....</b>	<b>23</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ WiMAX.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο των IEEE 802.16 και WiMAX .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2. Κύρια χαρακτηριστικά του WiMAX.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3. Φυσικό επίπεδο του WiMAX .....</b>	<b>33</b>
2.3.1. Βασικά στοιχεία του OFDM .....	33
2.3.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του OFDM.....	35
2.3.3. Παράμετροι OFDM στο WiMAX.....	36
2.3.4. Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) .....	37
2.3.4.1. Πλεονεκτήματα της τεχνικής OFDMA.....	38
2.3.5. Υπο-Διαυλοποίηση (Sub-channelization).....	39
2.3.6. Διαχείριση πόρων σε συστήματα OFDMA.....	41
2.3.7. Δομή Πλαισίων Φυσικού Στρώματος.....	43
2.3.8. Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο WiMAX .....	46
<b>2.4. Επισκόπηση του επιπέδου Media Access Control (MAC) .....</b>	<b>48</b>
2.4.1. Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service – QoS) .....	49
2.4.2. Χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας .....	52
2.4.3. Υποστήριξη κινητικότητας .....	53
2.4.4. Λειτουργίες ασφάλειας.....	55
2.4.5. Υπηρεσίες πολυεκπομπής και ευρείας εκπομπής (Multicast – Broadcast).....	56
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ OFDMA .....</b>	<b>57</b>
<b>3.1. Αλγόριθμος OCSA (One Column Striping with non-increasing Area first mapping).....</b>	<b>58</b>
3.1.1. Παράδειγμα αλγορίθμου OCSA .....	60
3.1.2. Συμπεράσματα παραδείγματος αλγορίθμου OCSA .....	68
<b>3.2. Αλγόριθμος HBM (Horizon Burst Mapping).....</b>	<b>68</b>

3.2.1. Παράδειγμα αλγορίθμου HBM .....	71
3.2.2. Συμπεράσματα παραδείγματος αλγορίθμου HBM .....	79
<b>3.3. Βελτιωμένος αλγόριθμος IHBM (Improved Horizon Burst Mapping) με συνένωση οριζόντων..</b>	<b>80</b>
3.3.1. Παράδειγμα βελτιωμένου αλγορίθμου IHBM .....	82
3.3.2. Συμπεράσματα παραδείγματος βελτιωμένου αλγορίθμου IHBM .....	83
<b>3.4. Ένα νέο σχήμα κατανομής πόρων για συστήματα OFDMA.....</b>	<b>84</b>
<b>3.5. Προτεινόμενος αλγόριθμος (Proposed Algorithm).....</b>	<b>84</b>
3.5.1. Παράδειγμα προτεινόμενου αλγορίθμου .....	87
3.5.2. Συμπεράσματα παραδείγματος προτεινόμενου αλγορίθμου .....	90
<b>3.6. Αλγόριθμος SHBM (Same Height Burst Mapping) .....</b>	<b>90</b>
3.6.1. Παράδειγμα αλγορίθμου SHBM .....	92
3.6.2. Συμπεράσματα παραδείγματος αλγορίθμου SHBM .....	93
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΠΟΡΩΝ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ OFDMA ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ WIMAX .....</b>	<b>94</b>
<b>4.1. Σενάρια κίνησης (traffic profiling) .....</b>	<b>95</b>
4.1.1. Πρώτο Σενάριο .....	95
4.1.2. Δεύτερο Σενάριο .....	98
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>102</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>104</b>
<b>ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ .....</b>	<b>106</b>
<b>ΛΕΞΙΚΟ .....</b>	<b>109</b>

## Ευρετήριο Σχημάτων

<b>Σχήμα 1:</b> WiMAX εφαρμογές σημείου προς πολλαπλά σημεία [16] .....	15
<b>Σχήμα 2:</b> Κατανομή φερόντων σε υπο-κανάλια. (α) Συνεχής (β) Κατανεμημένη [17] .....	41
<b>Σχήμα 3:</b> Παραδείγματα σχισμών WiMAX: (α) υπο-κανάλια με συνεχή φέροντα, (β) υπο-κανάλια με κατανεμημένα φέροντα [17] .....	42
<b>Σχήμα 4:</b> Παράδειγμα δομής πλαισίων για κινητό WiMAX-TDD [16] .....	45
<b>Σχήμα 5:</b> Δομικό διάγραμμα πομπού/δέκτη OFDMA [17] .....	46
<b>Σχήμα 6:</b> Διάγραμμα ροής αλγορίθμου OCSA [24].....	59
<b>Σχήμα 7:</b> Τοποθέτηση αίτησης $A_2$ (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA .....	62
<b>Σχήμα 8:</b> Τοποθέτηση αίτησης $A_3$ (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA .....	63
<b>Σχήμα 9:</b> Τοποθέτηση αίτησης $A_4$ (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA .....	64
<b>Σχήμα 10:</b> Τοποθέτηση αίτησης $A_5$ (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA .....	65
<b>Σχήμα 11:</b> Τοποθέτηση αίτησης $A_7$ (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA .....	66
<b>Σχήμα 12:</b> Τοποθέτηση αίτησης $A_1$ (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA .....	67
<b>Σχήμα 13:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_5$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	72
<b>Σχήμα 14:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_1$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	73
<b>Σχήμα 15:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_6$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	74
<b>Σχήμα 16:</b> Οι οριζόντες που διαμορφώθηκαν με βάση τον αλγόριθμο HBM (1η φάση) .....	75
<b>Σχήμα 17:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_3$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	76
<b>Σχήμα 18:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_8$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	77
<b>Σχήμα 19:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_4$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	78
<b>Σχήμα 20:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_2$ με βάση τον αλγόριθμο HBM.....	79
<b>Σχήμα 21:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_9$ με βάση τον αλγόριθμο IHBM.....	83
<b>Σχήμα 22:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_9$ με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο .....	88
<b>Σχήμα 23:</b> Τοποθέτηση αίτησης $MS_7$ με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο .....	89
<b>Σχήμα 24:</b> Τοποθέτηση αιτήσεων με βάση τον αλγόριθμο SHBM.....	93
<b>Σχήμα 25:</b> 1ο Σενάριο: Μέση τιμή των ανεκμετάλλεωτων σχισμών (idle slots) καθώς αυξάνεται ο αριθμός των MSs. ....	96
<b>Σχήμα 26:</b> 1ο Σενάριο: Μέση τιμή των κινητών σταθμών (MSs) που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς ο αριθμός τους αυξάνεται .....	97
<b>Σχήμα 27:</b> 1ο Σενάριο: Μέση τιμή των σχισμών που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς ο αριθμός των MSs αυξάνεται.....	98
<b>Σχήμα 28:</b> 2ο Σενάριο: Μέση τιμή των ανεκμετάλλεωτων σχισμών (idle slots) καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα $\lambda$ .....	99
<b>Σχήμα 29:</b> 2ο Σενάριο: Μέση τιμή των κινητών σταθμών (MSs) που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα $\lambda$ .....	100
<b>Σχήμα 30:</b> 2ο Σενάριο: Μέση τιμή των σχισμών που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα $\lambda$ .....	101

## Ευρετήριο Πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> Πιθανές επιλογές φάσματος για την ασύρματη ευρυζωνικότητα.....	20
<b>Πίνακας 2:</b> Βασικά χαρακτηριστικά για τα πρότυπα IEEE 802.16 .....	27
<b>Πίνακας 3:</b> Χαρακτηριστικά αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού σε συστήματα OFDMA..	43
<b>Πίνακας 4:</b> Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση που υποστηρίζεται από το WiMAX .....	47
<b>Πίνακας 5:</b> Ροές υπηρεσίας που υποστηρίζονται από το WiMAX .....	51
<b>Πίνακας 6:</b> Πίνακας αιτήσεων κατανομής πόρων .....	61
<b>Πίνακας 7:</b> Δέκα τυχαίες αιτήσεις (requests) .....	71
<b>Πίνακας 8:</b> Δέκα τυχαίες αιτήσεις (requests) .....	87
<b>Πίνακας 9:</b> Παράμετροι περιβάλλοντος προσομοίωσης.....	95
<b>Πίνακας 10:</b> Κίνηση κατανομής Poisson .....	95



## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στην Ασύρματη Ευρυζωνικότητα

Η ασύρματη ευρυζωνικότητα αποτελεί έναν από τους πιο αξιόλογους τομείς ανάπτυξης στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια. Τα ασύρματα συστήματα και η ευρυζωνικότητα απολαμβάνουν και τα δύο ραγδαία διάδοση στην αγορά. Για παράδειγμα, οι ασύρματες κινητές υπηρεσίες αυξήθηκαν από 11 εκατομμύρια συνδρομητές σε όλο τον κόσμο το 1990 σε περισσότερους από 2 δισεκατομμύρια το 2005 [1]. Παράλληλα, το Διαδίκτυο (Internet) εξελίχθηκε από ένα ακαδημαϊκό όργανο σε καθημερινό εργαλείο ενός δισεκατομμυρίου χρηστών. Η αξιοσημείωτη αυτή άνοδος του Διαδικτύου οδηγεί στην ανάγκη για πιο γρήγορες υπηρεσίες πρόσβασης στο Internet και κατά συνέπεια σε μία παράλληλη αύξηση της υιοθέτησης της ευρυζωνικότητας. Σε λιγότερο από μία δεκαετία, οι ευρυζωνικοί συνδρομητές παγκοσμίως αυξήθηκαν στην πραγματικότητα από μηδέν σε περισσότερους από 200 εκατομμύρια [2]. Ο συνδυασμός της χρησιμότητας της ασύρματης δικτύωσης με τις αυξημένες επιδόσεις της ευρυζωνικότητας αποτελεί το νέο στόχο της σύγχρονης βιομηχανίας. Μπορεί ένας τέτοιος συνδυασμός να είναι τεχνικά και εμπορικά βιώσιμος και να ενδιαφέρει τους τελικούς χρήστες; Πολλοί παρατηρητές της βιομηχανίας πιστεύουν πως ναι.

Προτού εμβαθύνουμε περισσότερο στην ασύρματη ευρυζωνικότητα, θα πρέπει να μελετήσουμε την κατάσταση της ευρυζωνικής πρόσβασης στις μέρες μας. Η τεχνολογία DSL (*Digital Subscriber Line*), η οποία προσφέρει τις ευρυζωνικές συνδέσεις μέσω τηλεφωνικών καλωδίων συνεστραμμένου ζεύγους και η τεχνολογία καλωδιακού μόντεμ (*Cable*), η οποία υλοποιείται μέσω των ομοαξονικών καλωδίων τηλεόρασης, αποτελούν τις κυρίαρχες τεχνολογίες πρόσβασης ευρείας ζώνης σήμερα. Και οι δύο τεχνολογίες συνήθως παρέχουν έως και μερικά megabits ανά δευτερόλεπτο δεδομένων σε κάθε χρήστη και η συνεχής εξέλιξή τους δίνει τη δυνατότητα για μεταφορά αρκετών δεκάδων megabits ανά δευτερόλεπτο. Από όταν ξεκίνησαν να υλοποιούνται οι τεχνολογίες αυτές στα τέλη της δεκαετίας του 1990, γνωρίζουν σημαντική ανάπτυξη. Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν περισσότερους από 50 εκατομμύρια «ευρυζωνικούς» συνδρομητές, από τους οποίους οι μισοί και παραπάνω είναι χρήστες του Internet. Παγκοσμίως, ο αριθμός αυτός υπερβαίνει στις μέρες μας τα 400 εκατομμύρια [3]. Η διαθεσιμότητα μίας ασύρματης ευρυζωνικής λύσης θα μπορούσε να επιταχύνει την ανάπτυξη αυτή.

Ποιες είναι, όμως, οι εφαρμογές που προωθούν την ανάπτυξη αυτή; Ο τρόπος με τον οποίο επικοινωνούν, εργάζονται και διασκεδάζουν οι χρήστες της ευρυζωνικότητας παγκοσμίως, αλλάζει μέρα με τη μέρα. Η ευρυζωνική πρόσβαση δεν προσφέρει μόνο ταχύτερη πλοήγηση στο Διαδίκτυο και γρήγορες λήψεις αρχείων αλλά δίνει τη δυνατότητα για υλοποίηση αρκετών εφαρμογών πολυμέσων, όπως αναπαραγωγή ήχου και βίντεο σε πραγματικό χρόνο (*audio and video streaming*), τηλεδιασκέψεις με πολυμέσα και διαδραστικά παιχνίδια. Επιπλέον, οι συνδέσεις ευρείας ζώνης χρησιμοποιούνται για τηλεφωνία μετάδοσης φωνής χρησιμοποιώντας την τεχνολογία φωνής μέσω του πρωτοκόλλου Internet (*VoIP*). Πιο προηγμένα συστήματα ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως οι οπτικές ίνες μέχρι την οικεία (*FTTH*) και ο ψηφιακός βρόγχος συνδρομητών πολύ υψηλής ταχύτητας για μετάδοση δεδομένων (*VDSL*), προσφέρουν εφαρμογές βίντεο υψηλής ποιότητας, όπως τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (*HDTV*) και βίντεο κατ' απαίτηση (*Video on*

Demand). Καθώς η αγορά της ευρυζωνικότητας θα συνεχίσει να αυξάνεται, νέες εφαρμογές θα κάνουν την εμφάνισή τους στο μέλλον.

Προκειμένου λοιπόν να ικανοποιηθούν οι ολοένα και αυξανόμενες ανάγκες των ευρυζωνικών χρηστών, παρουσιάζεται η τεχνολογία της ασύρματης ευρυζωνικότητας. Με τον όρο ασύρματη ευρυζωνικότητα εννοούμε τη μεταφορά της ευρυζωνικής εμπειρίας σε ασύρματο πλαίσιο, το οποίο προσφέρει στους χρήστες αρκετές ευκολίες και σημαντικά πλεονεκτήματα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι υπηρεσιών ασύρματης ευρυζωνικότητας. Ο πρώτος τύπος παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών παρόμοιες με αυτές της παραδοσιακής ευρυζωνικής σταθερής γραμμής, χρησιμοποιώντας όμως ασύρματα μέσα για την μετάδοση. Αυτός ο τύπος, ο οποίος ονομάζεται *σταθερή ασύρματη ευρυζωνικότητα*, μπορεί να θεωρηθεί ως μία ανταγωνιστική εναλλακτική πρόταση για το DSL και τη τεχνολογία καλωδιακού μόντεμ. Ο δεύτερος τύπος είναι η ασύρματη κινητή ευρυζωνικότητα και προσφέρει τις επιπλέον λειτουργίες της φορητότητας, της νομαδικότητας και της κινητικότητας. Με τον όρο νομαδικότητα εννοούμε την ικανότητα να συνδέεται κάποιος με ένα δίκτυο από διαφορετικές θέσεις μέσω διαφορετικών σταθμών βάσης. Ενώ, με τον όρο κινητικότητα εννοούμε τη διατήρησης μίας σύνδεσης με ένα δίκτυο παρά την πολύ γρήγορη εναλλαγή θέσεων (για παράδειγμα όταν κάποιος βρίσκεται μέσα σε ένα αυτοκίνητο). Η κινητή ευρυζωνικότητα επιχειρεί να προσφέρει νέες εμπειρίες στους τελικούς χρήστες όσον αφορά τις ευρυζωνικές εφαρμογές που θα υποστηρίζει, αποτελώντας με αυτό το τρόπο μία πολύ διαφορετική ποιοτικά πρόταση. Η τεχνολογία WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) έχει σχεδιαστεί ώστε να εξυπηρετεί τόσο τις σταθερές όσο και τις κινητές εφαρμογές.

Στο πρώτο αυτό κεφάλαιο παρέχουμε μία σύντομη επισκόπηση της ασύρματης ευρυζωνικότητας. Στόχος είναι να παρουσιαστεί το θεωρητικό υπόβαθρο και το πρακτικό πλαίσιο που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της τεχνολογίας WiMAX. Πραγματοποιούμε, λοιπόν, μία ανασκόπηση στην ιστορία της ασύρματης ευρυζωνικότητας, απαριθμούμε τις εφαρμογές της και εξετάζουμε τις επαγγελματικές ευκαιρίες και προκλήσεις τις αγορές.

## **1.1. Εξέλιξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας**

Η ιστορία της ασύρματης ευρυζωνικότητας, σε σχέση με το WiMAX, ξεκινά από την επιθυμία για εύρεση μίας ανταγωνιστικής εναλλακτικής λύσης απέναντι στις τεχνολογίες ενσύρματης πρόσβασης. Με την ώθηση που έδινε η απελευθέρωση της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών και την ραγδαία ανάπτυξη του Internet, αρκετοί ανταγωνιστικοί φορείς έθεσαν ως κίνητρο να βρουν μία ασύρματη λύση που θα παράκαμπε τους δεσμευτικούς παρόχους υπηρεσιών. Την προηγούμενη δεκαετία, αναπτύχθηκαν αρκετά συστήματα ασύρματης πρόσβασης, κυρίως από νέες εταιρίες που θεωρούσαν ενδιαφέρουσα τη προοπτική των ασύρματων συστημάτων. Τα συστήματα αυτά παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στα πρωτόκολλα, τις επιδόσεις, το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιούσαν,

στις υποστηριζόμενες εφαρμογές και σε άλλες παραμέτρους. Κάποια από αυτά τα συστήματα υλοποιήθηκαν αλλά σε σύντομο χρονικό διάστημα τέθηκαν εκτός λειτουργίας. Οι επιτυχημένες υλοποιήσεις έως τώρα περιορίζονται σε λίγες εφαρμογές και αγορές. Είναι προφανές ότι η ασύρματη ευρυζωνικότητα παρουσιάζει έως τώρα μία πολύμορφη εικόνα, εν μέρει εξαιτίας του κατακερματισμού της βιομηχανίας, ο οποίος οφείλεται στην έλλειψη ενός κοινού προτύπου. Η εμφάνιση του WiMAX ως βιομηχανικό πρότυπο αναμένεται να αντιστρέψει την κατάσταση αυτή.

Η τεχνολογία WiMAX εξελίχθηκε σε τέσσερα στάδια, αν και δεν διακρίνονται πλήρως, ούτε ακολουθούν μία καθαρή διαδοχική πορεία: α) ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου περιορισμένης ζώνης, β) συστήματα ευρυζωνικότητας πρώτης γενιάς με οπτική επαφή (Line of Sight - LOS), γ) συστήματα ευρυζωνικότητας δεύτερης γενιάς χωρίς οπτική επαφή (Non Line of Sight - NLOS) και δ) ασύρματα συστήματα ευρυζωνικότητας βασιζόμενα σε πρότυπα.

#### 1.1.1. Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου περιορισμένης ζώνης

Η πρώτη εφαρμογή για την οποία αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε μία ασύρματη εναλλακτική πρόταση ήταν η τηλεφωνία μετάδοσης φωνής. Τα συστήματα αυτά ονομάστηκαν *ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου* (Wireless Local Loop - WLL), και παρουσίασαν επιτυχία σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Βραζιλία, η Κίνα, η Ινδία και η Ρωσία, στις οποίες η υψηλή ζήτηση για βασικές τηλεφωνικές υπηρεσίες δεν μπορούσε να εξυπηρετηθεί χρησιμοποιώντας τις υπάρχουσες υποδομές. Στην πραγματικότητα, τα συστήματα WLL που βασίζονται στα πρότυπα DECT (ψηφιακά βελτιωμένη ασύρματη τεχνολογία) και CDMA (τεχνική διαχωρισμού με κωδικοποίηση πολλαπλής πρόσβασης) συνεχίζουν να αναπτύσσονται στις αγορές αυτές.

Στις περιοχές στις οποίες υπήρχαν ήδη κατάλληλες υποδομές τοπικού βρόγχου για την τηλεφωνία, τα συστήματα WLL έπρεπε να προσφέρουν επιπλέον λειτουργίες για να είναι ανταγωνιστικά. Μετά και την εμπορευματοποίηση του Internet το 1993, η ζήτηση για υπηρεσίες πρόσβασης στο Διαδίκτυο άρχισε να αυξάνεται με έντονο ρυθμό και πολλοί θεώρησαν ότι η παροχή υψηλών ταχυτήτων πρόσβασης είναι το μέσο που θα διαφοροποιήσει τα ασύρματα συστήματα. Για παράδειγμα, τον Φεβρουάριο του 1997, η AT&T (American Telephone & Telegraph) ανακοίνωσε ότι ανέπτυξε ένα σύστημα ασύρματης πρόσβασης για τη μπάντα (band) των 1900MHz PCS (προσωπικές επικοινωνίες υπηρεσιών) που θα μπορούσε να προσφέρει στους συνδρομητές δύο γραμμές για φωνή και μία γραμμή για μετάδοση δεδομένων, με ταχύτητες της τάξης των 128kbps. Το σύστημα αυτό, με κωδικό όνομα "Project Angel", είχε τη διάκριση να είναι ένα από τα πρώτα εμπορικά ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούσαν τεχνολογία προσαρμοσμένων κεραιών. Μετά από δοκιμαστικές εφαρμογές για μερικά χρόνια και μία σύντομη εμφάνιση στην αγορά, η AT&T αποφάσισε να καταργήσει την ανάπτυξη του συστήματος αυτού, επικαλούμενη ως εξηγήσεις για την κίνηση αυτή το υψηλό κόστος και την χαμηλή αποδοχή που είχε στην αγορά.

Την ίδια χρονική περίοδο, αρκετές νέες επιχειρήσεις εστίασαν αποκλειστικά στην

παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο χρησιμοποιώντας ασύρματα συστήματα. Αυτές οι εταιρίες παροχής ασύρματης πρόσβασης στο Internet (Wireless Internet Service Provider - WISP) συνήθως ανέπτυξαν συστήματα στις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων των 900MHz και 2.4GHz. Η πλειοψηφία των συστημάτων αυτών απαιτούσε την εγκατάσταση κεραιών στην έδρα των πελατών τους, είτε στις ταράτσες είτε σε κάποιο άλλο σημείο εξωτερικά των κτιρίων. Σαν αποτέλεσμα, οι εγκαταστάσεις περιορίζονταν σε μικρές πόλεις και επιλεγμένες γειτονιές. Τα συστήματα αυτά προσέφεραν στην αρχή ταχύτητες έως λίγες εκατοντάδες kilobits ανά δευτερόλεπτο, αλλά με την πάροδο του χρόνου και την συνεχή εξέλιξη των συστημάτων αυτών, οι ταχύτητες αυξήθηκαν σημαντικά.

### 1.1.2. Ευρυζωνικά συστήματα πρώτης γενιάς

Καθώς ξεκίνησε να υλοποιείται η τεχνολογία του DSL και των καλωδιακών μόντεμ, τα ασύρματα συστήματα έπρεπε να εξελιχθούν για να υποστηρίξουν πολύ μεγαλύτερες ταχύτητες προκειμένου να είναι ανταγωνιστικά. Ξεκίνησε, λοιπόν, η ανάπτυξη συστημάτων για υψηλότερες συχνότητες, όπως είναι αυτές των 2.5GHz και 3.5GHz. Εμφανίστηκαν επίσης συστήματα πολύ υψηλών ταχυτήτων, τα επονομαζόμενα *τοπικά συστήματα κατανομής πολλαπλών σημείων* (Local Multipoint Distribution Systems - LMDS), τα οποία υποστήριζαν έως και αρκετές εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο και αναπτύχθηκαν στις ζώνες συχνοτήτων επιπέδου χιλιοστού, όπως είναι οι 24GHz και 39GHz. Οι υπηρεσίες που βασιζόνταν στην τεχνολογία LMDS αφορούσαν τους επαγγελματίες χρήστες και στο τέλος της δεκαετίας του 1990 σημείωσαν ραγδαία αλλά σύντομη επιτυχία. Προβλήματα όπως η δύσκολη πρόσβαση στις ταράτσες των κτιρίων για την εγκατάσταση των κεραιών, καθώς και οι μικρές δυνατότητες εμβέλειας της τεχνολογίας αυτής διέκοψαν την ανάπτυξή της.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, μία από τις πιο σημαντικές υλοποιήσεις της ασύρματης ευρυζωνικότητας παρουσιάστηκε στην συχνότητα υπηρεσιών πολλαπλών καναλιών κατανομής πολλαπλών σημείων (Multichannel Multipoint Distribution Service - MMDS) στη συχνότητα των 2.5GHz. Η συχνότητα της τεχνολογίας MMDS χρησιμοποιείται συνήθως για να παρέχει ασύρματες, καλωδιακές υπηρεσίες μετάδοσης βίντεο, ειδικά σε αγροτικές περιοχές όπου δεν υφίστανται υπηρεσίες καλωδιακής τηλεόρασης. Η έλευση της δορυφορικής τηλεόρασης δημιούργησε προβλήματα στις εταιρίες που αξιοποιούσαν την ασύρματη καλωδιακή τεχνολογία και έτσι οι παροχείς υπηρεσιών αναζητούσαν εναλλακτικούς τρόπους για να χρησιμοποιήσουν το φάσμα των 2.5GHz. Μερικοί πάροχοι ξεκίνησαν να προσφέρουν υπηρεσίες μονόδρομης ασύρματης πρόσβασης στο Διαδίκτυο, χρησιμοποιώντας την τηλεφωνική γραμμή ως επιστροφή. Τον Σεπτέμβριο του 1998, η Αμερικάνικη Επιτροπή Επικοινωνιών (Federal Communications Commission - FCC) έγινε πιο ελαστική στους κανονισμούς για την ζώνη συχνοτήτων MMDS στις Ηνωμένες Πολιτείες ώστε να επιτρέψει την εφαρμογή υπηρεσιών αμφίδρομης επικοινωνίας, δημιουργώντας μ' αυτό τον τρόπο και μεγαλύτερο ενδιαφέρον για αυτή τη ζώνη. Οι εταιρίες MCI WorldCom και Sprint κατέβαλαν το ποσό τους ενός δισεκατομμυρίου δολάρια για να αγοράσουν άδειες χρήσης της ζώνης MMDS και έτσι αρκετές εταιρίες ξεκίνησαν να αναπτύσσουν

σταθερές ασύρματες λύσεις υψηλών ταχυτήτων στη ζώνη των 2.5GHz.

Η πρώτη γενιά αυτών των συστημάτων ασύρματης ευρυζωνικότητας αναπτύχθηκε πάνω στους ίδιους πύργους που εξυπηρετούσαν τους συνδρομητές της ασύρματης καλωδιακής τεχνολογίας. Οι πύργοι αυτοί είχαν συνήθως ύψος αρκετών εκατοντάδων μέτρων και κάλυπταν αποστάσεις με οπτική επαφή (LOS) έως και 50 χιλιόμετρα, χρησιμοποιώντας πομπούς υψηλής τάσης. Τα συστήματα MMDS πρώτης γενιάς απαιτούσαν από τους συνδρομητές να τοποθετήσουν στον χώρο τους αρκετά ψηλές εξωτερικές κεραίες, οι οποίες θα είχαν κατεύθυνση προς τον πύργο που θα παρείχε καθαρή διαδρομή μετάδοσης με οπτική επαφή (LOS). Οι εταιρίες Sprint και MCI ήταν οι πρώτες που παρείχαν υπηρεσίες αμφίδρομης ασύρματης ευρυζωνικότητας χρησιμοποιώντας πρώτης γενιάς συστήματα MMDS σε μερικές αγορές στις αρχές του 2000. Εμπόδια για την εξέλιξη των συστημάτων αυτών αποδείχτηκαν οι απαιτήσεις για εξωτερική κεραία και η τεχνολογία οπτικής επαφής (LOS). Επιπλέον, επειδή μια σχετικά μεγάλη γεωγραφική περιοχή εξυπηρετούνταν από έναν μόνο πύργο, η χωρητικότητα αυτών των συστημάτων ήταν σχετικά περιορισμένη. Παρόμοια συστήματα οπτικής επαφής πρώτης γενιάς αναπτύχθηκαν διεθνώς και στη ζώνη των 3.5GHz.

### 1.1.3. Ευρυζωνικά συστήματα δεύτερης γενιάς

Τα δεύτερης γενιάς συστήματα ασύρματης ευρυζωνικότητας ξεπέρασαν το πρόβλημα της οπτικής επαφής (LOS) και κατάφεραν να παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό έγινε πραγματικότητα μέσω της χρήσης κυψελωτής αρχιτεκτονικής και υλοποίησης προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος για τη βελτίωση της σύνδεσης και των επιδόσεων του συστήματος κάτω από συνθήκες πολλαπλών διαδρόμων (multipath conditions). Νέες επιχειρήσεις ανέπτυξαν προηγμένες αποκλειστικές λύσεις που παρείχαν σημαντικά καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα συστήματα πρώτης γενιάς. Η πλειοψηφία των νέων αυτών συστημάτων μπορούσε να αποδώσει πολύ καλά σε συνθήκες χωρίς οπτική επαφή και έτσι οι κεραίες των πελατών τοποθετούνταν συνήθως στο γείσο της στέγης ή ακόμα χαμηλότερα. Πολλοί έλυσαν το πρόβλημα της μη οπτικής επαφής (NLOS) χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως *ορθογώνια πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing - OFDM), *πολλαπλή πρόσβαση διαχωρισμού κώδικα* (Code Division Multiple Access - CDMA) και επεξεργασία πολλαπλών κεραιών. Κάποια συστήματα, όπως αυτά των εταιριών SOMA Networks και Navini Networks, παρουσίασαν ικανοποιητικές επιδόσεις σύνδεσης σε τερματικά συνδρομητών, τα οποία βρίσκονταν σε απόσταση κάποιων χιλιομέτρων, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεραίας έξω από το κτίριο. Τα δεύτερης γενιάς συστήματα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικότητας κατέστησαν δυνατή τη μετάδοση μερικών megabits ανά δευτερόλεπτο σε ακτίνα κυψέλης (cell range) ορισμένων χιλιομέτρων.

#### 1.1.4. Εμφάνιση τεχνολογίας βασιζόμενη σε πρότυπα

Το 1998, το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) σχημάτισε μία ομάδα, την οποία ονόμασε 802.16, προκειμένου να αναπτύξει ένα πρότυπο για το *ασύρματο μητροπολιτικό δίκτυο*, ή ασύρματο MAN. Στην αρχή, η ομάδα αυτή επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη λύσεων για τη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 10GHz και 66GHz, με σκοπό να προσφέρει συνδέσεις υψηλής ταχύτητας σε επιχειρήσεις που δεν μπορούσαν να αποκτήσουν τεχνολογία οπτικών ινών. Τα συστήματα αυτά, όπως το LMDS, σχεδιάστηκαν για να μπορούν να τοποθετηθούν σε οπτικούς δακτυλίους και να κατανέμουν το εύρος ζώνης μέσω της διαμόρφωσης -σημείο προς πολλαπλά σημεία- σε επιχειρήσεις που χρησιμοποιούσαν τεχνολογίες οπτικής επαφής (LOS). Τον Δεκέμβριο του 2001, η ομάδα IEEE 802.16 παρήγαγε ένα πρότυπο το οποίο και εγκρίθηκε. Το πρότυπο αυτό, με ονομασία Wireless MAN-SC, καθόρισε ένα φυσικό επίπεδο που χρησιμοποιούσε τεχνικές διαμόρφωσης μονού φορέα και ένα επίπεδο ελέγχου πρόσβασης μέσων (Media Access Control - MAC) με μία δομή πολυπλεξίας κατά ριπών με κατανομή χρόνου (Time Division Multiplexing - TDM) που υποστήριζε τις τεχνολογίες αμφίδρομης διαίρεσης συχνότητας (Frequency Division Duplexing - FDD) και αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (Time Division Duplexing - TDD).

Αφού ολοκλήρωσε το πρότυπο αυτό, η ομάδα ξεκίνησε την επέκταση και τροποποίησή του προκειμένου να λειτουργεί σε αδειοδοτημένες και μη συχνότητες στην περιοχή από 2GHz έως 11GHz, κάτι που θα έδινε τη δυνατότητα για υλοποιήσεις χωρίς οπτική επαφή (NLOS). Η τροποποίηση αυτή, με ονομασία IEEE 802.16a, ολοκληρώθηκε το 2003, με τα συστήματα OFDM να προστίθενται ως μέρος του φυσικού επιπέδου για την υποστήριξη των υλοποιήσεων σε περιβάλλοντα πολλαπλών διαδρομών. Έως τότε, η τεχνολογία OFDM είχε καθιερωθεί ως η επιλογή για το πρόβλημα πολλαπλών διαδρομών όσον αφορά την ευρυζωνικότητα και αποτελούσε ήδη μέρος των αναθεωρημένων προτύπων IEEE 802.11. Εκτός από τα φυσικά επίπεδα OFDM, το 802.16a καθόριζε επίσης επιπλέον επιλογές για το επίπεδο MAC, όπως υποστήριξη για την πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (Orthogonal Frequency Division Multiple Access - OFDMA).

Το 2004 πραγματοποιήθηκαν και ολοκληρώθηκαν επιπλέον αναθεωρήσεις στο πρότυπο 802.16a. Το αναθεωρημένο αυτό πρότυπο, με ονομασία IEEE 802.16-2004, αντικατέστησε τα 802.16, 802.16a και 802.16c με ένα κοινό πρότυπο, το οποίο έχει επίσης υιοθετηθεί ως βάση για το μητροπολιτικό δίκτυο υψηλών επιδόσεων (High-Performance Metropolitan Area Network - HIPERMAN) από το Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Προτύπων Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute - ETSI). Το 2003, η ομάδα 802.16 ξεκίνησε να βελτιώνει τις προδιαγραφές του IEEE 802.16-2004, ώστε να υπάρξουν εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής όταν κινείται κάποιος με ταχύτητες όπως αυτές των οχημάτων. Η αναθεώρηση αυτή, με ονομασία 802.16, ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2005 και δημοσιεύτηκε επισήμως ως IEEE 802.16e-2005. Καθορίζει το κλιμακούμενο OFDM για το φυσικό επίπεδο και προσθέτει και άλλες τροποποιήσεις στο επίπεδο MAC ώστε να προσφέρει τη δυνατότητα για κίνηση με υψηλές ταχύτητες.

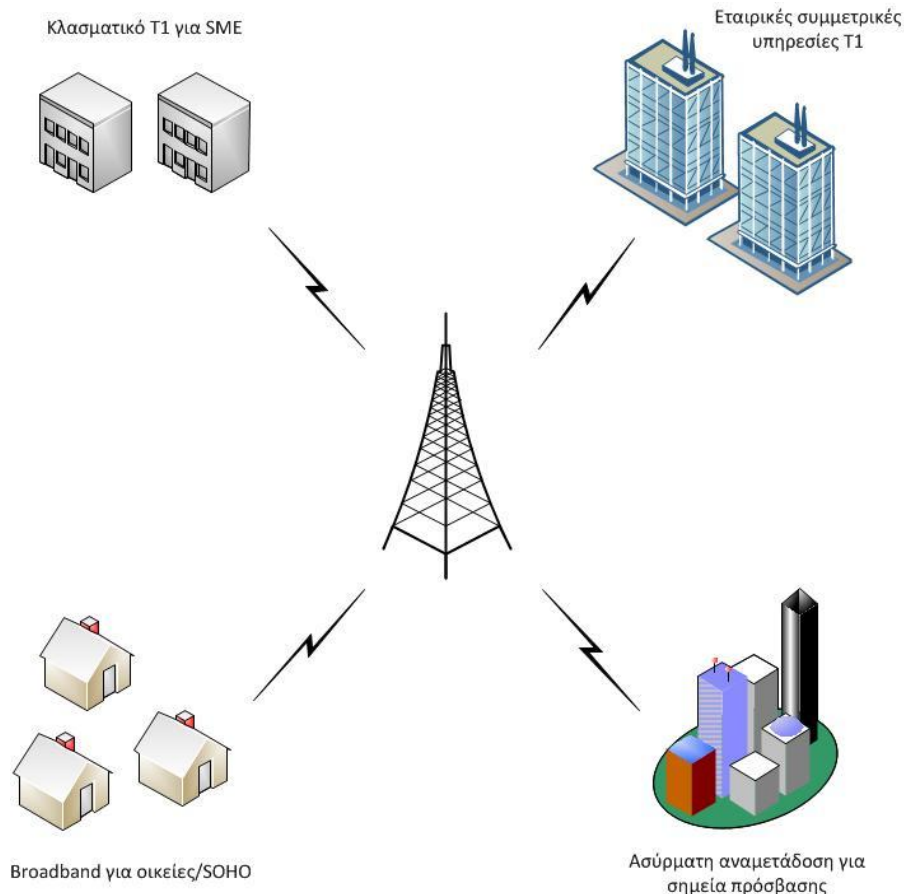
Όπως αποδείχτηκε, οι προδιαγραφές του προτύπου IEEE 802.16 είναι μία συλλογή από

πρότυπα με ευρύ φάσμα. Προκειμένου να ικανοποιηθούν όλες οι διαφορετικές ανάγκες της βιομηχανίας, το πρότυπο ενσωμάτωσε πληθώρα επιλογών. Για να αναπτυχθούν διαλειτουργικές λύσεις με την οικογένεια προτύπων 802.16, η εμβέλεια του προτύπου έπρεπε να περιοριστεί. Αυτό επιτεύχθηκε ύστερα από ομοφωνία που υπήρξε ως προς τις επιλογές του προτύπου που θα υλοποιούνται και ως προς τις δοκιμές για τη διαλειτουργικότητα. Η ΙΕΕΕ ανέπτυξε τις προδιαγραφές αλλά ανέθεσε στη βιομηχανία να βρει τον τρόπο να μετατρέψει τις προδιαγραφές αυτές σε ένα διαλειτουργικό πρότυπο που θα μπορούσε να πιστοποιηθεί. Έτσι, λοιπόν, σχηματίστηκε το WiMAX Forum για να λύσει το πρόβλημα αυτό αλλά και για να παρέχει λύσεις βάσει των προτύπων ΙΕΕΕ 802.16. Το WiMAX Forum μοντελοποιήθηκε με βάση τους άξονες των γραμμών της ένωσης Wi-Fi Alliance, η οποία είχε αξιοσημείωτη επιτυχία στην προώθηση και παροχή δοκιμών διαλειτουργικότητας που βασιζόνταν στην οικογένεια προτύπων ΙΕΕΕ 802.11.

Στο WiMAX Forum συμμετέχουν εταιρίες από όλους τους τομείς της βιομηχανίας, όπως π.χ. εταιρίες ημιαγωγών, κατασκευαστές εξοπλισμού, συναρμολογητές συστημάτων και πάροχοι υπηρεσιών. Τον Ιανουάριο του 2006, το φόρουμ ξεκίνησε τις δοκιμές διαλειτουργικότητας και ανακοίνωσε το πρώτο πιστοποιημένο προϊόν που βασίζεται στο πρότυπο ΙΕΕΕ 802.16-2004 για σταθερές εφαρμογές. Τα προϊόντα που βασίζονται στο ΙΕΕΕ 802.16e-2005 πιστοποιήθηκαν στις αρχές του 2007. Πολλοί από τους κατασκευαστές που παλαιότερα ανέπτυσαν τις δικές τους ιδιωτικές λύσεις, ανακοίνωσαν ότι σκοπεύουν να μεταφέρουν τις λύσεις τους σε σταθερό ή/και ασύρματο WiMAX. Η άφιξη προϊόντων με πιστοποίηση WiMAX αποτελεί ορόσημο στην ιστορία της ασύρματης ευρυζωνικότητας.

## **1.2. Σταθερή ασύρματη ευρυζωνικότητα: Εφαρμογές και στόχοι της αγοράς**

Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν μία ασύρματη σταθερή λύση μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: *σημείο προς σημείο* (point-to-point) και *σημείο προς πολλαπλά σημεία* (point-to-multipoint). Οι εφαρμογές σημείο προς σημείο περιλαμβάνουν την συνδεσιμότητα των κτιρίων μίας πανεπιστημιούπολης με το μικροκυματικό δίκτυο κορμού. Οι εφαρμογές σημείου προς πολλαπλά σημεία περιλαμβάνουν: 1) ευρυζωνικές συνδέσεις για οικείες, μικρά γραφεία και γραφεία στο σπίτι (Small Office/Home Office - SOHO), μικρές και μικρομεσαίες επιχειρήσεις (Small to Medium Enterprise - SME), 2) T1 ή κλασματικές υπηρεσίες περίπου όπως η T1 για επιχειρήσεις και 3) ασύρματη αναμετάδοση για σημεία πρόσβασης Wi-Fi. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει τις διάφορες εφαρμογές σημείου προς πολλαπλά σημεία.



**Σχήμα 1:** WiMAX εφαρμογές σημείου προς πολλαπλά σημεία [16]

**Ευρυζωνική πρόσβαση για ιδιώτες και μικρές επιχειρήσεις:** Μία από τις μεγαλύτερες εφαρμογές του WiMAX τα επόμενα χρόνια θα είναι η ευρυζωνική πρόσβαση για αστικές, SOHO και SME αγορές. Οι ευρυζωνικές υπηρεσίες που παρέχονται μέσω του σταθερού WiMAX θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν υψηλής ταχύτητας πρόσβαση στο Διαδίκτυο, υπηρεσίες τηλεφωνίας χρησιμοποιώντας τεχνολογία φωνής μέσω IP (VoIP) και αρκετές ακόμα εφαρμογές που βασίζονται στο Internet. Η σταθερή ασύρματη πρόσβαση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές ενσύρματες συνδέσεις. Τα πλεονεκτήματα αυτά περιλαμβάνουν χαμηλό κόστος εισόδου και υλοποίησης, ταχύτερη και πιο εύκολη εγκατάσταση και απόσβεση επένδυσης, δυνατότητα κατασκευής του δικτύου σύμφωνα με τις ανάγκες του καθενός, χαμηλό λειτουργικό κόστος για τη συντήρηση, διαχείριση και λειτουργία του δικτύου και ανεξαρτησία από τους επιβεβλημένους φορείς.

Από την πλευρά του εξοπλισμού της έδρας του πελάτη (Customer Premise Equipment - CPE) ή από την πλευρά του σταθμού συνδρομητών (Subscriber Station - SS), μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο είδη μοντέλων υλοποίησης για τις σταθερές ευρυζωνικές υπηρεσίες, στις αστικές, SOHO και SME αγορές. Το πρώτο μοντέλο απαιτεί την εγκατάσταση εξωτερικής κεραίας στον χώρο του πελάτη, ενώ το άλλο μοντέλο χρησιμοποιεί ένα πλήρες ενσωματωμένο μόντεμ το οποίο ο πελάτης μπορεί να εγκαταστήσει μέσα στο χώρο του, όπως με τα κλασικά DSL μόντεμ. Η χρήση εξωτερικών κεραίων βελτιώνει την ασύρματη σύνδεση και κατά συνέπεια την απόδοση του συστήματος. Το μοντέλο αυτό παρέχει



μεγαλύτερη εμβέλεια κάλυψης ανά σταθμό βάσης, με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότεροι σταθμοί βάσης για την ευρυζωνική κάλυψη άρα σαφώς απαιτείται και μικρότερο κόστος επένδυσης. Η εγκατάσταση, ωστόσο, εξωτερικής κεραίας απαιτεί την ανάγκη ενός εξειδικευμένου επαγγελματία που θα αναλάβει τη διαδικασία αυτή. Συνεπάγεται, έτσι, υψηλότερο κόστος σταθμού συνδρομητών. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι τα δύο σενάρια υλοποίησης παρουσιάζουν έντονο ανταγωνισμό μεταξύ εξόδων κεφαλαίων και λειτουργικών εξόδων: ανάμεσα στο κόστος υποδομής για έναν σταθμό βάσης και στο κόστος εγκατάστασης σταθμού συνδρομητή. Επομένως, στις αναπτυσσόμενες χώρες, το υψηλό εργατικό κόστος και η γενική αντιπάθεια για τις εξωτερικές κεραίες, είναι πιθανό να οδηγήσουν σε μία υλοποίηση εσωτερικών σταθμών συνδρομητών, τουλάχιστον από τους οικιακούς χρήστες. Στις αναπτυσσόμενες χώρες όμως, όπου η εργασία είναι φθηνότερη και δεν υπάρχει έντονη κριτική για αισθητικές παρεμβάσεις, το μοντέλο εγκατάστασης εξωτερικών σταθμών συνδρομητών φαντάζει πιο εφικτό, οικονομικά.

**Προσομοίωση T1 για επιχειρήσεις:** Η επόμενη σημαντική ευκαιρία για το σταθερό WiMAX στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι μία λύση για ανταγωνιστικό T1/E1, κλασματικό T1/E1 ή υπηρεσίες υψηλότερων ταχυτήτων για τις επιχειρήσεις. Δεδομένου ότι μόνο ένα πολύ μικρό ποσοστό των παγκόσμιων εμπορικών κτιρίων έχει πρόσβαση στις οπτικές ίνες, υπάρχει μία σαφής ανάγκη για εναλλακτικές λύσεις υψηλού εύρους ζώνης για επιχειρηματικούς πελάτες. Στον επιχειρηματικό τομέα, υπάρχει αυξημένη ζήτηση για υπηρεσίες συμμετρικού T1/E1, των οποίων τις τεχνικές απαιτήσεις δεν έχουν καταφέρει ακόμα να καλύψουν οι καλωδιακές λύσεις και το DSL. Οι παραδοσιακές υπηρεσίες τηλεφωνικών εταιριών συνεχίζουν να εξυπηρετούν τη ζήτηση αυτή με σχετικά μικρό ανταγωνισμό. Οι λύσεις της σταθερής ασύρματης πρόσβασης μέσω της τεχνολογίας WiMAX θα μπορούσαν να ανταγωνιστούν τις παραδοσιακές τεχνολογίες σταθερής ενσύρματης πρόσβασης, όσον αφορά τους τομείς της προσφοράς στην αγορά, της οικονομικής πολιτικής και της δυναμικής παροχής εύρους ζώνης.

**Αναμετάδοση για σημεία πρόσβασης Wi-Fi:** Μία ακόμα ενδιαφέρουσα ευκαιρία για το WiMAX στις αναπτυσσόμενες χώρες είναι η πιθανότητα να λειτουργήσει ως σύνδεση αναμετάδοσης στην αγορά των σημείων πρόσβασης Wi-Fi (hotspots). Στις μέρες μας, όλο και περισσότερα σημεία πρόσβασης Wi-Fi κάνουν την εμφάνισή τους σε δημόσιους χώρους όπως συνεδριακά κέντρα, πάρκα, ξενοδοχεία, αεροδρόμια και καφετέριες. Τα Wi-Fi hotspots θα συνεχίσουν να αυξάνονται με μεγάλο βαθμό και τα επόμενα χρόνια. Οι διαχειριστές της τεχνολογίας αυτής χρησιμοποιούν αυτή τη στιγμή ενσύρματες ευρυζωνικές συνδέσεις (DSL) για να συνδέσουν τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi με ένα κεντρικό σημείο δικτύου. Το WiMAX θα μπορούσε να λειτουργήσει ως μία ταχύτερη και οικονομικότερη εναλλακτική πρόταση απέναντι στην ενσύρματη αναμετάδοση για αυτά τα σημεία πρόσβασης. Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες αναμετάδοσης σημείου προς πολλαπλά σημεία του WiMAX, θα μπορούσε το τελευταίο να λειτουργήσει ως σύνδεση αναμετάδοσης για τα σημεία πρόσβασης Wi-Fi ώστε να βελτιώσει το εμπορικό τους πρόσωπο αλλά και να παρέχει επιπλέον προοπτικές για την ανάπτυξή τους. Επιπλέον, το WiMAX θα μπορούσε να λειτουργήσει και ως τεχνολογία αναμετάδοσης τρίτης γενιάς (3G).

### 1.3. Κινητή ασύρματη ευρυζωνικότητα: Εφαρμογές και στόχοι της αγοράς

Παρότι οι αρχικές υλοποιήσεις της τεχνολογίας WiMAX θα είναι για σταθερές εφαρμογές, η πλήρης προοπτική του θα γίνει πράξη όταν χρησιμοποιηθεί για καινοτόμες νομαδικές και κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές. Όσο οι χρήστες συνηθίζουν την ευρυζωνική πρόσβαση με υψηλές ταχύτητες στο σπίτι και στον χώρο εργασίας, τόσο θα απαιτούν παρόμοιες υπηρεσίες σε νομαδικό ή κινητό περιβάλλον. Οι εταιρίες παροχής υπηρεσιών θα μπορούσαν, λοιπόν, να χρησιμοποιήσουν την τεχνολογία WiMAX για να ικανοποιήσουν τους συνδρομητές τους.

Το πρώτο βήμα προς την επίτευξη της κινητικότητας θα έρθει από τη προσθήκη νομαδικών δυνατοτήτων στη σταθερή ευρυζωνική πρόσβαση. Η παροχή υπηρεσιών WiMAX σε φορητές συσκευές θα επιτρέψει στους χρήστες να απολαμβάνουν υψηλό εύρος ζώνης όχι μόνο στο σπίτι και τη δουλειά αλλά και σε άλλα σημεία. Οι χρήστες θα μπορούν να μεταφέρουν την ευρυζωνική σύνδεσή τους καθώς μετακινούνται από μία τοποθεσία σε μία άλλη. Η νομαδική πρόσβαση ίσως δεν επιτρέπει την απρόσκοπτη επικοινωνία σε υψηλές ταχύτητες κίνησης, αλλά θα επιτρέψει την επικοινωνία σε μικρές ταχύτητες κίνησης και τη δυνατότητα σύνδεσης σε ένα δίκτυο από οποιαδήποτε τοποθεσία που βρίσκεται μέσα στην περιοχή εξυπηρέτησης.

Σε πολλές περιοχές του κόσμου, οι υπάρχοντες φορείς σταθερής γραμμής που δεν διαθέτουν κυψελοειδές δίκτυο, PCS ή 3G φάσμα θα μπορούσαν να στραφούν στο WiMAX για υπηρεσίες κινητικότητας. Καθώς η βιομηχανία βαδίζει προς τη κατεύθυνση των πακέτων τεσσάρων υπηρεσιών (quadriple-play) -φωνή, δεδομένα, βίντεο και κινητικότητα- μερικές εταιρίες παροχής ευρυζωνικών υπηρεσιών δεν περιλαμβάνουν στα δικά τους πακέτα το στοιχείο της κινητικότητας και έτσι είναι πιθανό να εκτιμήσουν ιδιαίτερα το WiMAX. Τέτοιες εταιρίες είναι αυτές των δορυφορικών επικοινωνιών αλλά και των δημόσιων τηλεφωνικών γραμμών. Χρησιμοποιώντας τη τεχνολογία WiMAX, οι εταιρίες αυτές μπορούν να βελτιώσουν τα προϊόντα τους αλλά και να διατηρήσουν ή και να αυξήσουν τη βάση πελατών τους.

Οι υφιστάμενοι παροχείς κινητής επικοινωνίας είναι πιθανότερο να συνεχίσουν να εξελίσσουν την τεχνολογία τρίτης γενιάς (3G) για υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων και να μην υιοθετήσουν το WiMAX. Παρόλα αυτά, υπάρχει περίπτωση κάποιοι κλασσικοί πάροχοι κινητής επικοινωνίας να υλοποιήσουν το WiMAX ως μία λύση επικάλυψης, προκειμένου να παρέχουν ακόμα υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε μεγάλα αστικά κέντρα. Αυτό συμβαίνει ήδη από την εταιρία επικοινωνιών της Κορέας, Korea Telecom, η οποία ξεκίνησε να υλοποιεί υπηρεσίες WiBro σε μητροπολιτικές περιοχές προκειμένου να συμπληρώσει την υπηρεσία της CDMA2000 προσφέροντας υψηλότερες επιδόσεις για ανταλλαγή μηνυμάτων πολυμέσων, βίντεο και υπηρεσίες ψυχαγωγίας. Η τεχνολογία WiBro είναι μία λύση κινητής ευρυζωνικής σύνδεσης η οποία αναπτύχθηκε από το ίδρυμα έρευνας και τηλεπικοινωνιών της Κορέας (Electronics and Telecommunications Research Institute – ETRI) για τη ζώνη των 2.3GHz. Στην Κορέα, τα συστήματα WiBro παρέχουν στους σημερινούς τελικούς χρήστες ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων από 512kbps έως 3Mbps. Η τεχνολογία WiBro είναι πλέον συμβατή με το

πρότυπο IEEE 802.16e-2005 και το κινητό WiMAX.

Εκτός από πρόσβαση στο διαδίκτυο με υψηλότερες ταχύτητες, το κινητό WiMAX μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παροχή υπηρεσιών φωνής μέσω IP στο μέλλον. Η σχεδίαση μικρής καθυστέρησης του κινητού WiMAX δίνει τη δυνατότητα για παροχή αποτελεσματικών υπηρεσιών VoIP. Οι τεχνολογίες VoIP μπορούν επίσης να βελτιωθούν και να παρέχουν νέες καινοτόμες υπηρεσίες όπως συνομιλία, υπηρεσία push-to-talk και ανταλλαγή μηνυμάτων πολυμέσων.

Νέοι και υπάρχοντες πάροχοι μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν τη τεχνολογία WiMAX ώστε να προσφέρουν εξατομικευμένες υπηρεσίες ευρυζωνικότητας, όπως φορητή ψυχαγωγία. Το ευέλικτο εύρος ζώνης των καναλιών και η υποστήριξη πολλαπλών επιπέδων ποιότητας υπηρεσιών (QoS) μπορεί να επιτρέψουν στο WiMAX να χρησιμοποιηθεί από εταιρίες παροχής υπηρεσιών για διαφορετικές εφαρμογές ψυχαγωγίας υψηλού εύρους ζώνης και μικρής καθυστέρησης. Για παράδειγμα, το WiMAX θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε μία φορητή παιχνιδιομηχανή η οποία θα χρησιμοποιείται σε σταθερό και κινητό περιβάλλον για διαδραστικά παιχνίδια. Επιπλέον παραδείγματα εφαρμογών ψυχαγωγίας είναι οι υπηρεσίες συνεχούς αναπαραγωγής μουσικής σε συσκευές MP3 και οι υπηρεσίες βίντεο σε φορητές συσκευές αναπαραγωγής πολυμέσων (media players). Καθώς οι παραδοσιακές τηλεφωνικές εταιρίες στρέφονται σε υπηρεσίες ψυχαγωγίας όπως είναι η τηλεόραση που βασίζεται στο πρωτόκολλο Internet (IPTV), το φορητό WiMAX θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως μία λύση που θα επεκτείνει τις εφαρμογές αυτές και το περιεχόμενό τους έξω από τα όρια της οικίας.

#### **1.4. Επιλογές φάσματος για την ασύρματη ευρυζωνικότητα**

Η διαθεσιμότητα του φάσματος συχνοτήτων αποτελεί το «κλειδί» για την παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Υπάρχουν αρκετές ζώνες συχνοτήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την λειτουργία του WiMAX. Κάθε ζώνη έχει μοναδικά χαρακτηριστικά τα οποία με τη σειρά τους έχουν σημαντικό αντίκτυπο στις επιδόσεις του συστήματος. Η λειτουργική ζώνη συχνοτήτων συχνά επιβάλλει θεμελιώδεις περιορισμούς στους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που μπορούν να επιτευχθούν αλλά και στην γεωγραφική περιοχή κάλυψης. Ο παρακάτω Πίνακας 1 συνοψίζει τις διάφορες ζώνες συχνοτήτων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ασύρματη ευρυζωνικότητα.

Τίτλος	Κατανομή συχνοτήτων	Ποσότητα φάσματος	Σημειώσεις
Σταθερή ασύρματη πρόσβαση (FWA): 3.5GHz	3.4GHz - 3.6GHz κυρίως, οι 3.3GHz – 3.4GHz και 3.6GHz - 3.8GHz διατίθενται επίσης σε κάποιες χώρες	Συνολικά 200MHz κυρίως. Ποικίλει από 2 X 5MHz σε διάφορες χώρες	Γενικά δεν διατίθενται στις ΗΠΑ. Μία ποσότητα 50MHz από 3.65GHz έως 3.70GHz διανέμεται στις ΗΠΑ για λειτουργία χωρίς άδεια.
Ευρυζωνικές υπηρεσίες ραδιοσήματος (BRS): 2.5GHz	2.495GHz – 2.690GHz	194MHz συνολικά, άδειες 22.5MHz όπου μία συχνότητα 16.5MHz συνδυάζεται με 6MHz	Η δέσμευση που παρουσιάζεται αφορά τις ΗΠΑ μετά την πρόσφατη αλλαγή στο πλάνο των συχνοτήτων. Διατίθεται επίσης και σε άλλες χώρες.
Υπηρεσίες ασύρματων επικοινωνιών (WCS): 2.3GHz	2.305GHz – 2.320GHz και 2.345GHz – 2.360GHz	Δύο 2 X 5MHz σε ζεύγη και δύο 5MHz σε μη ζεύγη	Η δέσμευση που παρουσιάζεται αφορά τις ΗΠΑ. Διατίθεται επίσης στην Κορέα, την Αυστραλία και τη Νέα Ζηλανδία
Ελεύθερη συχνότητα: 2.4GHz	2.405GHz – 2.4835GHz	Ένα μπλοκ 80MHz	Η δέσμευση παρουσιάζεται για τις ΗΠΑ, διατίθεται όμως και σε όλο τον κόσμο. Πολύ «δημοφιλής» ζώνη. Χρησιμοποιείται για το Wi-Fi.
Ελεύθερη συχνότητα: 5GHz	5.250GHz – 5.350GHz και 5.725GHz – 5.825GHz	200MHz διαθέσιμα στις ΗΠΑ και θα διανεμηθούν επιπλέον 255MHz	Ονομάζεται U-NII στις ΗΠΑ. Γενικά διατίθεται σε όλο τον κόσμο. Οι χαμηλότερες συχνότητες αντιμετωπίζουν σοβαρούς περιορισμούς ισχύος.
Ζώνη UHF: 700MHz	698MHz – 746MHz (κατώτερο), 747MHz – 792MHz (ανώτερο)	30MHz ανώτερη ζώνη, 48MHz κατώτερη ζώνη	Η δέσμευση που παρουσιάζεται αφορά τις ΗΠΑ. Έχουν δημοπρατηθεί έως τώρα μόλις 18MHz της κατώτερης

			ζώνης. Μπορεί να ακολουθήσουν και άλλα κράτη.
Προχωρημένες ασύρματες υπηρεσίες (AWS)	1.710GHz – 1.755GHz και 2.110GHz – 2.155GHz	2 X 45MHz σε ζεύγος	Δημοπρατήθηκε στις ΗΠΑ. Σε άλλα κράτη χρησιμοποιείται για το 3G.

**Πίνακας 1:** Πιθανές επιλογές φάσματος για την ασύρματη ευρυζωνικότητα

Από μία παγκόσμια προοπτική συμπεραίνει κάποιος ότι οι ζώνες 2.3GHz, 2.5GHz, 3.5GHz και 5.7GHz είναι πιο κοντά στις υλοποιήσεις του WiMAX. Το WiMAX Forum καθόρισε αυτές τις ζώνες για τα αρχικά πιστοποιητικά διαλειτουργικότητας. Παρακάτω, περιγράφονται εν συντομία οι ζώνες αυτές.

**Αδειοδοτημένη ζώνη 2.5GHz:** Οι ζώνες μεταξύ 2.5GHz και 2.7GHz έχουν κατανεμηθεί στις Ηνωμένες Πολιτείες, στον Καναδά, στο Μεξικό, στη Βραζιλία και σε μερικές χώρες της νοτιοανατολικής Ασίας. Σε πολλές χώρες, η χρήση της ζώνης αυτής περιορίζεται μόνο σε σταθερές εφαρμογές, ενώ σε μερικές χώρες δεν επιτρέπεται η αμφίδρομη επικοινωνία. Ανάμεσα σε όλες τις διαθέσιμες ζώνες, η συγκεκριμένη ζώνη προσφέρει τις καλύτερες προοπτικές για την ασύρματη ευρυζωνικότητα, ιδιαίτερα μέσα στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η Αμερικάνικη Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) επέτρεψε τις αμφίδρομες μεταδόσεις στη ζώνη αυτή το 1998 και στα μέσα του 2004 οργάνωσε ξανά το πλάνο καναλιών. Αυτή η ζώνη, η οποία πλέον ονομάζεται ζώνη *ευρυζωνικών υπηρεσιών ραδιοσήματος* (Broadband Radio Services - BRS), ονομαζόταν παλαιότερα ζώνη MMDS. Η ζώνη BRS έχει πλέον 195MHz, συμπεριλαμβάνοντας τις ζώνες ασφαλείας και τα κανάλια με υπηρεσίες διανομής πολλαπλών σημείων (Multipoint Distribution Services - MDS) τα οποία διατίθενται στις Ηνωμένες Πολιτείες στο διάστημα από 2.495GHz έως 2.690GHz. Οι κανονισμοί επιτρέπουν διάφορες υπηρεσίες, όπως σταθερές, φορητές και κινητές. Επιπλέον, επιτρέπονται και οι δύο λειτουργίες αμφίδρομης διαίρεσης συχνότητας (FDD) και αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD). Οι άδειες αφορούν οκτώ τμήματα των 22.5MHz σ' αυτήν τη ζώνη, ενώ ένα κομμάτι 16.5MHz συνδυάζεται με ένα κομμάτι 6MHz, με το κομμάτι διαχωρισμού των δύο μπλοκ να ποικίλει από 10MHz έως 55MHz. Οι κανόνες αυτής της ζώνης επιτρέπουν επίσης τη συγκέντρωση αδειών. Οι εταιρίες Sprint, Nextel και Clearwire ελέγχουν την πλειοψηφία του φάσματος αυτού στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Αρκετές ρυθμιστικές αλλαγές ίσως είναι απαραίτητες σε πολλές χώρες προκειμένου η ζώνη αυτή να γίνει περισσότερο διαθέσιμη και πιο ελκυστική στο κινητό WiMAX.

**Αδειοδοτημένη ζώνη 2.3GHz:** Η ζώνη αυτή, στις Ηνωμένες Πολιτείες ονομάζεται WCS (Wireless Communications Services), διατίθεται και σε άλλες χώρες όπως η Αυστραλία, η Νότια Κορέα και η Νέα Ζηλανδία. Στην πραγματικότητα, οι υπηρεσίες WiBro που υλοποιούνται στη Νότια Κορέα χρησιμοποιούν αυτή τη ζώνη. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η ζώνη αυτή περιλαμβάνει δύο ζώνες 5MHz σε ζεύγος και δύο ζώνες 5MHz σε μη ζεύγος στο διάστημα μεταξύ 2.305GHz και 2.320GHz και μεταξύ 2.345GHz και 2.360GHz. Ένας

σημαντικός περιορισμός στο φάσμα αυτό είναι οι αυστηρές απαιτήσεις εκπομπής εκτός ζώνης που επιβάλλονται από την FCC έτσι ώστε να προστατεύσει τη γειτονική ζώνη υπηρεσιών ψηφιακού ήχου και ραδιοφώνου (Digital Audio Radio Services - DARS) στο διάστημα 2.320GHz έως 2.345GHz. Σαν αποτέλεσμα του περιορισμού αυτού, είναι η δυσκολία της λειτουργίας των ευρυζωνικών υπηρεσιών και ειδικά των κινητών στα τμήματα της ζώνης αυτής που βρίσκονται κοντά στη ζώνη DARS.

**Αδειοδοτημένη ζώνη 3.5GHz:** Αυτή είναι η κύρια ζώνη που δεσμεύεται για σταθερή ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση σε πολλές χώρες στον κόσμο, με εξαίρεση τις Ηνωμένες Πολιτείες. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η FCC πρόσφατα διένειμε 50MHz φάσματος στη ζώνη από 3.65GHz έως 3.70GHz για υψηλής τάσης, μη αδειοδοτημένη χρήση με περιορισμούς στα πρωτόκολλα μετάδοσης που αποκλείουν το WiMAX. Διεθνώς, η δεσμευμένη ζώνη βρίσκεται στην περιοχή από 3.4GHz έως 3.6GHz και με μία νεότερη κατανομή στις ζώνες 3.3GHz έως 3.4GHz και 3.6GHz έως 3.8GHz επίσης. Το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαφέρει από χώρα σε χώρα, αλλά γενικά βρίσκεται κάπου στα 200MHz. Η διαθέσιμη ζώνη συνήθως χωρίζεται σε πολλές ξεχωριστές άδειες, από 2 X 5MHz έως 2 X 56MHz. Επιπλέον, οι κανονισμοί συσσώρευσης φάσματος διαφέρουν από χώρα σε χώρα. Σε μερικές χώρες επιτρέπονται μόνο λειτουργίες αμφίδρομης διαίρεσης συχνότητας (FDD), ενώ σε άλλες επιτρέπονται λειτουργίες αμφίδρομης διαίρεσης συχνότητας (FDD) ή αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD). Στις περισσότερες χώρες, οι ισχύοντες νόμοι για τη ζώνη αυτή δεν επιτρέπουν νομαδικές ή κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές. Το WiMAX Forum συνεργάζεται με τις ρυθμιστικές αρχές σε όλο τον κόσμο προκειμένου οι περιορισμοί αυτοί να γίνουν πιο ευέλικτοι. Παρόλα αυτά, οι μεγαλύτερες απώλειες της μετάδοσης ραδιοσημάτων στη συχνότητα των 3.5GHz είναι κάτι που αυξάνει τις δυσκολίες για παροχή νομαδικών και κινητών υπηρεσιών στη ζώνη αυτή.

**Μη αδειοδοτημένη ζώνη 5GHz:** Η ελεύθερη ζώνη συχνοτήτων από 5.25GHz έως 5.85GHz παρουσιάζει ενδιαφέρον για το WiMAX. Γενικά, η ζώνη αυτή είναι διαθέσιμη παγκοσμίως, ακόμα και στις Ηνωμένες Πολιτείες όπου αποτελεί μέρος της μη αδειοδοτημένης ζώνης εθνικής υποδομής πληροφοριών (Unlicensed National Information Infrastructure - U-NII) και διατίθεται 200MHz φάσματος για εξωτερική χρήση. Επιπλέον 225MHz φάσματος σ' αυτή τη ζώνη έχουν αναγνωριστεί από την FCC για μελλοντική ελεύθερη χρήση. Καθότι η ζώνη αυτή είναι ελεύθερη για όλους, προσφέρεται για αρχικές υλοποιήσεις WiMAX, ιδιαίτερα σε μη προνομιούχες, αραιοκατοικημένες αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές. Το μεγάλο εύρος ζώνης που διατίθεται μπορεί να δώσει στις εταιρίες τη δυνατότητα να συντονίζουν τις συχνότητες και να ελαχιστοποιήσουν τις παρεμβολές οι οποίες προκαλούν ανησυχία για τη χρήση των ελεύθερων ζωνών, ιδιαίτερα σε μη προνομιούχες αγορές. Η σχετικά υψηλή συχνότητα, σε συνδυασμό με τους περιορισμούς ισχύος σ' αυτήν τη ζώνη στέκονται εμπόδιο στην παροχή νομαδικών ή κινητών υπηρεσιών. Ακόμα και οι σταθερές εφαρμογές θα απαιτούν τις περισσότερες φορές εγκατάσταση εξωτερικών κεραιών στην περιοχή των συνδρομητών. Μέσα στη ζώνη των 5GHz, το ανώτερο τμήμα 5.725GHz - 5.850GHz είναι ιδανικότερο για τη τεχνολογία WiMAX. Πολλές χώρες επιτρέπουν υψηλότερη έξοδο ισχύος - 4W ενεργή ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς (Effective Isotropic Radiated Power - EIRP) - σ' αυτήν την ζώνη σε σύγκριση με ισχύ EIRP 1W ή λιγότερο στις κατώτερες ζώνες των 5GHz. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η FCC εξετάζει το ενδεχόμενο για περαιτέρω αύξηση της εξόδου ισχύος (ίσως στο επίπεδο των 25W) σε μη αδειοδοτημένες ζώνες σε αγροτικές περιοχές,

έτσι ώστε να διευκολύνει οικονομικότερες υλοποιήσεις σε μη προνομιούχες περιοχές. Επιπλέον, χρήζει σημασίας να αναφερθεί ότι υπάρχουν ακόμα 80MHz μη αδειοδοτημένου φάσματος, στη ζώνη των 2.4GHz, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και για τη τεχνολογία WiMAX. Δεδομένης όμως της ήδη πολύ έντονης χρήσης στη ζώνη αυτή από το Wi-Fi, είναι δύσκολο να αναπτυχθεί το WiMAX στη ζώνη των 2.4GHz, ιδιαίτερα για εφαρμογές από ένα σημείο προς πολλαπλά σημεία.

Αν και οι ζώνες 2.3GHz, 2.5GHz, 3.5GHz και 5.7GHz είναι οι καταλληλότερες για τη τεχνολογία WiMAX βραχυπρόθεσμα, θα μπορούσαν ωστόσο και άλλες ζώνες να δεχτούν μελλοντικές υλοποιήσεις του WiMAX. Παραδείγματα αυτών των ζωνών είναι η ζώνη υπερυψηλής συχνότητας (UHF) και η ζώνη προχωρημένων ασύρματων επικοινωνιών (AWS).

**Ζώνες UHF:** Οι τηλεοπτικοί σταθμοί σε όλο τον κόσμο μεταφέρονται από το αναλογικό στο ψηφιακό σήμα. Έτσι, θα διατεθεί ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος κάτω των 800MHz. Για παράδειγμα, στις Ηνωμένες Πολιτείες, η FCC προσδιόρισε ότι η ζώνη συχνοτήτων 698MHz – 746MHz θα είναι αυτή που θα εκκενωθεί από τα κανάλια που θα στραφούν στην ψηφιακή τηλεόραση. Από αυτή τη ζώνη, 18MHz του φάσματος έχουν ήδη δημοπρατηθεί και τα υπόλοιπα 60MHz αναμένεται να δημοπρατηθούν σε λίγα χρόνια. Η FCC έχει επίσης ξεκινήσει να μελετά την πιθανότητα να κατανείμει μεγαλύτερο μέρος του φάσματος στις μπάντες κάτω των 700MHz, ίσως και για μη αδειοδοτημένη χρήση. Το φάσμα στις ζώνες UHF έχει πολύ καλά χαρακτηριστικά μετάδοσης σε σχέση με άλλες ζώνες μικροκυμάτων, με αποτέλεσμα να θεωρείται πολύτιμο, ιδιαίτερα για φορητές και κινητές υπηρεσίες. Η μεγαλύτερη απόσταση κάλυψης που είναι εφικτή στη ζώνη αυτή καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές τις οικονομικές μελέτες ανάπτυξης τεχνολογίας WiMAX σε περιαστικές και αγροτικές περιοχές.

**Ζώνη AWS:** Τον Αύγουστο του 2006, η FCC δημοπράτησε τη ζώνη 1.710GHz – 1.755GHz σε συνδυασμό με τη ζώνη 2.110GHz – 2.155GHz ως φάσμα για τις προχωρημένες ασύρματες υπηρεσίες (AWS) στις Ηνωμένες Πολιτείες. Η ζώνη αυτή προσφέρει 90MHz ελκυστικού φάσματος το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί κατάλληλα από το WiMAX μακροπρόθεσμα.

Επιπλέον, η τεχνολογία WiMAX είναι πιθανό να μπορεί να υλοποιηθεί και σε ζώνες που έχουν εκχωρηθεί στο 3G. Ειδικά στην Ευρώπη, οι εταιρίες που ασχολούνται με τη τεχνολογία 3G θα μπορούσαν να υλοποιήσουν την τεχνολογία WiMAX εάν αποκτήσουν την σχετική άδεια για αυτό. Μία ακόμη ενδιαφέρουσα πιθανότητα είναι η ζώνη L στα 1.5GHz που χρησιμοποιείται σήμερα από τους κινητούς δορυφόρους. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι τα συστήματα WiMAX θα μπορούσαν να υλοποιηθούν σε αρκετές ζώνες φάσματος. Η πρόκληση είναι η εναρμόνιση των διάφορων διανομών και κανονισμών σε όλο τον κόσμο, προκειμένου να επιτευχθεί το πλεονέκτημα οικονομικών κλίμακας. [16]

## 1.5. Επαγγελματικές προκλήσεις για την ασύρματη ευρυζωνικότητα και το WiMAX

Παρά το ενδιαφέρον της αγοράς για τη τεχνολογία WiMAX και την ευρεία υποστήριξη που λαμβάνει από τη βιομηχανία, η επιτυχία του δεν είναι προδιαγεγραμμένη. Στη πραγματικότητα, η ασύρματη ευρυζωνικότητα και ειδικότερα το WiMAX αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις που θα μπορούσαν να σταθούν εμπόδιο στην υιοθέτησή του από την αγορά.

**Η υψηλότερη προτίμηση της παραδοσιακής ευρυζωνικής πρόσβασης:** Στο χώρο των σταθερών ευρυζωνικών εφαρμογών, η τεχνολογία WiMAX θα πρέπει να ανταγωνιστεί αποτελεσματικά τις παραδοσιακές ενσύρματες λύσεις, όπως είναι το DSL και η πρόσβαση μέσω καλωδίου (cable), προκειμένου να γίνει ευρεία αποδεκτό από τις μεγάλες αγορές, όπως είναι οι Ηνωμένες Πολιτείες. Οι τεχνολογίες DSL και καλωδίου (cable) συνεχίζουν να εξελίσσονται με γρήγορο ρυθμό, προσφέροντας όλο και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες DSL στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε πολλές άλλες χώρες προσφέρουν ήδη ταχύτητες λήψης δεδομένων που αγγίζουν τα 24Mbps. Επιπλέον, οι λύσεις που βασίζονται στο νεότερο πρότυπο VDSL2 σύντομα θα προσφέρουν ταχύτητες έως 50Mbps – 100Mbps, ανάλογα με το μήκος καλωδίου του τελικού χρήστη από το τοπικό βρόγχο του παρόχου. Με τους κρατικούς φορείς να προωθούν τις οπτικές ίνες όλο και περισσότερο στα ενσύρματα δίκτυα, τα κυκλώματα που βασίζονται στο χαλκό γίνονται όλο και μικρότερα, με αποτέλεσμα να βελτιώνονται όλο και περισσότερο οι ρυθμοί μετάδοσης των δεδομένων. Επίσης, οι τεχνολογίες καλωδιακού μόντεμ προσφέρουν συχνά μεγαλύτερες ταχύτητες από τη τεχνολογία DSL. Ακόμα και κατά την αποστολή δεδομένων (upload) επιτυγχάνονται ρυθμοί αρκετών megabits ανά δευτερόλεπτο ανά χρήστη στις προαναφερθείσες τεχνολογίες. Οι εξαιρετικά υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων που υποστηρίζονται από τις ενσύρματες αυτές τεχνολογίες δίνουν τη δυνατότητα στους παρόχους να προσφέρουν εκτός από πρόσβαση στο Διαδίκτυο, υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων και υπηρεσίες τηλεόρασης όπως είναι η τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV).

Θα είναι εξαιρετικά δύσκολο για τις ασύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες να ακολουθήσουν τις αυξανόμενες επιδόσεις των αντίστοιχων ενσύρματων παραδοσιακών τεχνολογιών. Το WiMAX θα πρέπει να βασιστεί στη φορητότητα και στη κινητικότητα προκειμένου να ξεχωρίσει από τις υπόλοιπες τεχνολογίες που έχουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, έχει ένα πλεονέκτημα όσον αφορά το κόστος δομής του δικτύου του, αλλά οι τεχνολογίες DSL και πρόσβασης μέσω καλωδίου επωφελούνται από το γεγονός της μείωσης κόστους του εξοπλισμού τους που επιτυγχάνεται στις ώριμες και ανεπτυγμένες αγορές. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω εμπόδια, η τεχνολογία WiMAX είναι πιθανότερο να υλοποιηθεί σε αγροτικές και μη προνομιούχες περιοχές, σε χώρες των οποίων η αγορά της ευρυζωνικής πρόσβασης είναι αρκετά ανεπτυγμένη. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου η υπάρχουσα ευρυζωνική υποδομή είναι περιορισμένη, το WiMAX έχει όλα τα φόντα για να πρωταγωνιστήσει.

**Διαφορές στην παγκόσμια διαθεσιμότητα φάσματος:** Όπως αναφέραμε νωρίτερα, υπάρχουν αρκετές σημαντικές διαφορές στην κατανομή και στους κανονισμούς του ευρυζωνικού φάσματος σε όλο τον κόσμο. Αν και οι ζώνες 2.5GHz, 3.5GHz και 5.8GHz



κατανέμονται σε πολλές περιοχές του κόσμου, εντούτοις πολλές αναπτυσσόμενες αγορές απαιτούν νέες καταχωρήσεις. Εξαιτίας των διαφορετικών απαιτήσεων και της διαφορετικής ρυθμιστικής φιλοσοφίας των εκάστοτε εθνικών κυβερνήσεων, θα αποτελέσει πρόκληση για τη βιομηχανία να πετύχει παγκόσμια εναρμόνιση της τεχνολογίας WiMAX. Για να μπορέσει η τελευταία να γίνει δημοφιλής σε όλο τον κόσμο όπως η τεχνολογία Wi-Fi, θα πρέπει οι ρυθμιστικές αρχές να επιτρέψουν πλήρη ευελιξία όσον αφορά τις υπηρεσίες που μπορούν να προσφέρονται στις διάφορες ζώνες του φάσματος που θα χρησιμοποιεί το WiMAX.

**Ανταγωνισμός από τη τεχνολογία 3G:** Για το κινητό WiMAX, η πιο σημαντική πρόκληση προέρχεται από τις τεχνολογίες 3G που αναπτύσσουν παγκοσμίως οι εταιρίες κινητής τηλεφωνίας. Οι περισσότερες από αυτές τις εταιρίες είναι πιθανότερο να βελτιώσουν την απόδοσή τους μέσω της εξέλιξης του 3G (επόμενο στάδιο είναι το 4G) παρά να υιοθετήσουν τη τεχνολογία WiMAX, εξαιτίας του χαμηλότερου κόστους από το να μεταβούν σε μία νέα τεχνολογία. Οι νέες, λοιπόν, εταιρίες που εισέρχονται στην αγορά της κινητής ευρυζωνικότητας και που θα υποστηρίζουν το WiMAX, θα βρεθούν αντιμέτωπες με τις εταιρίες 3G και θα πρέπει να βρουν τρόπους να ανταγωνιστούν το 3G και να προσελκύσουν χρήστες από αυτό. Θα πρέπει να αναπτύξουν καινοτόμες εφαρμογές και επιχειρηματικά μοντέλα ώστε να διεκδικήσουν το δικό τους μερίδιο στην αγορά της ασύρματης ευρυζωνικότητας και να ξεπεράσουν τις εταιρίες που στηρίζονται στο 3G.

**Ανάπτυξη συσκευών:** Προκειμένου να επιτύχει το κινητό WiMAX, θα πρέπει να υπάρχει μεγάλη ποικιλία τερματικών συσκευών. Τα ενσωματωμένα τσιπ που θα υποστηρίζουν το WiMAX σε υπολογιστές και ειδικά φορητούς αλλά και σε έξυπνα τηλέφωνα είναι ένα καλό πρώτο βήμα αλλά ίσως όχι επαρκές. Το WiMAX θα πρέπει να διαφοροποιηθεί από το 3G προσεγγίζοντας την αγορά με καινοτόμες συσκευές. Θα μπορούσε, λοιπόν, να ενσωματωθεί σε συσκευές που παίζουν μουσική για πρόσβαση στο διαδίκτυο και ανταλλαγή μουσικών αρχείων (MP3 players), σε συσκευές που παίζουν βίντεο (video players), σε PC χειρός αλλά και σε tablets. Επιπλέον, η ανάπτυξη συσκευών που θα υποστηρίζουν το WiMAX θα πρέπει να περιλαμβάνει και συσκευές πολλαπλών καταστάσεων λειτουργίας λόγω του ότι είναι πιθανό να υλοποιηθούν διάφορα ευρυζωνικά συστήματα. Επομένως, είναι απαραίτητο να συνεργάζονται μεταξύ τους τα διάφορα δίκτυα έτσι ώστε η ατομική ευρυζωνική πρόσβαση να γίνει πραγματικότητα σε οποιοδήποτε σημείο του κόσμου. Η διασφάλιση, λοιπόν, ότι η ανάπτυξη συσκευών θα ακολουθεί την ανάπτυξη και υλοποίηση των δικτύων τεχνολογίας WiMAX θα αποτελέσει ακόμα μία πρόκληση για την παγκόσμια βιομηχανία.

## Κεφάλαιο 2. Επισκόπηση της τεχνολογίας WiMAX

Ύστερα από αρκετά χρόνια ανάπτυξης και αβεβαιότητας, μία νέα και διαλειτουργική λύση, η οποία βασίζεται σε πρότυπα, κάνει την εμφάνισή της για την ασύρματη ευρυζωνική δικτύωση. Το WiMAX Forum (Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Μικροκυματική Πρόσβαση) έχει ξεκινήσει την πιστοποίηση ασύρματων ευρυζωνικών προϊόντων προκειμένου τα τελευταία να είναι διαλειτουργικά και να συμμορφώνονται με ένα κοινό πρότυπο. Η τεχνολογία WiMAX, λοιπόν, βασίζεται σε πρότυπα ασύρματης μητροπολιτικής δικτύωσης (Wireless Metropolitan Area Networking - WMAN), τα οποία αναπτύχθηκαν από την ομάδα IEEE 802.16 και υιοθετήθηκαν από την IEEE και το ETSI HIPERMAN γκρουπ. Στο κεφάλαιο αυτό, λοιπόν, παρουσιάζεται μία περιεκτική επισκόπηση της τεχνολογίας WiMAX για την ασύρματη ευρυζωνική δικτύωση.

Αρχικά συνοψίζονται οι δραστηριότητες της ομάδας IEEE 802.16 και η σχέση της με το WiMAX. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα κύρια γνωρίσματα της τεχνολογίας αυτής και περιγράφονται εν συντομία τα χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου MAC του WiMAX. Τέλος, γίνεται μία αναφορά σε θέματα υπηρεσιών, όπως είναι η ποιότητα υπηρεσιών, η ασφάλεια και η κινητικότητα.

### 2.1. Θεωρητικό υπόβαθρο των IEEE 802.16 και WiMAX

Η ομάδα IEEE 802.16 σχηματίστηκε το 1998 για να αναπτύξει ένα πρότυπο για την μετάδοση δεδομένων μέσω του αέρα για την ασύρματη ευρυζωνική δικτύωση. Η ομάδα εστίασε αρχικά στην ανάπτυξη ενός ασύρματου ευρυζωνικού συστήματος το οποίο θα βασίζεται στην τεχνολογία οπτικής επαφής (LOS) και θα παρέχει μετάδοση ενός σημείου προς πολλαπλά σημεία, στη ζώνη συχνοτήτων 10GHz – 66GHz χιλιοστών. Το τελικό πρότυπο (το αυθεντικό ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2001) βασίστηκε σε ένα φυσικό επίπεδο (PHY) μονού φορέα με ένα επίπεδο MAC που χρησιμοποιεί πολυπλεξία διαίρεσης χρόνου (TDM) και μετάδοση κατά ριπές. Πολλές από τις έννοιες που σχετίζονται με το επίπεδο MAC και την ασύρματη μετάδοση προήλθαν από το δημοφιλές πρότυπο καλωδιακού μόντεμ DOCSIS (προδιαγραφή διασύνδεσης για μετάδοση δεδομένων μέσω καλωδίου).

Στη συνέχεια, το γκρουπ IEEE 802.16 παρουσίασε το πρότυπο 802.16a το οποίο αποτελούσε μία τροποποίηση του προηγούμενου προτύπου ώστε να συμπεριλάβει εφαρμογές χωρίς οπτική επαφή (NLOS) στη ζώνη 2GHz – 11GHz, χρησιμοποιώντας ένα φυσικό επίπεδο που βασίζεται σε *ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας* (OFDM). Επιπλέον, προστέθηκε

στο επίπεδο MAC υποστήριξη για την *ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας* (OFDMA). Ακολούθησαν και άλλες μετέπειτα αναθεωρήσεις του προτύπου αυτού και έτσι καταλήξαμε σε ένα νέο πρότυπο το 2004, το οποίο ονομάστηκε IEEE 802.16-2004 και το οποίο αντικατέστησε όλες τις προηγούμενες εκδόσεις αποτελώντας τη βάση για την πρώτη λύση WiMAX. Οι πρώτες αυτές λύσεις της τεχνολογίας WiMAX βασίζονταν σε σταθερές εφαρμογές του προτύπου IEEE 802.16-2004, το οποίο είναι γνωστό και ως σταθερό WiMAX [10]. Τον Δεκέμβριο του 2005, η IEEE ολοκλήρωσε και ενέκρινε το πρότυπο IEEE 802.16e-2005, το οποίο είναι μια τροποποίηση του προηγούμενου προτύπου 802.16-2004 και περιλαμβάνει υποστήριξη στον τομέα της κινητικότητας. Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 αποτελεί τη βάση του WiMAX για κινητές και νομαδικές εφαρμογές και συχνά αναφέρεται ως κινητό WiMAX [11].

	<b>802.16</b>	<b>802.16-2004</b>	<b>802.16e-2005</b>
Κατάσταση	Ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2001	Ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2004	Ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβριο του 2005
Ζώνη συχνοτήτων	10GHz – 66GHz	2GHz – 11GHz	2GHz – 11GHz για σταθερές και 2GHz – 6GHz για κινητές εφαρμογές
Εφαρμογή	Σταθερή οπτική επαφή (LOS)	Σταθερή μη οπτική επαφή (NLOS)	Σταθερή και κινητή μη οπτική επαφή (NLOS)
Αρχιτεκτονική MAC	Σημείο προς πολλαπλά σημεία, πλέγμα	Σημείο προς πολλαπλά σημεία, πλέγμα	Σημείο προς πολλαπλά σημεία, πλέγμα
Σύστημα μετάδοσης	Μονού φορέα μόνο	Μονού φορέα, 256 OFDM ή 2048 OFDM	Μονού φορέα, 256 OFDM ή κλιμακούμενο OFDM με 128, 512, 1024 ή 2048 υποφορείς
Διαμόρφωση	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Μεικτός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	32Mbps – 134.4Mbps	1Mbps – 75Mbps	1Mbps – 75Mbps
Πολυπλεξία	TDM/TDMA κατά ριπές	TDM/TDMA/OFDMA κατά ριπές	TDM/TDMA/OFDMA κατά ριπές
Αμφιδρόμηση	TDD και FDD	TDD και FDD	TDD και FDD
Εύρος ζώνης καναλιών	20MHz, 25MHz, 28MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz	1.75MHz, 3.5MHz, 7MHz, 14MHz, 1.25MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 8.75MHz
Τύπος ασύρματης μετάδοσης	Wireless MAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM

		WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN	WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN
Υλοποίηση WiMAX	Καμία	256 – OFDM ως σταθερό WiMAX	Κλιμακούμενο OFDMA ως κινητό WiMAX

**Πίνακας 2:** Βασικά χαρακτηριστικά για τα πρότυπα IEEE 802.16

Τα διάφορα χαρακτηριστικά των προτύπων IEEE 802.16 παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα 2. Τα πρότυπα αυτά προσφέρουν αρκετές διαφορετικές επιλογές σχεδίασης. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλαπλές επιλογές φυσικού επιπέδου: ένα φυσικό επίπεδο μονού φορέα που ονομάζεται Wireless MAN-SCa, ένα φυσικό επίπεδο που βασίζεται στην ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (OFDM) και ονομάζεται Wireless MAN-OFDM και ένα φυσικό επίπεδο που βασίζεται στην ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA) και ονομάζεται WirelessMAN-OFDMA. Επίσης, υπάρχουν αρκετές διαφορετικές επιλογές για την αρχιτεκτονική MAC, την αμφίδρομη επικοινωνία και για τη ζώνη συχνοτήτων λειτουργίας. Τα πρότυπα αυτά αναπτύχθηκαν για να ικανοποιήσουν διάφορες ανάγκες και σενάρια υλοποίησης και προσέφεραν πληθώρα επιλογών σχεδίασης στους προγραμματιστές συστημάτων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.16 καθορίζονται τέσσερις διαφορετικές υλοποιήσεις του φυσικού στρώματος [10], [11] που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, ανάλογα με τη διαθέσιμη ζώνη συχνοτήτων και το σκοπό χρήσης του δικτύου. Οι υλοποιήσεις αυτές είναι:

- **WirelessMAN SC:** χρησιμοποιεί τεχνολογία μονής φέρουσας, για συχνότητες στη ζώνη 10-66GHz και απαιτεί την ύπαρξη οπτικής επαφής (LOS) μεταξύ πομπού και δέκτη. Χαρακτηρίζεται από ευπάθεια σε φαινόμενα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Επιπλέον, έχει χαρακτηριστικά προσαρμοστικότητας στις συνθήκες του διαύλου, αφού η μέθοδος διαμόρφωσης και η μέθοδος κωδικοποίησης ανανεώνονται σε κάθε πλαίσιο που εκπέμπεται. Οι μέθοδοι διαμόρφωσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην άνω και την κάτω ζεύξη είναι QPSK, 16-QAM και -προαιρετικά- 64-QAM. Η μέθοδος αμφιδρόμησης μπορεί να είναι είτε TDD είτε FDD. Το πρότυπο προβλέπει επίσης την εφαρμογή τεχνικών ελέγχου ισχύος στην άνω ζεύξη, αλλά δεν καθορίζει τεχνικές λεπτομέρειες για την υλοποίησή τους.
- **WirelessMAN SCa:** είναι υλοποίηση παρόμοια με την WirelessMAN SC. Χρησιμοποιεί και αυτή διαμόρφωση μονής φέρουσας συχνότητας και υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία μέσω FDD και TDD. Η κύρια διαφορά εντοπίζεται στο γεγονός ότι η WirelessMAN SCa είναι σχεδιασμένη για λειτουργία σε συχνότητες χαμηλότερες των

11GHz, χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη. Το πρόβλημα που δημιουργείται από την ύπαρξη φαινομένων διάδοσης πολλαπλών διαδρομών αντιμετωπίζεται με κατάλληλες τεχνικές εκτίμησης διαύλου και ισοστάθμισης. Και εδώ οι μέθοδοι διαμόρφωσης και κωδικοποίησης μπορούν να μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες του διαύλου. Όμως οι πιθανές επιλογές για τη μέθοδο διαμόρφωσης είναι περισσότερες, αφού περιλαμβάνεται η ιδιαίτερα ανθεκτική διαμόρφωση BPSK, αλλά και προαιρετικά η διαμόρφωση 256-QAM, που έχει πολύ καλή φασματική απόδοση, αλλά περιλαμβάνει και αρκετά μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος από την BPSK. Επιπλέον, η υλοποίηση αυτή υποστηρίζει διαφορική εκπομπή με χωρο-χρονική κωδικοποίηση (Space-Time Coding Transmit Diversity), χρήση προσαρμοστικών κεραιών (adaptive antennas) και συνελκτική κωδικοποίηση turbo.

- **WirelessMAN OFDM:** Οι συχνότητες κάτω από τα 11GHz προσφέρουν πολύ καλύτερη κάλυψη τόσο σε εξωτερικούς, όσο και σε εσωτερικούς χώρους. Ωστόσο, σε αστικές περιοχές ή γενικότερα σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS) και όπου υπάρχει διάδοση πολλαπλών διαδρομών, η επιλεκτική συμπεριφορά του διαύλου περιορίζει σημαντικά την επίδοση ενός συστήματος. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών χρησιμοποιήθηκε η τεχνολογία OFDM που ενδείκνυται για τη μετάδοση δεδομένων υψηλού ρυθμού σε διαύλους με διάδοση πολλαπλών διαδρομών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ένα σύστημα OFDM με 256 φέροντα, από τα οποία τα 56 αντιστοιχούν σε φασματικά διαστήματα προστασίας, ενώ τα υπόλοιπα 200 χρησιμοποιούνται είτε για τη μετάδοση δεδομένων είτε για σύμβολα-πλότους. Και σε αυτή την υλοποίηση του φυσικού στρώματος η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται μπορεί να μεταβάλλεται από BPSK σε QPSK ή 16-QAM. Η υποστήριξη 64-QAM είναι προαιρετική και αφορά ζώνες συχνοτήτων εκτός αδειοδότησης. Η τεχνική FEC (Forward Error Correction) είναι αλυσιδωτή συνελκτική κωδικοποίηση και κωδικοποίηση Reed-Solomon, ενώ προαιρετικά μπορεί να εφαρμόζονται τεχνικές κωδικοποίησης turbo. Η αμφίδρομη επικοινωνία υλοποιείται μέσω TDD σε ζώνες συχνοτήτων εκτός αδειοδότησης, ενώ σε αδειοδοτημένες ζώνες μπορεί να είναι και FDD. Στην κάτω ζεύξη μπορεί προαιρετικά να εφαρμόζεται διαφορική εκπομπή με χωρο-χρονική κωδικοποίηση Alamouti. Επίσης, υποστηρίζονται κι εδώ οι τεχνικές τυχαίοποίησης δεδομένων, διεμπλοκής και συγχρονισμού. Αυτή η υλοποίηση φυσικού στρώματος προδιαγράφεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004 [10] και υιοθετήθηκε από το WiMAX για συστήματα σταθερής πρόσβασης (fixed WiMAX).
- **WirelessMAN OFDMA:** Είναι άλλη μια υλοποίηση που ενδείκνυται για χρήση σε συχνότητες χαμηλότερες των 11GHz, σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS) και υπό την παρουσία διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Εδώ χρησιμοποιείται η τεχνική OFDMA, με 2048 φέροντα. Από τα 2048 φέροντα του συστήματος χρησιμοποιούνται τα 1681 (για δεδομένα ή σύμβολα-πλότους). Η υλοποίηση χαρακτηρίζεται κλιμακούμενη (scalable), αφού το πλήθος των φερόντων που ανατίθεται σε κάθε κινητό σταθμό δεν

είναι σταθερό, αλλά μπορεί να διαφέρει ως εξής: τα φέροντα ομαδοποιούνται ανά 48 και σχηματίζουν ένα OFDMA υπο-κανάλι. Σε κάθε χρήστη μπορούν να ανατίθενται ένα ή περισσότερα υπο-κανάλια, με αντίστοιχη μεταβολή του συνολικού ρυθμού μετάδοσης και της εκπεμπόμενης ισχύος. Έτσι, ο κάθε χρήστης χρησιμοποιεί σύστημα OFDM με τουλάχιστον 48 φέροντα. Η αμφίδρομη επικοινωνία υλοποιείται μέσω TDD σε ζώνες συχνοτήτων εκτός αδειοδότησης, ενώ σε αδειοδοτημένες ζώνες μπορεί να είναι και FDD. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιείται μπορεί να μεταβάλλεται από QPSK σε 16-QAM ή 64-QAM, ενώ η τεχνική FEC είναι αλυσιδωτή συνελικτική κωδικοποίηση και κωδικοποίηση Reed-Solomon ή προαιρετικά μπορεί να εφαρμόζονται τεχνικές κωδικοποίησης turbo. Τέλος, η υλοποίηση WirelessMAN OFDMA υποστηρίζει τεχνικές διαφορικής εκπομπής με κωδικοποίηση Alamouti, τεχνικές MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output) και H-ARQ (Hybrid Automatic Retransmission Request – Υβριδικές Τεχνικές Αυτόματης Αίτησης Επανεκπομπής). Η υλοποίηση περιγράφεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2005 [11] και υιοθετήθηκε από το WiMAX για συστήματα πρόσβασης από κινητούς ή φορητούς δέκτες (mobile WiMAX).

Επιπλέον, για λειτουργία σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων, υπάρχει η προδιαγραφή WirelessHUMAN (Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Network). Το στρώμα PHY μπορεί να είναι WirelessMAN SCA, WirelessMAN OFDM ή WirelessMAN OFDMA και το εύρος ζώνης μπορεί να είναι 10 ή 20MHz.

Για πρακτικούς λόγους που αφορούν την διαλειτουργικότητα του WiMAX, η εμβέλεια του προτύπου πρέπει να μειωθεί και πρέπει να καθοριστεί ένα μικρότερο σύνολο επιλογών σχεδίασης για την υλοποίησή του. Το WiMAX Forum το πέτυχε αυτό ορίζοντας έναν περιορισμένο αριθμό εκδόσεων συστήματος και εκδόσεων πιστοποίησης. Μία *έκδοση συστήματος* ορίζει το υποσύνολο των υποχρεωτικών και προαιρετικών χαρακτηριστικών του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου MAC και τα οποία επιλέχθηκαν από το WiMAX Forum από το πρότυπο IEEE 802.16-2004 ή IEEE 802.16e-2005. Αξίζει να σημειωθεί ότι η υποχρεωτική και η προαιρετική κατάσταση ενός συγκεκριμένου χαρακτηριστικού μέσα σε ένα προφίλ συστήματος WiMAX μπορεί να διαφοροποιείται από το αρχικό που υπάρχει στο πρότυπο IEEE. Το WiMAX Forum έχει δύο διαφορετικές εκδόσεις συστήματος: η έκδοση OFDM PHY που βασίζεται στο IEEE 802.16-2004 και ονομάζεται σταθερή έκδοση συστήματος και η έκδοση που αναφέρεται στο κλιμακούμενο OFDMA PHY, βασίζεται στο IEEE 802.16e-2005 και ονομάζεται κινητή έκδοση συστήματος. Μία *έκδοση πιστοποίησης* ορίζεται ως ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο μίας έκδοσης συστήματος όπου η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος ζώνης καναλιού και η διπλεξία επίσης καθορίζονται. Ο εξοπλισμός του WiMAX, λοιπόν, πιστοποιείται για διαλειτουργικότητα με βάση ένα συγκεκριμένο προφίλ πιστοποίησης.

Το WiMAX Forum έχει καθορίσει ως τώρα πέντε σταθερές εκδόσεις πιστοποίησης και δεκατέσσερις κινητές εκδόσεις πιστοποίησης. Σήμερα υπάρχουν δύο σταθερά προφίλ WiMAX βάσει των οποίων πιστοποιείται ο εξοπλισμός. Τα συστήματα αυτά των 3.5GHz λειτουργούν σε ένα κανάλι 3.5MHz, χρησιμοποιώντας τη σταθερή έκδοση συστήματος που βασίζεται στο φυσικό επίπεδο IEEE 802.16-2004 OFDM με ένα επίπεδο MAC με μετάδοση σημείου προς

πολλαπλά σημεία. Το ένα προφίλ χρησιμοποιεί διπλεξία με διαίρεση συχνότητας (FDD) και το άλλο χρησιμοποιεί διπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDD).

Με την ολοκλήρωση του προτύπου IEEE 802.16e-2005, το ενδιαφέρον της ομάδας WiMAX στράφηκε στην ανάπτυξη και πιστοποίηση των εκδόσεων κινητού συστήματος WiMAX που θα βασίζονταν στο νέο αυτό πρότυπο. Όλες οι εκδόσεις του κινητού συστήματος WiMAX χρησιμοποιούν κλιμακούμενη ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA) για το φυσικό επίπεδο. Στην αρχή, όλες οι εκδόσεις κινητικότητας θα χρησιμοποιούν αρχιτεκτονική MAC σημείου προς πολλαπλά σημεία. Επιπλέον, την τρέχουσα χρονική περίοδο όλες οι υποψήφιες εκδόσεις πιστοποίησης κινητικότητας βασίζονται στη τεχνολογία αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD). Αν και η βιομηχανία συχνά προτιμάει τη τεχνολογία TDD, στο μέλλον οι εκδόσεις που βασίζονται στη τεχνολογία αμφίδρομης διαίρεσης συχνότητας (FDD) ίσως είναι απαραίτητες προκειμένου το κινητό WiMAX να συμμορφωθεί με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις σε κάποιες ζώνες.

## 2.2. Κύρια χαρακτηριστικά του WiMAX

Το WiMAX αποτελεί μία λύση ασύρματης ευρυζωνικής δικτύωσης η οποία προσφέρει ένα πλούσιο σύνολο χαρακτηριστικών όσον αφορά τις επιλογές ανάπτυξης και τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Τα βασικότερα, λοιπόν, χαρακτηριστικά του WiMAX είναι τα εξής:

**Φυσικό OFDM επίπεδο:** Το φυσικό επίπεδο του WiMAX (PHY) βασίζεται σε ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας, ένα σύστημα που προσφέρει καλή ανοχή στις πολλαπλές διαδρομές και δίνει τη δυνατότητα στο WiMAX να λειτουργεί σε συνθήκες μη οπτικής επαφής (NLOS). Το OFDM αναγνωρίζεται ευρέως ως η πλέον κατάλληλη λύση στο πρόβλημα των πολλαπλών διαδρομών στην ασύρματη ευρυζωνική δικτύωση.

**Υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων:** Η τεχνολογία WiMAX μπορεί να υποστηρίξει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Στην πράξη, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στο φυσικό επίπεδο (PHY) μπορεί να φτάσει τα 74Mbps όταν λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα των 20MHz. Συνήθως, χρησιμοποιώντας ένα φάσμα 10MHz σε σύστημα αμφίδρομης διαίρεσης χρόνου (TDD) με αναλογία λήψης/αποστολής 3:1, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης στο φυσικό επίπεδο προσεγγίζει τα 25Mbps και 6.7Mbps για τη λήψη και την αποστολή δεδομένων, αντίστοιχα. Οι μέγιστοι αυτοί ρυθμοί μετάδοσης επιτυγχάνονται όταν χρησιμοποιείται διαμόρφωση 64 QAM με ρυθμό κωδικοποίησης και διόρθωσης λαθών 5/6. Όταν οι συνθήκες μετάδοσης σήματος είναι πολύ καλές, μπορούν να επιτευχθούν ακόμα υψηλότεροι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιώντας πολλαπλές κεραίες (multiple antennas) και χωρική πολύπλεξη (spatial multiplexing).

**Κλιμακούμενο εύρος ζώνης και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων:** Το WiMAX υποστηρίζει μία κλιμακούμενη αρχιτεκτονική φυσικού επιπέδου, με αποτέλεσμα ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων να κλιμακώνεται εύκολα, ανάλογα βέβαια και με το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Η κλιμάκωση αυτή υποστηρίζεται στην κατάσταση λειτουργίας OFDMA, όπου το μέγεθος του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) μπορεί να κλιμακωθεί με βάση το διαθέσιμο εύρος ζώνης του καναλιού. Για παράδειγμα, ένα σύστημα WiMAX μπορεί να χρησιμοποιεί μεγέθη γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) 128, 512 ή 1024 bits και αντίστοιχα το εύρος ζώνης του καναλιού να είναι 1.25MHz, 5MHz ή 10MHz. Η κλιμάκωση αυτή μπορεί να γίνεται δυναμικά, δίνοντας με αυτό τον τρόπο τη δυνατότητα περιαγωγής στο χρήστη σε διαφορετικά δίκτυα τα οποία μπορεί να έχουν διαφορετικές εκχωρήσεις εύρους ζώνης.

**Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση (Adaptive Modulation and Coding - AMC):** Η τεχνολογία WiMAX υποστηρίζει αρκετά συστήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης εμπροσθόδοτης διόρθωσης λαθών (Forward Error Correction – FEC) και επιτρέπει την αλλαγή του συστήματος ανά χρήστη (user) και ανά πλαίσιο (frame), ανάλογα βέβαια και με τις συνθήκες καναλιού. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση είναι ένας αποτελεσματικός μηχανισμός που μεγιστοποιεί την απόδοση σε ένα κανάλι μεταβλητού χρόνου. Ο προσαρμοστικός αλγόριθμος συνήθως επιλέγει το καλύτερο σύστημα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που μπορεί να υποστηριχθεί από την αναλογία σήματος προς θόρυβο και παρεμβολής στον δέκτη, προκειμένου ο κάθε χρήστης να λαμβάνει τον υψηλότερο δυνατό ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να υποστηρίξει η σύνδεσή του.

**Αναμεταδόσεις στο επίπεδο ζεύξης:** Για συνδέσεις που απαιτούν αυξημένη αξιοπιστία, το WiMAX υποστηρίζει αιτήσεις αυτόματης αναμετάδοσης (Automatic Retransmission Requests – ARQ) στο επίπεδο ζεύξης. Οι συνδέσεις που υποστηρίζουν το ARQ απαιτούν από κάθε παραλήπτη να επιβεβαιώνει το κάθε πακέτο που λαμβάνει, ενώ τα πακέτα που δεν επιβεβαιώνονται θεωρούνται χαμένα και μεταδίδονται ξανά. Επιπλέον, το WiMAX υποστηρίζει προαιρετικά και το υβριδικό ARQ, το οποίο είναι ένας αποτελεσματικός συνδυασμός της εμπροσθόδοτης διόρθωσης λαθών (FEC) και της αυτόματης αναμετάδοσης αιτήσεων (ARQ).

**Υποστήριξη TDD και FDD:** Τα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005 υποστηρίζουν διπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDD) και διπλεξία με διαίρεση συχνότητας (FDD), καθώς και ημιαμφίδρομο FDD, το οποίο επιτρέπει την υλοποίηση ενός συστήματος χαμηλού κόστους. Το TDD προτιμάται από την πλειοψηφία των υλοποιήσεων λόγω των πλεονεκτημάτων που έχει: α) ευελιξία στην επιλογή αναλογίας λήψης/αποστολής του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, β) ικανότητα εκμετάλλευσης της ανταποδοτικότητας (reciprocity) καναλιών, γ) ικανότητα υλοποίησης σε απλό φάσμα και δ) λιγότερο σύνθετη σχεδίαση πομπού. Όλες οι αρχικές εκδόσεις του WiMAX βασίζονται στη διπλεξία με διαίρεση χρόνου (TDD), εκτός από δύο εκδόσεις σταθερού WiMAX στα 3.5GHz.

**Ορθογωνική πολλαπλή πρόσβαση με διαίρεση συχνότητας (OFDMA):** Το κινητό WiMAX χρησιμοποιεί το OFDM ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης, δηλαδή διαφορετικοί χρήστες



μπορούν να κατανέμονται σε διαφορετικά υποσύνολα των OFDM τόνων. Το OFDMA διευκολύνει την αξιοποίηση των διαφόρων συχνοτήτων και της ποικιλότητας πολλαπλών χρηστών, βελτιώνοντας έτσι τη χωρητικότητα του συστήματος.

**Ευέλικτη και δυναμική ανά χρήστη κατανομή πόρων:** Η κατανομή πόρων για την λήψη και αποστολή δεδομένων ελέγχεται από έναν χρονοπρογραμματιστή (scheduler) που βρίσκεται στο σταθμό βάσης. Η χωρητικότητα κατανέμεται ανάμεσα στους διαφορετικούς χρήστες ανάλογα με τη ζήτηση, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα κατανομής χρόνου (TDM) κατά ριπές. Όταν χρησιμοποιείται η λειτουργία OFDMA-PHY, η πολύπλεξη γίνεται επιπλέον στη διάσταση της συχνότητας, κατανέμοντας διαφορετικά υποσύνολα των OFDM υποφορέων σε διαφορετικούς χρήστες. Οι πόροι μπορεί να κατανέμονται στο χωρικό τομέα (spatial domain), καθώς και να χρησιμοποιούν προαιρετικά προηγμένα συστήματα κεραιών (Advanced Antenna Systems - AAS). Το πρότυπο επιτρέπει την κατανομή εύρου ζώνης με βάση το χρόνο, τη συχνότητα και το χώρο, διαθέτοντας έναν ευέλικτο μηχανισμό ο οποίος μεταφέρει ανά πλαίσιο (frame-by-frame) τις πληροφορίες κατανομής πόρων.

**Υποστήριξη προηγμένων τεχνικών κεραιών:** Η τεχνολογία WiMAX και η σχεδίαση του φυσικού επιπέδου επιτρέπουν τη χρήση τεχνικών πολλαπλών κεραιών, όπως διαμόρφωση δέσμης ραδιοσήματος (beamforming), κωδικοποίηση χώρου-χρόνου και χωρική πολυπλεξία. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βελτιώσουν τη συνολική χωρητικότητα και φασματική απόδοση του συστήματος, τοποθετώντας πολλαπλές κεραιές στον πομπό και στον δέκτη.

**Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service – QoS):** Το επίπεδο MAC του WiMAX έχει μία αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στη σύνδεση, η οποία υποστηρίζει διάφορες εφαρμογές, όπως υπηρεσίες φωνής και πολυμέσων. Το σύστημα υποστηρίζει σταθερό (constant) και μεταβλητό (variable) ρυθμό μετάδοσης (bit rate), μετάδοση σε πραγματικό (real) και μη-πραγματικό (non-real) χρόνο, εκτός από μετάδοση δεδομένων βέλτιστης προσπάθειας (best-effort). Το επίπεδο MAC σχεδιάστηκε έτσι ώστε να υποστηρίζει μεγάλο αριθμό χρηστών, με πολλαπλές συνδέσεις ανά τερματικό, όπου κάθε χρήστης έχει τις δικές του απαιτήσεις όσον αφορά την ποιότητα υπηρεσιών.

**Ενισχυμένη ασφάλεια (Robust security):** Το WiMAX υποστηρίζει ισχυρή κρυπτογράφηση καθώς και χρησιμοποιεί το Προηγμένο Πρότυπο Κρυπτογράφησης (Advanced Encryption Standard – AES) και διαθέτει ένα ενισχυμένο πρωτόκολλο ιδιωτικότητας και διαχείρισης κλειδιού. Επιπλέον, το σύστημα προσφέρει μία ευέλικτη αρχιτεκτονική αυθεντικοποίησης που βασίζεται στο Πρωτόκολλο Εκτεταμένης Αυθεντικοποίησης (Extensible Authentication Protocol –EAP), το οποίο επιτρέπει τη δήλωση διαφόρων στοιχείων διαπίστευσης για τους χρήστες, όπως όνομα χρήστη, κωδικό πρόσβασης, ψηφιακά πιστοποιητικά και έξυπνες κάρτες.

**Υποστήριξη κινητικότητας:** Το κινητό WiMAX έχει μηχανισμούς που υποστηρίζουν ασφαλείς και απρόσκοπτες μεταπομπές για εφαρμογές πλήρους κινητικότητας με ανοχή στις καθυστερήσεις, όπως είναι το VoIP (Voice over IP). Το σύστημα έχει επίσης ενσωματωμένη

υποστήριξη για μηχανισμούς εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίοι επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής των μπαταριών των φορητών συσκευών που διαθέτουν οι συνδρομητές. Οι βελτιώσεις στο φυσικό επίπεδο, όπως η πιο συχνή «εκτίμηση» (estimation) του καναλιού, η διαίρεση σε υπο-κανάλια της σύνδεσης αποστολής δεδομένων και ο έλεγχος της ισχύος επίσης καθορίζονται στην υποστήριξη των κινητών εφαρμογών.

**Αρχιτεκτονική βασισμένη στο IP:** Το WiMAX Forum έχει ορίσει μία αρχιτεκτονική δικτύου που βασίζεται σε μία πλατφόρμα IP. Όλες οι από άκρο σε άκρο (end-to-end) υπηρεσίες παραδίδονται μέσω μίας αρχιτεκτονικής IP που βασίζεται σε πρωτόκολλα IP για μετάδοση από το ένα άκρο στο άλλο, ποιότητα υπηρεσιών (QoS), διαχείριση μονάδων, ασφάλεια και κινητικότητα. Το WiMAX επειδή βασίζεται στο IP μπορεί και παρακάμπτει τις μειωμένες καμπύλες κόστους (costcurves) της επεξεργασίας IP, διευκολύνει την εύκολη σύγκλιση με άλλα δίκτυα και εκμεταλλεύεται το πλούσιο οικοσύστημα για ανάπτυξη εφαρμογών που διατίθενται για το IP.

### 2.3. Φυσικό επίπεδο του WiMAX

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX βασίζεται στην ορθογωνική πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας (OFDM). Το OFDM αποτελεί το σύστημα μετάδοσης που προτιμάει το σύνολο της σύγχρονης βιομηχανίας και χρησιμοποιείται για επικοινωνίες δεδομένων, βίντεο και πολυμέσων σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον, πέρα από το WiMAX, χρησιμοποιείται και σε πολλά εμπορικά ευρυζωνικά συστήματα, όπως το DSL, το Wi-Fi και οι φορητές συσκευές με δυνατότητα μετάδοσης ψηφιακού βίντεο (DVB-H) και MediaFLO. Το OFDM είναι ένα ικανό και σωστά σχεδιασμένο σύστημα για μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες, σε περιβάλλον χωρίς οπτική επαφή ή με πολλαπλές διαδρομές. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία αναφορά στη βασική θεωρία της τεχνολογίας OFDM και παρατίθεται μία επισκόπηση του φυσικού επιπέδου του WiMAX.

#### 2.3.1. Βασικά στοιχεία του OFDM

Το OFDM ανήκει σε ένα σύνολο συστημάτων μετάδοσης που ονομάζεται *διαμόρφωση πολλαπλού φορέα*. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στην ιδέα του να διαιρεθεί μία συγκεκριμένη ροή δεδομένων (stream) με υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε αρκετές παράλληλες ροές δεδομένων με μικρότερο ρυθμό και στην διαμόρφωση κάθε ροής σε ξεχωριστούς φορείς, οι οποίοι ονομάζονται υποφορείς (subcarriers) ή τόνοι (tones). Η διαμόρφωση πολλαπλού φορέα

εξαλείφει ή ελαχιστοποιεί την διασυμβολική παρεμβολή (intersymbol interference – ISI), μεγαλώνοντας το χρόνο συμβόλου έτσι ώστε οι καθυστερήσεις που προκαλούν τα κανάλια να αποτελούν ένα αμελητέο κλάσμα (συνήθως <10%) της διάρκειας συμβόλου. Συνεπώς, σε συστήματα με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, στα οποία η διάρκεια συμβόλου είναι μικρή και αντιστρόφως ανάλογη με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ο διαχωρισμός της ροής δεδομένων σε πολλές παράλληλες ροές αυξάνει τη διάρκεια συμβόλου της κάθε ροής, έτσι ώστε η εξάπλωση της καθυστέρησης να είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα της διάρκειας συμβόλου.

Η τεχνολογία OFDM είναι μία αποτελεσματική φασματική έκδοση της διαμόρφωσης πολλαπλού φορέα, όπου οι υποφορείς επιλέγονται έτσι ώστε να είναι όλοι ορθογώνιοι μεταξύ τους κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου, αποφεύγοντας με αυτό τον τρόπο την ανάγκη για μη επικαλυπτόμενα κανάλια υποφορέων ώστε να εξαλείφεται η παρεμβολή μεταξύ των φορέων. Ο πρώτος υποφορέας επιλέγεται προκειμένου να έχει μία συχνότητα που του δίνει έναν ακέραιο αριθμό κύκλων σε μία περίοδο συμβόλου. Ο ορισμός της απόστασης μεταξύ παρακείμενων (adjacent) υποφορέων (εύρος ζώνης υποφορέα), με τύπο  $B_{sc}=B/L$ , όπου  $B$  το ονομαστικό εύρος ζώνης (ίσο με το ρυθμό μετάδοσης) και  $L$  ο αριθμός των υποφορέων, διασφαλίζει ότι όλοι οι τόνοι είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους στην περίοδο συμβόλου. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το σήμα OFDM, λαμβάνοντας  $L$  κάθε φορά, είναι ισοδύναμο με τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Inverse Discrete Fourier Transform - IDFT) του μπλοκ της ακολουθίας δεδομένων. Σαν αποτέλεσμα, είναι εύκολη η υλοποίηση πομπών και δεκτών OFDM σε διακριτό χρόνο χρησιμοποιώντας αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Inverse Fast Fourier Transform - IFFT) και γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform - FFT), αντίστοιχα.

Προκειμένου να εξαλειφθεί πλήρως η διασυμβολική παρεμβολή (ISI), χρησιμοποιούνται χρονικά διαστήματα φύλαξης μεταξύ των συμβόλων OFDM. Ορίζοντας το διάστημα φύλαξης μεγαλύτερο από την αναμενόμενη εξάπλωση καθυστέρησης λόγω πολλαπλών διαδρομών, η διασυμβολική παρεμβολή μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως. Παρόλα αυτά, η προσθήκη ενός χρονικού διαστήματος φύλαξης συνεπάγεται την απώλεια ισχύος και τη μείωση της αποδοτικότητας του εύρου ζώνης. Η ποσότητα της ισχύος που χάνεται εξαρτάται από το πόσο μεγάλο τμήμα της διάρκειας συμβόλου OFDM είναι ο χρόνος φύλαξης. Κατά συνέπεια, όσο μεγαλύτερη είναι η περίοδος συμβόλου -για δεδομένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, δηλαδή περισσότερους υποφορείς- τόσο μικρότερη είναι η απώλεια ενέργειας και η αποδοτικότητα του εύρου ζώνης.

Το μέγεθος του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT) σε μία σχεδίαση OFDM θα πρέπει να επιλεγεί προσεκτικά, ισορροπώντας μεταξύ της προστασίας ενάντια στις πολλαπλές διαδρομές, τη μετατόπιση Doppler και την αναλογία κόστους και πολυπλοκότητας της σχεδίασης. Για δεδομένο εύρος ζώνης, η επιλογή μεγάλου FFT θα μείωνε την απόσταση των υποφορέων και θα αύξανε το χρόνο συμβόλου. Σαν αποτέλεσμα, θα ήταν ευκολότερη η προστασία από την εξάπλωση καθυστέρησης πολλαπλών διαδρομών. Παρόλα αυτά, μικρότερη απόσταση μεταξύ υποφορέων κάνει το σύστημα πιο ευάλωτο σε παρεμβολή μεταξύ φορέων, η οποία οφείλεται στην εξάπλωση Doppler σε κινητές εφαρμογές. Οι ανταγωνιστικές επιδράσεις

της καθυστέρησης και της διασποράς Doppler σε ένα σχέδιο OFDM απαιτούν προσεκτική εξισορρόπηση.

### 2.3.2. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του OFDM

Η τεχνολογία OFDM διαθέτει αρκετά σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες λύσεις για μετάδοση δεδομένων με υψηλές ταχύτητες.

- **Μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα:** Το OFDM μπορεί να υλοποιηθεί εύκολα χρησιμοποιώντας γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) / αντίστροφο γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (IFFT) και οι απαιτήσεις επεξεργασίας μεγαλώνουν ελαφρώς γρηγορότερα από γραμμικά σε σχέση με το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ή το εύρος ζώνης. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα του OFDM μπορεί να αποδειχθεί ότι είναι  $O(B \log B T_m)$ , όπου  $B$  το εύρος ζώνης και  $T_m$  η εξάπλωση καθυστέρησης. Η πολυπλοκότητα αυτή είναι αρκετά μικρότερη από ένα βασικό σύστημα που βασίζεται σε ισοσταθμιστή και το οποίο έχει πολυπλοκότητα  $O(B^2 T_m)$ .
- **Ήπια υποβάθμιση της απόδοσης όταν υπάρχει υπερβολική καθυστέρηση:** Η απόδοση ενός συστήματος OFDM μειώνεται σταδιακά όταν η εξάπλωση καθυστέρησης υπερβαίνει τη τιμή για την οποία σχεδιάστηκε. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα μεγέθη κωδικοποίησης και μικρά μεγέθη αστερισμού (constellation) για να παρέχουν σημαντικά καλύτερους ρυθμούς εξασθένησης σε σχέση με την εξάπλωση καθυστέρησης. Η τεχνολογία OFDM, λοιπόν, «ταιριάζει» καλά στην προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση και έτσι το σύστημα μπορεί να εκμεταλλευτεί καλύτερα τις διαθέσιμες συνθήκες καναλιού. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με την απότομη υποβάθμιση λόγω της διασποράς σφαλμάτων η οποία παρουσιάζεται στα συστήματα μονού φορέα, όταν η εξάπλωση καθυστέρησης υπερβαίνει τη τιμή για την οποία σχεδιάστηκε ο ισοσταθμιστής.
- **Αξιοποίηση της ποικιλότητας συχνοτήτων:** Το OFDM διευκολύνει την κωδικοποίηση και την διαστρωμάτωση (interleaving) κατά μήκος υποφορέων στο πεδίο συχνοτήτων, παρέχοντας προστασία από σφάλματα ριπών που προκαλούνται από τμήματα του μεταδιδόμενου φάσματος, το οποίο υφίσταται μεγάλες εξασθενίσεις. Στην πραγματικότητα, το WiMAX ορίζει αντιμεταθέσεις υποφορέων που επιτρέπουν στα συστήματα να εκμεταλλευτούν το στοιχείο αυτό.
- **Χρήση ως σύστημα πολλαπλής πρόσβασης:** Η τεχνολογία OFDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα σύστημα πολλαπλής πρόσβασης, στο οποίο διαφορετικοί τόνοι χωρίζονται ανάμεσα σε πολλαπλούς χρήστες. Το σύστημα αυτό είναι γνωστό ως πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDMA) και

χρησιμοποιείται στο κινητό WiMAX. Προσφέρει επίσης και την δυνατότητα παροχής λεπτομερούς κατανομής καναλιών. Σε σχετικά αργά κανάλια μεταβλητού χρόνου, είναι δυνατή η σημαντική βελτίωση της χωρητικότητας, προσαρμόζοντας το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων ανά συνδρομητή σύμφωνα με την αναλογία σήματος προς θόρυβο του συγκεκριμένου αυτού υποφορέα.

- **Ανθεκτικό σε παρεμβολή περιορισμένου εύρους ζώνης:** Το OFDM είναι σχετικά ανθεκτικό απέναντι σε παρεμβολή περιορισμένου εύρους ζώνης, επειδή μία τέτοια παρεμβολή επηρεάζει μόνο ένα τμήμα των υποφορέων.
- **Κατάλληλο για συνεκτική αποδιαμόρφωση (coherent demodulation):** Είναι σχετικά εύκολο να γίνει εκτίμηση καναλιού στα συστήματα OFDM βάση ενός πιλοτικού συστήματος, καθιστώντας το έτσι κατάλληλο για συνεκτική αποδιαμόρφωση συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση ισχύος.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, οι τεχνικές OFDM αντιμετωπίζουν και αρκετές προκλήσεις. Καταρχάς, υπάρχει το πρόβλημα που σχετίζεται με το γεγονός ότι τα σήματα OFDM έχουν υψηλή αναλογία κορυφής με μέσο όρο (peak-to-average ratio), η οποία προκαλεί μη γραμμικότητα και παραμόρφωση πακέτων. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ανεπάρκειες ισχύος που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Επιπλέον, τα σήματα OFDM είναι πολύ ευάλωτα σε θόρυβο φάσης και σε διασπορά συχνότητας, και έτσι η σχεδίαση θα πρέπει να μετριάξει τις ατέλειες αυτές. Σαν αποτέλεσμα, είναι απαραίτητος ο συγχρονισμός των συχνοτήτων με ακρίβεια.

### 2.3.3. Παράμετροι OFDM στο WiMAX

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το σταθερό και το κινητό WiMAX έχουν ελαφρώς διαφορετικές υλοποιήσεις για το φυσικό επίπεδο OFDM. Το σταθερό WiMAX που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16-2004, χρησιμοποιεί το φυσικό επίπεδο OFDM που στηρίζεται στο 256 FFT (Fast Fourier Transform). Το κινητό WiMAX που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005, χρησιμοποιεί ένα φυσικό επίπεδο κλιμακούμενου OFDMA που τα μεγέθη FFT κυμαίνονται από 128 bits έως 2048 bits.

**Φυσικό επίπεδο OFDM σταθερού WiMAX:** Το μέγεθος FFT στο σταθερό WiMAX είναι αμετάβλητο και ίσο με 256, εκ των οποίων οι 192 υποφορείς χρησιμοποιούνται για μεταφορά δεδομένων, 8 χρησιμοποιούνται ως υποφορείς πιλότοι για εκτίμηση καναλιού και συγχρονισμό και οι υπόλοιποι χρησιμοποιούνται ως υποφορείς φύλαξης ζώνης. Λόγω του ότι το μέγεθος FFT είναι σταθερό, η απόσταση ανάμεσα στους υποφορείς διαφέρει ανάλογα με το εύρος ζώνης του καναλιού. Όταν χρησιμοποιούνται μεγαλύτερα εύρη ζώνης, η απόσταση μεταξύ των

υποφορέων μεγαλώνει και ο χρόνος συμβόλου μειώνεται. Όταν υπάρχει μείωση στο χρόνο συμβόλου σημαίνει ότι ένα μεγαλύτερο κομμάτι χρειάζεται να κατανεμηθεί ως χρόνος φύλαξης για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της εξάπλωσης καθυστέρησης. Το WiMAX επιτρέπει μεγάλο εύρος χρόνων φύλαξης, τα οποία με τη σειρά τους επιτρέπουν στους σχεδιαστές συστημάτων να κάνουν τους κατάλληλους συνδυασμούς μεταξύ φασματικής απόδοσης και ανθεκτικότητας (robustness) ενάντια στην εξάπλωση καθυστέρησης. Για μέγιστη προστασία από την εξάπλωση καθυστέρησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χρόνος φύλαξης το 25%, ένα ποσοστό το οποίο μπορεί να ανταπεξέλθει σε εξάπλωση καθυστέρησης έως και 16μs κατά τη λειτουργία σε ένα κανάλι 3.5MHz και έως 8μs κατά τη λειτουργία σε ένα κανάλι 7MHz. Σε σχετικά ήπια κανάλια πολλαπλών διαδρομών, η επιβάρυνση του χρόνου φύλαξης μπορεί να μειωθεί σε μόλις 3%.

**Φυσικό επίπεδο OFDMA κινητού WiMAX:** Το μέγεθος FFT στο κινητό WiMAX κλιμακώνεται από 128 έως 2048. Στη περίπτωση αυτή, όταν το διαθέσιμο εύρος ζώνης αυξάνεται, αυξάνεται με τη σειρά του και το μέγεθος FFT, έτσι ώστε η απόσταση ανάμεσα στους υποφορείς να είναι πάντα 10.94kHz. Σαν αποτέλεσμα, η διάρκεια συμβόλου OFDM (βασική μονάδα πόρου) παραμένει σταθερή και έτσι η κλιμάκωση έχει ελάχιστο αντίκτυπο στα υψηλότερα επίπεδα. Επιπλέον, μία κλιμακούμενη σχεδίαση διατηρεί το κόστος χαμηλό. Η απόσταση 10.94kHz μεταξύ των υποφορέων επιλέχθηκε ως καλή ισορροπία μεταξύ της ικανοποίησης των απαιτήσεων για εξάπλωση καθυστέρησης και διασποράς Doppler για λειτουργία σε σταθερά και κινητά περιβάλλοντα. Η απόσταση αυτή μεταξύ των υποφορέων μπορεί να υποστηρίξει τιμές εξάπλωσης καθυστέρησης έως 20μs και ταχύτητες κίνησης έως 125 χιλιόμετρα ανά ώρα, όταν λειτουργεί στα 3.5GHz. Όταν η απόσταση ανάμεσα στους υποφορείς είναι 10.94kHz, συνεπάγεται ότι χρησιμοποιούνται FFT μεγέθους 128, 512, 1024 και 2048 όταν, αντίστοιχα, το εύρος ζώνης καναλιού είναι 1.25MHz, 5MHz, 10MHz και 20MHz. Το WiMAX μπορεί, ωστόσο, να περιλαμβάνει επιπλέον προφίλ εύρους ζώνης. Για παράδειγμα, ένα προφίλ συμβατό με το WiBro θα χρησιμοποιεί εύρος ζώνης καναλιού 8.75MHz και μέγεθος FFT 1024. Αυτό προφανώς θα απαιτεί διαφορετική απόσταση μεταξύ των υποφορέων και έτσι δεν θα έχει τις ίδιες ιδιότητες κλιμάκωσης. [16]

#### 2.3.4. Πολλαπλή πρόσβαση με ορθογωνική πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (OFDMA)

Η τεχνική OFDM στην ουσία είναι μια τεχνική πολυπλεξίας, εντούτοις χρησιμοποιείται ως διαμόρφωση αφού όλα τα διαθέσιμα φέροντα αποδίδονται σε ένα και μόνο χρήστη. Αυτή είναι η λογική που υιοθετήθηκε σε όλα τα συστήματα που χρησιμοποιούν την τεχνολογία OFDM, όπως π.χ. ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN), ψηφιακή εκπομπή πολυμέσων (DAB/BMS/DVB), κ.ά. Στο WiMAX η τεχνολογία OFDM χρησιμοποιείται επίσης ως διαμόρφωση, αλλά και ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης (OFDMA). Στην περίπτωση αυτή οι χρήστες μοιράζονται σε διαφορετικές χρονικές σχισμές και σε διαφορετικά φέροντα του OFDM. Η προσέγγιση αυτή αυξάνει σημαντικά την ευελιξία στη διαχείριση των πόρων του συστήματος, αλλά προσθέτει επιπλέον τηλεπικοινωνιακό φόρτο και στις δύο κατευθύνσεις της ζεύξης, αφού για να

αξιοποιηθούν πλήρως οι δυνατότητες που παρέχει η OFDMA, θα πρέπει ο σταθμός βάσης να έχει πληροφορίες για τους διαύλους της κάτω ζεύξης, αλλά και οι κινητοί σταθμοί θα πρέπει να γνωρίζουν ποια φέροντα τους έχουν αποδοθεί. Δεδομένου ότι σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, σε ένα απαιτητικό περιβάλλον μετάδοσης, τα στοιχεία αυτά μεταβάλλονται με γρήγορο ρυθμό, άρα πρέπει συχνά να ανανεώνονται, είναι προφανές ότι δημιουργείται ένας σημαντικός επιπλέον όγκος πληροφοριών προς μετάδοση.

Η τεχνική OFDMA είναι ουσιαστικά μια συνδυασμένη εφαρμογή των τεχνικών TDMA και FDMA, αφού στον κάθε χρήστη αποδίδονται διαφορετικά φέροντα (FDMA) και διαφορετικές χρονοσχισμές (TDMA). Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της OFDMA είναι ότι είναι μέθοδος πολλαπλής πρόσβασης, που περιλαμβάνει όμως τη διαμόρφωση OFDM, η οποία προσδίδει στο σήμα ανθεκτικότητα σε φαινόμενα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Επιπλέον, ο τρόπος παραγωγής του OFDM σήματος διασφαλίζει ότι τα φέροντα που εκχωρούνται στους διαφορετικούς χρήστες είναι μεταξύ τους ορθογώνια. Ακόμα, είναι σημαντικό το γεγονός ότι η πολυπλεξία των χρηστών σε διαφορετικές συχνότητες υλοποιείται εξ ολοκλήρου ψηφιακά, αφού το κάθε φέρον αντιστοιχεί σε μία είσοδο/έξοδο του IFFT/FFT.

Η κατάτμηση του φάσματος σε υπο-κανάλια που κατανέμονται στον ίδιο ή σε διαφορετικούς χρήστες μπορεί να αξιοποιηθεί για την αύξηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, σε συνδυασμό με την προσαρμοζόμενη στο δίαυλο επιλογή μεθόδου διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Αν ο πομπός διαθέτει μια αξιόπιστη εκτίμηση για το δίαυλο όπου εκπέμπει, μπορεί να χρησιμοποιήσει ανθεκτικές τεχνικές διαμόρφωσης (π.χ. BPSK) για διαύλους με χαμηλό SNIR, ενώ σε διαύλους με υψηλή τιμή του λόγου SNIR μπορεί να χρησιμοποιήσει φασματικά αποδοτικές τεχνικές, όπως π.χ. 64-QAM. Επιπλέον, μπορεί να κατανείμει στα φέροντα τη συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ, σύμφωνα με τον αλγόριθμο water-filling [15], ώστε να αυξήσει τη συνολική χωρητικότητα.

#### 2.3.4.1. Πλεονεκτήματα της τεχνικής OFDMA

Η OFDMA αποτελεί ουσιαστικά είναι ένα υβρίδιο (hybrid) των FDMA και TDMA τεχνολογιών: Οι χρήστες ορίζονται δυναμικά από υπο-φέροντα (subcarriers - FDMA) σε διαφορετικές χρονοθυρίδες (time slots). Τα πλεονεκτήματα της OFDMA ξεκινάνε με τα πλεονεκτήματα του OFDM μοναδικού χρήστη (single-user) όσον αφορά τη σθεναρή πολλαπλή καταστολή (multipath suppression) και το διαφορισμό στο πεδίο της συχνότητας (frequency diversity). Επιπλέον, η OFDMA είναι μία ευέλικτη, πολλαπλής πρόσβασης τεχνική που μπορεί να φιλοξενήσει πολλούς χρήστες με διαφορετικές απαιτήσεις εφαρμογών, ρυθμούς δεδομένων (data rates) και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Επειδή η πολλαπλή πρόσβαση πραγματοποιείται στο ψηφιακό κομμάτι, πριν την IFFT λειτουργία, είναι δυνατή η δυναμική και αποτελεσματική κατανομή του εύρους ζώνης (bandwidth). Σαν αποτέλεσμα, επιτρέπεται η χρήση, εξελιγμένων χρονικά (sophisticated time) και προγραμματισμού συχνότητας (frequency-

domain scheduling), αλγορίθμων προκειμένου να εξυπηρετήσουν αποτελεσματικά όλους τους χρήστες.

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα της OFDMA σε σχέση με την OFDM είναι η δυνατότητα που έχει η πρώτη να μειώσει την ισχύ μετάδοσης (transmit power) και να «χαλαρώσει» το λόγο κορυφής προς μέση ισχύ (peak-to-average-power – PARP πρόβλημα). Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο στο κομμάτι της άνω ζεύξης (uplink), όπου η αποδοτικότητα ισχύος (power efficiency) και το κόστος της ενίσχυσης ισχύος (power amplifier) είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες ποσότητες. Κατανέμοντας το συνολικό εύρος ζώνης μεταξύ πολλαπλών κινητών σταθμών στη κυψέλη (cell), κάθε ΚΣ χρησιμοποιεί μόνο ένα μικρό υποσύνολο των φερόντων. Ως εκ τούτου, κάθε ΚΣ μεταδίδει με μικρό PARP (αυξάνεται με τον αριθμό των φερόντων) και με πολύ μικρότερη συνολική ισχύ από ότι αν έπρεπε να μεταδώσει μέσω του συνολικού εύρους ζώνης. Χαμηλότεροι ρυθμοί δεδομένων και δεδομένα σε ριπές διακινούνται πολύ πιο αποτελεσματικά στην OFDMA από ότι στην OFDM μοναδικού χρήστη ή με TDMA ή CSMA, αφού αντί να χρειάζεται να μεταδίδει με υψηλή ισχύ μέσω του συνολικού εύρους ζώνης, η OFDMA επιτρέπει ο ίδιος ρυθμός δεδομένων να αποστέλλεται σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με την ίδια εκπεμπόμενη ισχύ.

#### 2.3.5. Υπο-Διαυλοποίηση (Sub-channelization)

Τα συστήματα σταθερού και κινητού WiMAX χρησιμοποιούν την τεχνολογία OFDM, όπου το κάθε φέρον αντιστοιχεί σε ένα στοιχειώδη δίαυλο επικοινωνίας. Το σύνολο των διαθέσιμων φερόντων μπορεί να κατανέμεται εξ ολοκλήρου σε μία και μόνο ζεύξη ή μπορεί και να μοιράζεται μεταξύ περισσότερων ζεύξεων, οπότε έχουμε υπο-διαυλοποίηση. Το εύρος ζώνης και η ταχύτητα μετάδοσης κάθε ζεύξης μπορεί να ρυθμίζεται ανάλογα με τον αριθμό των φερόντων που κατανέμονται στη ζεύξη αυτή. Στο κινητό WiMAX ένα υπο-κανάλι (sub-channel) είναι ένα σύνολο από φέροντα, το πλήθος και η διάταξη των οποίων καθορίζεται από τον τρόπο αντιμετάθεσης των φερόντων (sub-carrier permutation mode). Τα φέροντα αυτά μπορεί να είναι συνεχόμενα, οπότε και το υπο-κανάλι αντιστοιχεί σε μια ενιαία ζώνη συχνοτήτων ή κατανεμημένα, με ψευδο-τυχαίο τρόπο, σε όλο το εύρος ζώνης του συστήματος, οπότε έχουμε και διαφορισμό στο πεδίο της συχνότητας (Σχήμα 2). Ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιείται είτε για λόγους προστασίας του σήματος από παρεμβολές στενής ζώνης είτε για καλύτερη διαχείριση των πόρων του συστήματος.

Το σύστημα σταθερού WiMAX διαθέτει 200 ενεργά φέροντα. Υπο-διαυλοποίηση επιτρέπεται μόνο στην άνω ζεύξη και υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Συγκεκριμένα, ορίζονται 16 υπο-κανάλια και σε κάθε κινητό σταθμό μπορούν να εκχωρηθούν 1, 2, 4, 8, ή 16 υπο-κανάλια. Με τον τρόπο αυτό, ο ΚΣ μπορεί, στην άνω ζεύξη, να χρησιμοποιεί μόνο ένα ποσοστό του εκχωρηθέντος σε αυτό φάσματος (έως και 1/16). Αυτή η κατάτμηση του φάσματος μπορεί να βελτιώσει την κάλυψη του δικτύου, να εξοικονομήσει ενέργεια στους ΚΣ



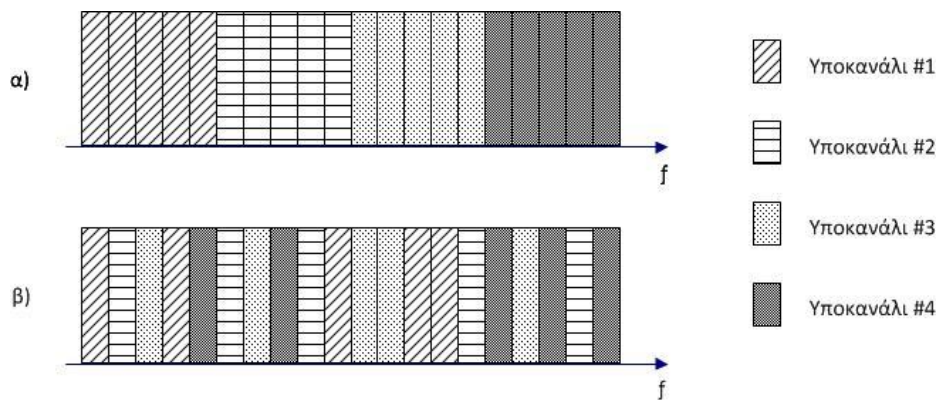
και να βελτιώσει το ισοζύγιο ισχύος της ζεύξης, έως και 12dB για χρήση του 1/16 του φάσματος. [16]

Στο σύστημα κινητού WiMAX η υπο-διαυλοποίηση υποστηρίζεται τόσο στην άνω, όσο και στην κάτω ζεύξη. Έτσι, σε κάθε χρήστη ανατίθενται διαφορετικά υπο-κανάλια και επιτυγχάνεται πολλαπλή πρόσβαση, μέσω του διαμοιρασμού των φερόντων του OFDM συστήματος, σε περισσότερους χρήστες. Στο OFDMA το υπο-κάνάλι είναι η στοιχειώδης μονάδα φάσματος, με βάση την οποία γίνεται η διαχείριση των πόρων του συστήματος.

Στην περίπτωση που τα φέροντα ενός υπο-καναλιού δεν είναι συνεχόμενα, υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την κατανομή των φερόντων σε υπο-κανάλια. Οι μέθοδοι τυχαίας κατανομής των φερόντων είναι οι εξής:

- **Πλήρης χρήση των φερόντων στην κάτω ζεύξη (DL Full Usage of SubCarriers – DL FUSC):** Χρησιμοποιούνται όλα τα φέροντα για τη δημιουργία των υπο-καναλιών, ανεξάρτητα από τη θέση τους στο συνολικό εύρος ζώνης.
- **Μερική χρήση των φερόντων στην κάτω ζεύξη (DL Partial Usage of SubCarriers – DL PUSC):** Τα φέροντα αρχικά χωρίζονται σε συμπλέγματα (clusters) και αυτά φτιάχνουν 6 ομάδες (groups). Στη συνέχεια, γίνεται αντιμετάθεση ανεξάρτητα σε κάθε ομάδα, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα υπο-κάνάλι.
- **Μερική χρήση των φερόντων στην άνω ζεύξη (UL Partial Usage of SubCarriers – UL PUSC):** Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, τα φέροντα χωρίζονται αρχικά σε τμήματα (tiles) και αυτά φτιάχνουν 6 ομάδες (groups). Το υπο-κάνάλι δημιουργείται χρησιμοποιώντας 6 τμήματα από κάθε ομάδα.
- **Συνεχόμενη χρήση των φερόντων στην κάτω ζεύξη (DL Tile Usage of SubCarriers – TUSC):** Η μέθοδος αυτή είναι πανομοιότυπη με τη μέθοδο UL PUSC, έτσι ώστε να μπορούμε να εκμεταλλευτούμε τη συμμετρία και την αμοιβαιότητα του διαύλου και να εξαλείψουμε την ανάγκη για ανάδραση της κατάστασης του διαύλου (Channel State Information - CSI) στην περίπτωση εφαρμογής τεχνικών έξυπνων κεραιών κλειστού βρόχου.

Οι μέθοδοι μερικής χρήσης των φερόντων είναι υποχρεωτικές για όλες τις υλοποιήσεις του κινητού WiMAX. Για εύρος ζώνης 5MHz, προβλέπονται 15 και 17 υπο-κανάλια για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Για εύρος ζώνης 10MHz, οι αντίστοιχες τιμές είναι 30 και 35 υπο-κανάλια. [17]

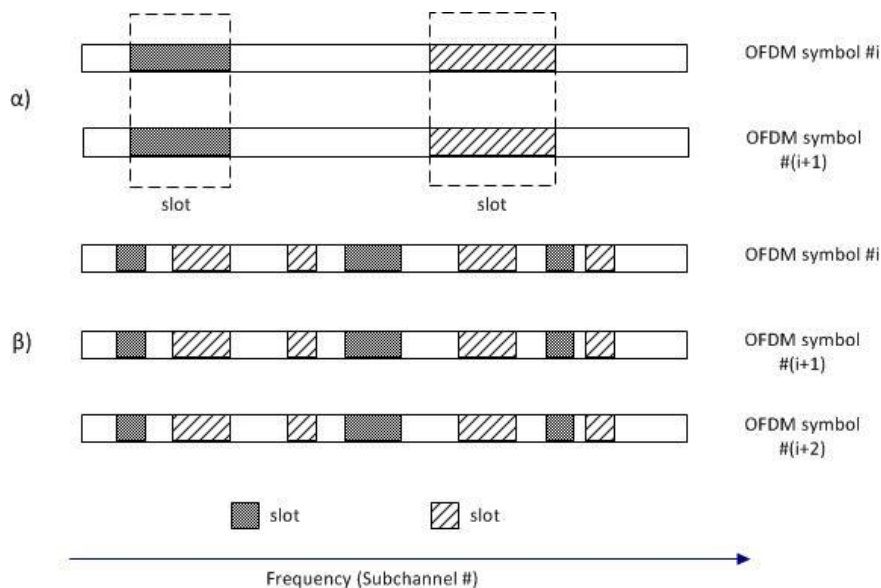


**Σχήμα 2:** Κατανομή φερόντων σε υπο-κάναλια. (α) Συνεχής (β) Κατανεμημένη [17]

### 2.3.6. Διαχείριση πόρων σε συστήματα OFDMA

Το φυσικό στρώμα του WiMAX είναι υπεύθυνο για την κατανομή των διαθέσιμων πόρων συχνότητας και χρόνου στους χρήστες. Η θεμελιώδης μονάδα αυτού του διαχωρισμού, δηλαδή το βασικό εύρος συχνότητας και η στοιχειώδης μονάδα χρόνου που μπορούν να εκχωρηθούν, ονομάζεται σχισμή (slot). Δηλαδή, ένα slot είναι ένα OFDMA υπο-κάναλι σε ένα, δύο ή τρία διαδοχικά OFDM σύμβολα (Σχήμα 3). Μια σειρά από συνεχόμενα slots που έχουν κατανεμηθεί σε ένα χρήστη ονομάζεται πεδίο δεδομένων του χρήστη (user's data region). Η κατανομή των πεδίων δεδομένων στους διάφορους χρήστες γίνεται με βάση τον αλγόριθμο χρονοπρογραμματισμού (scheduling algorithm) που χρησιμοποιείται. Το σύστημα διαχείρισης των πόρων του συστήματος μπορεί να αναθέτει τα πεδία δεδομένων σε διαφορετικούς χρήστες, ανάλογα με τις συνθήκες του διαύλου και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών σε ρυθμό μετάδοσης και ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού αποφασίζει πώς κατανέμονται τα διαθέσιμα φέροντα στους διάφορους χρήστες, καθώς και τα επίπεδα ισχύος με τα οποία ο κάθε χρήστης πρέπει να εκπέμπει στο κάθε φέρον. Ο αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού δεν καθορίζεται από το πρότυπο, αλλά η ανάπτυξή του αφήνεται στους κατασκευαστές. Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις για το πώς θα πρέπει να σχεδιαστεί ένας αλγόριθμος χρονοπρογραμματισμού προκειμένου να ικανοποιήσει τα αιτήματα όλων των χρηστών, με γνώμονα την καλύτερη δυνατή συνολική επίδοση του δικτύου.



**Σχήμα 3:** Παραδείγματα σχισμών WiMAX: (α) υπο-κανάλια με συνεχή φέροντα, (β) υπο-κανάλια με κατανεμημένα φέροντα [17]

Οι αλγόριθμοι χρονοπρογραμματισμού που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι οι εξής:

- **Μέγιστου Συνολικού Ρυθμού (Maximum Sum Rate – MSR):** Ο αλγόριθμος αυτός στοχεύει στη μεγιστοποίηση του συνολικού ρυθμού μετάδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό στη συνολικά εκπεμπόμενη ισχύ [18]. Το μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι ότι είναι πολύ πιθανό όλοι οι πόροι του συστήματος να εκχωρούνται σε συνδρομητές που βρίσκονται πολύ κοντά στο σταθμό βάσης, χωρίς να αποδίδονται πόροι σε συνδρομητές στους οποίους οι συνθήκες διάδοσης είναι δυσκολότερες.
- **Μέγιστης Αμεροληψίας (Maximum Fairness – MF):** Ο αλγόριθμος αυτός στοχεύει στην όσο το δυνατό πιο «δίκαια» κατανομή των πόρων μεταξύ των χρηστών [19]. Στόχος είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης. Ουσιαστικά, είναι ένα πρόβλημα μέγιστου-ελάχιστου (max-min), αφού πρόκειται για μεγιστοποίηση ελάχιστης τιμής. Ένα σημαντικό πρόβλημα του αλγορίθμου αυτού είναι ότι η απόδοση του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το χρήστη που χαρακτηρίζεται από τη χαμηλότερη τιμή του λόγου SNIR. Η βέλτιστη κατανομή πόρων που επιτυγχάνει το στόχο αυτό είναι πολύ δύσκολο να βρεθεί, γι' αυτό στην πράξη χρησιμοποιούνται υπο-βέλτιστες (sub-optimal) λύσεις.
- **Περιορισμών στον ρυθμό που αναλογεί (Proportional Rate Constraints – PRC):** Σε ένα ασύρματο ευρυζωνικό δίκτυο οι απαιτήσεις των χρηστών σε ρυθμό μετάδοσης, άρα και σε πόρους, εξαρτώνται από τις απαιτήσεις των υπηρεσιών. Ο αλγόριθμος PRC είναι μια γενίκευση του αλγορίθμου MF και αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του συνολικού

ρυθμού μετάδοσης, με την προϋπόθεση όμως ότι ο τελικός ρυθμός μετάδοσης του κάθε χρήστη θα πρέπει να είναι ανάλογος κάποιας προκαθορισμένης σταθερής τιμής. Έτσι, προκαθορίζονται κάποιοι «συντελεστές σπουδαιότητας» των χρηστών, ανάλογα με τις απαιτήσεις των υπηρεσιών του καθενός. Και ο αλγόριθμος αυτός υλοποιείται με προσεγγιστικές λύσεις και με μειωμένη πολυπλοκότητα. [20][21]

- **Αναλογικής Αμεροληψίας (Proportional Fairness – PF):** Σε αντίθεση με τους προαναφερθέντες αλγόριθμους, οι οποίοι αποσκοπούν στην άμεση επίτευξη της βέλτιστης κατανομής των πόρων, ο αλγόριθμος PF στοχεύει στην κατανομή των πόρων με τρόπο που να εξασφαλίζει τη βελτιστοποίηση της μέσης διεκπεραιωτικής ικανότητας του δικτύου. [22][23]

Ο Πίνακας 3 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού που αναθέρθηκαν παραπάνω. Ο αλγόριθμος MSR επιτυγχάνει τη μεγιστοποίηση της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου, αλλά υστερεί σημαντικά στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά, ενώ ο αλγόριθμος PRC φαίνεται πως είναι -συνολικά- ο αποδοτικότερος, είναι όμως και ο πιο πολύπλοκος στην υλοποίηση.

Αλγόριθμος	Συνολική Χωρητικότητα	Αμερόληπτη κατανομή πόρων	Ευελιξία	Πολυπλοκότητα
MSR	++	-	--	+
MF	-	++	--	-
PRC	+	+	++	--
PF	+	+	+	+

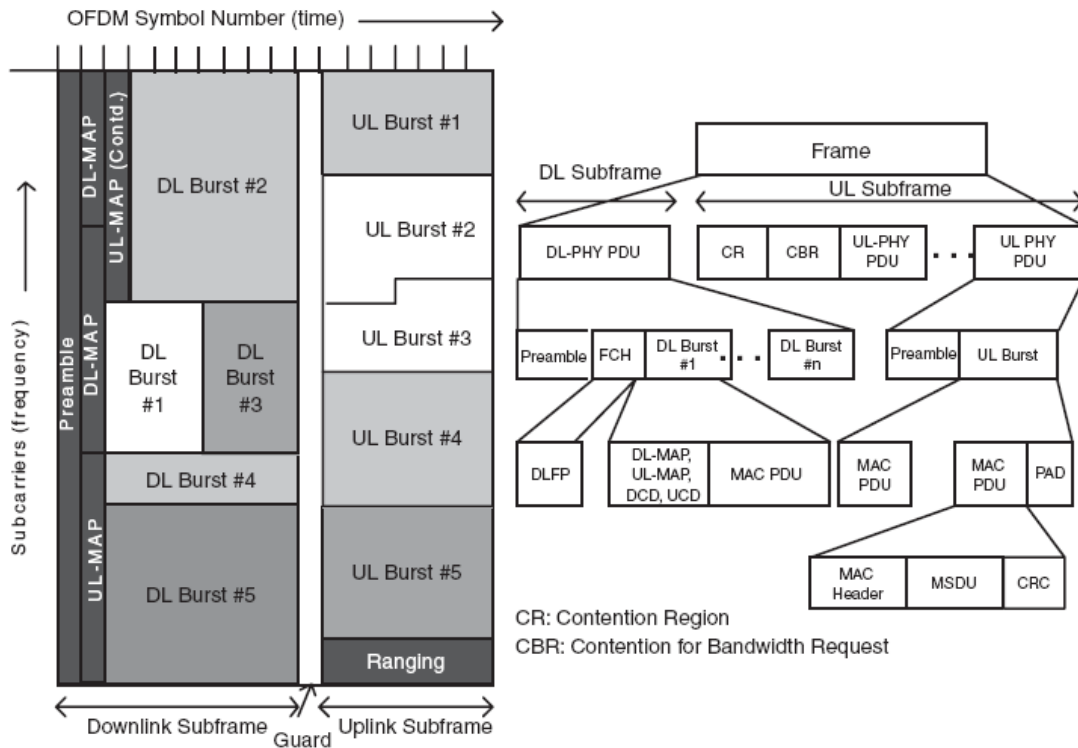
**Πίνακας 3:** Χαρακτηριστικά αλγορίθμων χρονοπρογραμματισμού σε συστήματα OFDMA

### 2.3.7. Δομή Πλαισίων Φυσικού Στρώματος

Ένα παράδειγμα σχηματισμού πλαισίου εκπομπής για σύστημα WiMAX, που χρησιμοποιεί TDD, απεικονίζεται στο Σχήμα 4. Όπως φαίνεται στο σχήμα, το πλαίσιο χωρίζεται σε δύο υπο-πλαίσια: ένα για την άνω κι ένα για την κάτω ζεύξη. Τα υπο-πλαίσια είναι διαχωρισμένα μεταξύ τους στο πεδίο του χρόνου κατά ένα χρονικό διάστημα φύλαξης. Τα δύο υπο-πλαίσια μπορεί να έχουν ίση χρονική διάρκεια ή η χρονική διάρκεια του υπο-πλαισίου της κάτω ζεύξης να είναι ως και τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτή του υπο-πλαισίου της άνω ζεύξης, προκειμένου να μπορεί να υποστηριχθεί ασύμμετρη τηλεπικοινωνιακή κίνηση στις δύο κατευθύνσεις. Η πιο

συνηθισμένη επιλογή για τη μέθοδο αμφιδρόμησης είναι η TDD, λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Ωστόσο, για την υλοποίηση της TDD απαιτείται πολύ καλός συγχρονισμός μεταξύ των σταθμών του δικτύου. Επίσης, υπάρχουν συστήματα σταθερού WiMAX που λειτουργούν με FDD, λόγω κανονισμών κατανομής του φάσματος, που καθορίζουν εκχώρηση συχνοτήτων ανά ζεύγη. Στην περίπτωση αυτή, τα δυο υπο-πλαίσια που απεικονίζονται στο Σχήμα 4 μεταδίδονται ταυτόχρονα, σε διαφορετική φέρουσα συχνότητα και η μεταξύ τους απομόνωση υφίσταται στο πεδίο της συχνότητας κι όχι του χρόνου. Το μήκος του πλαισίου, δηλαδή το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών επικεφαλίδων κάτω ζεύξης, είναι μεταβλητό και κυμαίνεται μεταξύ 2ms και 20ms.

Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, το πρώτο τμήμα του υπο-πλαισίου της κάτω ζεύξης είναι μια επικεφαλίδα (preamble) που περιέχει απαραίτητες πληροφορίες για τις παραμέτρους του στρώματος PHY, όπως πληροφορίες συγχρονισμού και μια αρχική εκτίμηση του ασύρματου διαύλου. Ακολουθεί η επικεφαλίδα ελέγχου του πλαισίου (Frame Control Header- FCH) που περιέχει πληροφορίες για τη δομή και τη διάρθρωση του πλαισίου, όπως για παράδειγμα το μήκος των μηνυμάτων MAP, τους αριθμούς των OFDM φερόντων που χρησιμοποιούνται και το είδος της διαμόρφωσης και της κωδικοποίησης που εφαρμόζονται. Επειδή το FCH περιέχει πολύ σημαντικές πληροφορίες για τη ζεύξη, θα πρέπει να λαμβάνεται σωστά από όλους τους χρήστες, ακόμα και όταν βρίσκονται στα όρια της κυψέλης, ή όταν οι συνθήκες διάδοσης είναι δύσκολες. Για το λόγο αυτό, για το FCH χρησιμοποιείται κωδικοποίηση με ρυθμό  $\frac{1}{2}$  και διαμόρφωση BPSK, που έχει χαμηλή πιθανότητα σφάλματος. Στους χρήστες ανατίθενται διαφορετικά πεδία δεδομένων μέσα στο υπο-πλαίσιο της κάτω ζεύξης, όπως καθορίζουν τα μηνύματα MAP που ακολουθούν το FCH.



Σχήμα 4: Παράδειγμα δομής πλαισίων για κινητό WiMAX-TDD [16]

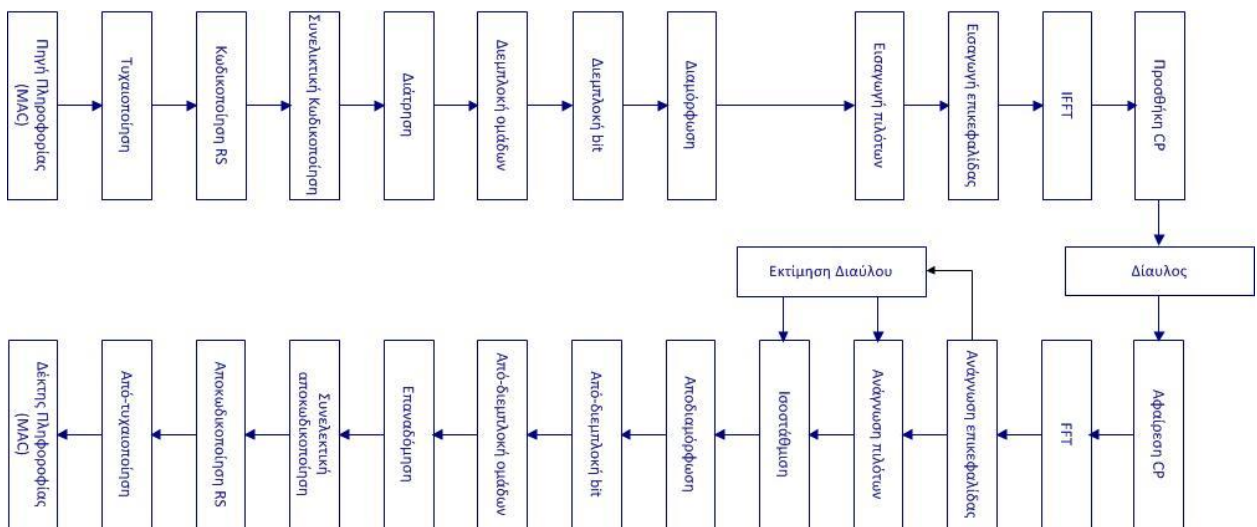
Ένα υπο-πλαίσιο της κάτω ζεύξης μπορεί να περιέχει ριπές διαφορετικού μεγέθους, που η κάθε μία προέρχεται από διαφορετικό χρήστη και περιέχει διαφορετικό είδος πληροφορίας. Επίσης, η κάθε ριπή μπορεί να περιλαμβάνει συνένωση πολλών πακέτων που προέρχονται από ανώτερα επίπεδα, με ίδιο ή διαφορετικό μέγεθος το καθένα, ακόμα και τμήματα τέτοιων πακέτων. Η συνολική διάρκεια του πλαισίου μπορεί να μεταβάλλεται, ακόμα και ανάμεσα σε διαδοχικά πλαίσια, μεταξύ 2 και 20msec.

Το υπο-πλαίσιο της άνω ζεύξης, εκτός από τις ριπές που αντιστοιχούν στους χρήστες, έχει κι ένα τμήμα που χρησιμοποιείται για άλλες διαδικασίες του συστήματος. Η κύρια χρήση αυτού του τμήματος είναι να χρησιμοποιείται ως ranging channel (διαδικασία δυναμικού συγχρονισμού), για ρύθμιση χρονισμού, συχνότητας και ισχύος τόσο κατά την αρχική είσοδο του κινητού σταθμού στο δίκτυο, όσο και περιοδικά, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του. Επίσης, μπορεί να περιέχει και δεδομένα, εφόσον αυτά έχουν μικρό όγκο και αντιστοιχούν σε υπηρεσίες best-effort (το δίκτυο διαχειρίζεται την τηλεπικοινωνιακή κίνηση με τον καλύτερο δυνατό τρόπο π.χ. πλοήγηση στο διαδίκτυο).

Το υπο-πλαίσιο της άνω ζεύξης περιλαμβάνει κι ένα τμήμα που μεταφέρει πληροφορίες για την ποιότητα του διαύλου, όπως την αξιολογεί ο ΚΣ (Channel Quality Indicator Channel – CQICH). Στις πληροφορίες αυτές περιλαμβάνονται η τιμή του λόγου ισχύος σήματος προς

θόρυβο και παρεμβολής (στιγμιαία κι ενεργός τιμή), ο βέλτιστος τρόπος λειτουργίας για την περίπτωση χρήσης τεχνικών έξυπνων κεραιών, κ.ά. Οι πληροφορίες αυτές στέλνονται από τον ΚΣ προς το ΣΒ για να αξιοποιηθούν στη διαδικασία διαχείρισης των πόρων του συστήματος. Επίσης, το υπο-πλαίσιο της άνω ζεύξης περιλαμβάνει και ένα τμήμα όπου οι ΚΣ στέλνουν προς το ΣΒ μηνύματα με τα οποία επιβεβαιώνουν τη λήψη των μηνυμάτων της κάτω ζεύξης (ACKnowledgment Channel – ACKCH).

Το δομικό διάγραμμα ενός πομποδέκτη, όπως ορίζεται στο βασικό πρότυπο IEEE 802.16, απεικονίζεται στο Σχήμα 5.



**Σχήμα 5:** Δομικό διάγραμμα πομπού/δέκτη OFDMA [17]

### 2.3.8. Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο WiMAX

Το WiMAX υποστηρίζει αρκετά συστήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και επιτρέπει στο κάθε σύστημα να αλλάζει σε κάθε ριπή ανά σύνδεση, ανάλογα βέβαια και με τις συνθήκες του καναλιού. Χρησιμοποιώντας την ένδειξη ποιότητας καναλιού, η κινητή συσκευή μπορεί να παρέχει στο σταθμό βάσης πληροφορίες για την ποιότητα του καναλιού εισερχόμενης κίνησης (downlink). Για το κανάλι εξερχόμενης κίνησης (uplink), ο σταθμός βάσης μπορεί να εκτιμήσει τη ποιότητα του καναλιού, βάσει της ποιότητας του σήματος που λαμβάνει. Ο χρονοπρογραμματιστής του σταθμού βάσης μπορεί να λάβει υπόψη την ποιότητα καναλιού για

την αποστολή και λήψη δεδομένων του κάθε χρήστη και να ορίσει ένα σύστημα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που μεγιστοποιεί την απόδοση για το διαθέσιμο σηματοθορυβικό λόγο. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση αυξάνει σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, καθότι επιτρέπει σε πραγματικό χρόνο συμβιβαστικές ανταλλαγές ρυθμίσεων μεταξύ της απόδοσης και της ανθεκτικότητας της κάθε ζεύξης.

Ο Πίνακας 4 απεικονίζει τα διάφορα συστήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που υποστηρίζονται από τη τεχνολογία WiMAX. Για το κανάλι εισερχόμενης κίνησης, τα QPSK, 16 QAM και 64 QAM είναι υποχρεωτικά για το σταθερό και το κινητό WiMAX, ενώ το 64 QAM είναι προαιρετικό για το κανάλι εξερχόμενης κίνησης. Η κωδικοποίηση FEC που χρησιμοποιεί κωδικούς συνέλιξης είναι υποχρεωτική. Οι κωδικοί συνέλιξης συνδυάζονται με έναν εξωτερικό κωδικό Reed-Solomon στην ζεύξη εισερχόμενης κίνησης για το OFDM-PHY. Το πρότυπο υποστηρίζει προαιρετικά turbo κωδικούς (turbo codes) και κωδικούς ελέγχου ισότητας χαμηλής πυκνότητας (Low Density Parity Check – LDPC) σε διάφορους ρυθμούς μετάδοσης κωδικών. Στο WiMAX ορίζονται συνολικά 52 συνδυασμοί συστημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ως προφίλ εκπομπής.

	<b>Κανάλι εισερχόμενης κίνησης (Downlink)</b>	<b>Κανάλι εξερχόμενης κίνησης (Uplink)</b>
Διαμόρφωση	BPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM. Το BPSK είναι προαιρετικό για το OFDMA-PHY	BPSK, QPSK, 16 QAM. Το 64 QAM είναι προαιρετικό
Κωδικοποίηση	Υποχρεωτική: κωδικοί συνέλιξης με ρυθμό μετάδοσης 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  Προαιρετική: turbo κωδικοί συνέλιξης με ρυθμό μετάδοσης 1/2, 2/3, 3/4, 5/6. Κωδικοί επανάληψης με ρυθμό μετάδοσης 1/2, 1/3, 1/6, LDPC, κωδικοί RS για OFDM-PHY	Υποχρεωτική: κωδικοί συνέλιξης με ρυθμό μετάδοσης 1/2, 2/3, 3/4, 5/6  Προαιρετική: turbo κωδικοί συνέλιξης με ρυθμό μετάδοσης 1/2, 2/3, 3/4, 5/6. Κωδικοί επανάληψης με ρυθμό μετάδοσης 1/2, 1/3, 1/6, LDPC

**Πίνακας 4:** Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση που υποστηρίζεται από το WiMAX



## 2.4. Επισκόπηση του επιπέδου Media Access Control (MAC)

Το κύριο έργο του επιπέδου MAC του WiMAX είναι να παρέχει μία διασύνδεση ανάμεσα στα υψηλότερα επίπεδα μεταφοράς και στο φυσικό επίπεδο. Το επίπεδο MAC παίρνει πακέτα από το ανώτερο επίπεδο, τα οποία ονομάζονται *μονάδες δεδομένων υπηρεσιών MAC* (MAC service data units – MSDUs), και τα οργανώνει σε *μονάδες δεδομένων πρωτοκόλλου MAC* (MAC protocol data units – MPDUs) για ασύρματη μετάδοση. Για τα δεδομένα που λαμβάνει, το επίπεδο MAC κάνει το αντίστροφο. Η σχεδίαση του στρώματος MAC για τα πρότυπα IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005 περιλαμβάνει ένα *υποεπίπεδο σύγκλισης* (convergence sublayer), το οποίο αλληλεπιδρά με διάφορα πρωτόκολλα υψηλότερων επιπέδων, όπως ATM, TDM Voice, Ethernet, IP και άλλα. Καθότι κυριαρχούν στη παγκόσμια βιομηχανία τα πρωτόκολλα IP και Ethernet, το WiMAX Forum αποφάσισε να υποστηρίξει μόνο τα δύο αυτά πρωτόκολλα στην παρούσα φάση. Πέρα από τη παροχή μίας αντιστοίχισης (mapping) από και προς τα υψηλότερα επίπεδα, το υποεπίπεδο σύγκλισης υποστηρίζει συμπύεση κεφαλίδας MSDU προκειμένου να μειώσει τις επιβαρύνσεις των υψηλότερων επιπέδων σε κάθε πακέτο.

Το επίπεδο MAC του WiMAX σχεδιάζεται από την αρχή για να υποστηρίξει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, ενώ προσφέρει ποιότητα υπηρεσιών παρόμοια με αυτή των ATM και DOCSIS. Επιπλέον, χρησιμοποιεί μία MPDU μεταβλητού μήκους και προσφέρει μεγάλη ευελιξία για να καταστεί δυνατή η αποδοτική μετάδοση των MPDUs. Για παράδειγμα, πολλαπλά MPDUs με ίδιο ή διαφορετικό μήκος μπορεί να συγκεντρώνονται σε μία ριπή για να μειωθεί η επιβάρυνση στο φυσικό επίπεδο. Παρόμοια, πολλαπλά MSDUs από μία υπηρεσία του ίδιου υψηλότερου επιπέδου μπορεί να συνδέονται αλυσιδωτά σε ένα MPDU ώστε να μειωθεί η επιβάρυνση της κεφαλίδας του επιπέδου MAC. Αντίστροφα, μεγάλα MSDUs μπορεί να κατακερματίζονται σε μικρότερα MPDUs και να αποστέλλονται μέσω πολλαπλών πλαισίων.

Κάθε πλαίσιο του στρώματος MAC έχει ως πρόθεμα μία γενική κεφαλίδα MAC (Generic Mac Header - GMH), η οποία περιέχει ένα αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection Identifier - CID), το μήκος του πλαισίου και μία ποσότητα bits που πιστοποιεί την παρουσία CRC, υποκεφαλίδων και αν το ωφέλιμο φορτίο (payload) του πακέτου κρυπτογραφείται και αν ναι, με ποιο κλειδί. Το ωφέλιμο φορτίο του MAC είναι ένα μήνυμα μεταφοράς ή διαχείρισης. Εκτός από τα MSDUs, το ωφέλιμο φορτίο μεταφοράς μπορεί να περιέχει αιτήσεις για εύρος ζώνης ή αιτήσεις για αναμετάδοση. Ο τύπος του ωφέλιμου φορτίου μεταφοράς προσδιορίζεται από την υποκεφαλίδα που αμέσως προηγείται. Παραδείγματα υποκεφαλίδων είναι οι υποκεφαλίδες πακέτων και οι υποκεφαλίδες κατάτμησης. Επίσης, το επίπεδο MAC του WiMAX υποστηρίζει αιτήσεις αυτόματης αναμετάδοσης (ARQ) και έτσι μπορεί να ζητήσει την αναμετάδοση των μη κατατετημένων MSDUs και τμημάτων από MSDUs. Το μέγιστο μήκος πλαισίου είναι 2.047 bytes και αναπαριστάται από 11 bits στην γενική κεφαλίδα MAC (GMH).

#### 2.4.1. Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service – QoS)

Η υποστήριξη για ποιότητα υπηρεσιών (QoS) αποτελεί βασικό κομμάτι της σχεδίασης του επιπέδου MAC του WiMAX. Το τελευταίο δανείζεται μερικές από τις βασικές ιδέες της σχεδίασης QoS από το πρότυπο καλωδιακού μόντεμ DOCSIS. Ο ισχυρός έλεγχος της ποιότητας υπηρεσιών επιτυγχάνεται με τη χρήση μίας αρχιτεκτονικής MAC που βασίζεται στη σύνδεση, όπου όλες οι εισερχόμενες και εξερχόμενες συνδέσεις ελέγχονται από τον σταθμό βάσης (ΣΒ). Προτού πραγματοποιηθεί οποιαδήποτε μετάδοση δεδομένων, οι σταθμοί βάσης και οι κινητοί σταθμοί εγκαθιστούν μία λογική διασύνδεση μονής κατεύθυνσης, η οποία ονομάζεται *σύνδεση*, μεταξύ των δύο ομότιμων επιπέδων MAC. Κάθε σύνδεση προσδιορίζεται από ένα *αναγνωριστικό σύνδεσης* (CID), το οποίο χρησιμεύει ως μία προσωρινή διεύθυνση για μετάδοση δεδομένων μέσω αυτής της γραμμής. Εκτός από τις συνδέσεις για τη μεταφορά δεδομένων χρήστη, το MAC του WiMAX ορίζει τρεις συνδέσεις διαχείρισης -τη βασική, την κύρια και τη δευτερεύουσα- οι οποίες χρησιμοποιούνται για λειτουργίες όπως ο συγχρονισμός.

Το WiMAX ορίζει επίσης την έννοια της ροής υπηρεσίας. Μία *ροή υπηρεσίας* είναι μία ροή πακέτων μονής κατεύθυνσης με ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων QoS και προσδιορίζεται από ένα *αναγνωριστικό ροής υπηρεσίας* (Service Flow Identifier - SFID). Οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσιών (QoS) θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν προτεραιότητα κυκλοφορίας, μέγιστο συνεχή ρυθμό μετάδοσης, μέγιστο ρυθμό μετάδοσης ριπών, ελάχιστο ανεκτό ρυθμό μετάδοσης, τύπο χρονοπρογραμματισμού, τύπο ARQ, μέγιστη καθυστέρηση, ανεκτό επίπεδο μεταβολής καθυστέρησης (jitter), τύπο και μέγεθος μονάδας δεδομένων υπηρεσίας, μηχανισμό για αίτηση εύρους ζώνης που θα χρησιμοποιηθεί, κανόνες διαμόρφωσης PDU μετάδοσης και άλλα. Οι ροές υπηρεσίας μπορούν να τροφοδοτούνται μέσω ενός συστήματος διαχείρισης δικτύου ή να δημιουργούνται δυναμικά μέσω μηχανισμών ανταλλαγής μηνυμάτων που καθορίζονται από το πρότυπο. Ο σταθμός βάσης είναι υπεύθυνος για την έκδοση του CID και την αντιστοίχσή του σε μοναδικά CID. Επιπλέον, οι ροές υπηρεσίας μπορούν να αντιστοιχούνται σε σημεία κωδικών DiffServ ή σε ετικέτες ροής MPLS, ώστε να είναι δυνατή η ολοκληρωμένη ποιότητα υπηρεσιών (QoS) που βασίζεται στο IP.

Για να υποστηρίξει μεγάλο πλήθος εφαρμογών, το WiMAX ορίζει πέντε υπηρεσίες χρονοπρογραμματισμού (Πίνακας 5) που θα πρέπει να υποστηρίζονται από τον MAC χρονοπρογραμματιστή του σταθμού βάσης για μεταφορά δεδομένων μέσω μίας σύνδεσης:

1. **Αυτόκλητες υπηρεσίες παροχής (Unsolicited grant services – UGS):** Η υπηρεσία αυτή υποστηρίζει πακέτα δεδομένων σταθερού μεγέθους με σταθερό ρυθμό μετάδοσης (Constant Bit Rate - CBR). Οι εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν την υπηρεσία αυτή είναι η εξομίωση T1/E1 και το VoIP χωρίς καταστολή σιωπής. Οι υποχρεωτικές παράμετροι των ροών υπηρεσίας που ορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης, η μέγιστη καθυστέρηση, το ανεκτό επίπεδο μεταβολής καθυστέρησης (jitter) και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης. Η τελευταία

περιλαμβάνει τον τρόπο αίτησης για εύρος ζώνης και τους κανόνες για τη διαμόρφωση του PDU. Ένας τέτοιος κανόνας είναι η απαγόρευση ή όχι του κατακερματισμού.

2. **Υπηρεσίες σταθμοσκόπησης σε πραγματικό χρόνο (Real-time polling services - rtPS):** Η υπηρεσία αυτή υποστηρίζει ροές υπηρεσίας σε πραγματικό χρόνο, όπως για παράδειγμα βίντεο MPEG, το οποίο παράγει πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους σε περιοδική βάση. Οι υποχρεωτικές παράμετροι που ορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο ελάχιστος αποκλειστικός ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης, η καθυστέρηση και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης.
3. **Υπηρεσίες σταθμοσκόπησης σε μη πραγματικό χρόνο (Non-real-time polling services - nrtPS):** Η υπηρεσία αυτή υποστηρίζει ροές δεδομένων που δείχνουν ανοχή στην καθυστέρηση, όπως το FTP και οι οποίες απαιτούν παροχή δεδομένων μεταβλητού μεγέθους σε έναν ελάχιστο εξασφαλισμένο ρυθμό μετάδοσης. Οι υποχρεωτικές παράμετροι των ροών υπηρεσίας που ορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο ελάχιστος αποκλειστικός ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα κυκλοφορίας και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης.
4. **Υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (Best-effort services - BE):** Η υπηρεσία αυτή υποστηρίζει ροές δεδομένων, όπως για παράδειγμα περιήγηση στο διαδίκτυο, οι οποίες δεν απαιτούν ελάχιστο εξασφαλισμένο επίπεδο υπηρεσιών. Οι υποχρεωτικές παράμετροι των ροών υπηρεσίας που ορίζουν την υπηρεσία αυτή είναι ο μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης, η προτεραιότητα κυκλοφορίας και η πολιτική αίτησης/μετάδοσης.
5. **Υπηρεσίες εκτεταμένου μεταβλητού ρυθμού μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο (Extended real-time variable rate services – ERT-VR):** Η υπηρεσία αυτή υποστηρίζει εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, όπως το VoIP με καταστολή σιωπής, οι οποίες έχουν μεταβλητούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων αλλά απαιτούν εξασφαλισμένο ρυθμό μετάδοσης και καθυστέρηση. Η υπηρεσία αυτή ορίζεται μόνο στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005 και όχι στο IEEE 802.16-2004. Είναι γνωστή επίσης και ως υπηρεσία εκτεταμένης σταθμοσκόπησης σε πραγματικό χρόνο (extended real-time polling service – ErtPS). [16]

Χαρακτηρισμός ροής υπηρεσίας	Ορισμός παραμέτρων QoS	Παραδείγματα εφαρμογών
Αυτόκλητες υπηρεσίες παροχής (UGS)	Μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης Μέγιστη ανοχή υστέρησης Ανοχή μεταβολής καθυστέρησης	VoIP χωρίς καταστολή σιωπής
Υπηρεσίες σταθμοσκόπησης σε πραγματικό χρόνο (rtPS)	Ελάχιστος αποκλειστικός ρυθμός μετάδοσης Μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης Μέγιστη ανοχή υστέρησης Προτεραιότητα κυκλοφορίας	Αναπαραγωγή συνεχούς ροής ήχου και βίντεο, κωδικοποίηση MPEG (Motion Picture Experts Group)
Υπηρεσίες σταθμοσκόπησης σε μη πραγματικό χρόνο (nrtPS)	Ελάχιστος αποκλειστικός ρυθμός μετάδοσης Μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης Προτεραιότητα κυκλοφορίας	Πρωτόκολλο μεταφοράς αρχείων (FTP)
Υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας (BE)	Μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης Προτεραιότητα κυκλοφορίας	Περιήγηση στο διαδίκτυο, μεταφορά δεδομένων
Υπηρεσίες εκτεταμένης σταθμοσκόπησης σε πραγματικό χρόνο (ErtPS)	Ελάχιστος αποκλειστικός ρυθμός μετάδοσης Μέγιστος σταθερός ρυθμός μετάδοσης Μέγιστη ανοχή υστέρησης Ανοχή μεταβολής καθυστέρησης Προτεραιότητα κυκλοφορίας	VoIP με καταστολή σιωπής

**Πίνακας 5:** Ροές υπηρεσίας που υποστηρίζονται από το WiMAX

Το WiMAX ορίζει αρκετές παραμέτρους και χαρακτηριστικά τα οποία διευκολύνουν την υλοποίηση μίας αποδοτικής λειτουργίας χρονοπρογραμματισμού:

- Υποστήριξη για έναν αναλυτικό παραμετρικό ορισμό των απαιτήσεων QoS και ένα πλήθος μηχανισμών που σηματοδοτούν αποτελεσματικά τις συνθήκες κυκλοφορίας και τις αναλυτικές απαιτήσεις QoS στο κανάλι εξερχόμενης κίνησης.
- Υποστήριξη για δυναμική κατανομή πόρων τριών διαστάσεων στο επίπεδο MAC. Οι πόροι μπορούν να κατανομούνται με βάση το χρόνο (θυρίδες χρόνου), τη συχνότητα (υποφορείς) και το χώρο (πολλαπλές κεραίες) ανά πλαίσιο.
- Υποστήριξη για άμεσες πληροφορίες ανάδρασης που αφορούν την ποιότητα καναλιού και οι οποίες δίνουν τη δυνατότητα στον χρονοπρογραμματιστή να επιλέξει την κατάλληλη κωδικοποίηση και διαμόρφωση (προφίλ εκπομπής) για κάθε κατανομή.

- Υποστήριξη για αντιμεταθέσεις συνεχόμενων υποφορέων, όπως AMC, που επιτρέπουν στον χρονοπρογραμματιστή να εκμεταλλευτεί τη ποικιλότητα πολλαπλών χρηστών, κατανέμοντας κάθε συνδρομητή στο αντίστοιχο ισχυρότερο υποκανάλι.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η υλοποίηση ενός αποτελεσματικού χρονοπρογραμματιστή είναι κρίσιμη για τη συνολική χωρητικότητα και απόδοση ενός συστήματος WiMAX.

#### 2.4.2. Χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας

Για να υποστηρίξει το κινητό WiMAX φορητές συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, διαθέτει χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας τα οποία επιτρέπουν σε φορητούς σταθμούς συνδρομητών να λειτουργούν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, χωρίς να χρειάζονται επαναφόρτιση. Η εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με την απενεργοποίηση τμημάτων του κινητού σταθμού με ελεγχόμενο τρόπο, όταν ο τελευταίος δεν μεταδίδει ή λαμβάνει δεδομένα. Το κινητό WiMAX ορίζει μεθόδους ειδοποίησης που επιτρέπουν στον κινητό σταθμό να τίθεται σε κατάσταση αδράνειας ή αναστολής όταν είναι ανενεργός. Η κατάσταση αναστολής λειτουργίας (sleep mode) είναι ουσιαστικά μία κατάσταση κατά την οποία ο κινητός σταθμός απενεργοποιείται και δεν είναι διαθέσιμος για προκαθορισμένες περιόδους. Οι περίοδοι απουσίας είναι διαπραγματεύσιμοι με τον εξυπηρετή ΣΒ. Το WiMAX ορίζει τρεις κατηγορίες εξοικονόμησης ενέργειας, οι οποίες βασίζονται στον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η κατάσταση αναστολής λειτουργίας. Στην κατάσταση λειτουργίας Power Save Class 1, το παράθυρο αναστολής της λειτουργίας αυξάνεται εκθετικά από μία ελάχιστη τιμή σε μία μέγιστη. Αυτό πραγματοποιείται συνήθως όταν ο κινητός σταθμός εκτελεί υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας και κυκλοφορίας σε μη πραγματικό χρόνο. Η κατάσταση Power Save Class 2 έχει ένα σταθερού μήκους παράθυρο αναστολής και χρησιμοποιείται για την αυτόκλητη υπηρεσία παροχής (UGS). Επιπλέον, η κατάσταση Power Save Class 3 επιτρέπει ένα καθορισμένο παράθυρο αναστολής και χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές για πολυεκπομπή ή διαχείριση κυκλοφορίας όταν ο κινητός σταθμός γνωρίζει πότε είναι η επόμενη κυκλοφορία δεδομένων. Εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στο κινητό σταθμό, η κατάσταση αναστολής λειτουργίας εξοικονομεί πόρους για τον σταθμό βάσης. Για τη διευκόλυνση της μεταπομπής κατά τη κατάσταση αναστολής, ο ΚΣ μπορεί να σαρώσει άλλους σταθμούς βάσης για να συλλέξει πληροφορίες που σχετίζονται με την μεταπομπή.

Η κατάσταση αδράνειας (idle mode) υποστηρίζει ακόμα μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και είναι προαιρετική για το WiMAX. Η κατάσταση αυτή δίνει τη δυνατότητα στον κινητό σταθμό να απενεργοποιηθεί τελείως και να μην καταχωρηθεί σε κανένα σταθμό βάσης, αλλά εξακολουθεί ο ΚΣ να λαμβάνει δεδομένα εισερχόμενης κίνησης. Όταν η εισερχόμενη κίνηση δεδομένων φτάνει στον κινητό σταθμό που βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας, ο τελευταίος ειδοποιείται από μία ομάδα σταθμών βάσης που αποτελούν την ομάδα

ειδοποίησης. Ο ΚΣ καταχωρείται σε μία ομάδα ειδοποίησης από το σταθμό βάσης προτού εισέλθει σε κατάσταση αδράνειας, και στη συνέχεια «ξυπνάει» κατά διαστήματα για να ενημερώσει την ομάδα ειδοποίησής του. Η κατάσταση αδράνειας εξοικονομεί περισσότερη ενέργεια από την κατάσταση αναστολής λειτουργίας, επειδή ο ΚΣ δεν χρειάζεται να καταχωρείται σε ΣΒ ή να εκτελεί μεταπομπές. Επίσης, η κατάσταση αδράνειας ωφελεί το δίκτυο και το σταθμό βάσης γιατί εξαλείφει την κυκλοφορία μεταπομπής και τους ανενεργούς κινητούς σταθμούς.

#### 2.4.3. Υποστήριξη κινητικότητας

Εκτός από τη σταθερή ευρυζωνική πρόσβαση, το WiMAX έρχεται αντιμέτωπο και με τέσσερα σενάρια που αφορούν την κινητικότητα και περιγράφονται παρακάτω:

1. **Νομαδική:** Ο χρήστης επιτρέπεται να έχει έναν σταθερό σταθμό συνδρομητών και μπορεί να επανασυνδέεται από ένα διαφορετικό σημείο.
2. **Φορητή:** Η νομαδική πρόσβαση παρέχεται σε μία φορητή συσκευή, όπως για παράδειγμα μία κάρτα PC, με την προσδοκία μίας μεταπομπής βέλτιστης προσπάθειας.
3. **Απλή κινητικότητα:** Ο συνδρομητής μπορεί να κινείται με ταχύτητες ως 60 χιλιόμετρα ανά ώρα με σύντομες διακοπές (λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο) κατά την μεταπομπή.
4. **Πλήρης κινητικότητα:** Κινητικότητα με ταχύτητες ως 120 χιλιόμετρα ανά ώρα και απρόσκοπτη μεταπομπή (καθυστερήση μικρότερη από 50 ms και απώλεια πακέτων <1%).

Το πιο πιθανό είναι ότι τα δίκτυα WiMAX θα αναπτυχθούν αρχικά για σταθερές και νομαδικές εφαρμογές και στη συνέχεια θα εξελιχθούν σταδιακά ώστε να υποστηρίξουν φορητότητα και πλήρη κινητικότητα.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 ορίζει ένα πλαίσιο για την υποστήριξη της διαχείρισης κινητικότητας. Ειδικότερα, ορίζει μηχανισμούς ειδοποίησης για να εντοπίζει ενεργούς σταθμούς συνδρομητών που μετακινούνται από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης σε άλλον ή όταν είναι αδρανείς και μετακινούνται από μία ομάδα ειδοποίησης σε άλλη. Το πρότυπο αυτό διαθέτει επίσης πρωτόκολλα για απρόσκοπτη μεταπομπή συνδέσεων από έναν σταθμό βάσης σε άλλον. Το WiMAX Forum χρησιμοποιεί το πλαίσιο εργασίας που ορίζεται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005 για να αναπτύξει περαιτέρω τη διαχείριση της κινητικότητας μέσα σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αρχιτεκτονικής δικτύου. Συνάμα, η αρχιτεκτονική υποστηρίζει την κινητικότητα σε επίπεδο IP, χρησιμοποιώντας κινητό IP.

Τρεις μέθοδοι μεταπομπής υποστηρίζονται στο IEEE 802.16e-2005, από τις οποίες η μία είναι υποχρεωτική και οι άλλες δύο είναι προαιρετικές. Η υποχρεωτική μέθοδος μεταπομπής ονομάζεται *σκληρή μεταπομπή* (Hard Handover – HHO) και είναι ο μόνος τύπος που απαιτείται να υλοποιηθεί από το κινητό WiMAX αρχικά. Η HHO υπονοεί μία απότομη μεταφορά σύνδεσης από ένα σταθμό βάσης σε άλλον. Οι αποφάσεις για την μεταπομπή προέρχονται από το σταθμό βάσης, τον κινητό σταθμό ή άλλη οντότητα, βασιζόμενες στα αποτελέσματα μέτρησης που αναφέρονται από τον κινητό σταθμό. Ο ΚΣ εκτελεί σε τακτά χρονικά διαστήματα μία σάρωση ραδιοκυματικών συχνοτήτων (RF) και υπολογίζει την ποιότητα σήματος των γειτονικών σταθμών βάσης. Επίσης, κατά τη διάρκεια αυτών των διαλειμμάτων, ο κινητός σταθμός μπορεί, προαιρετικά, να πραγματοποιεί αρχικό συγχρονισμό και να συσχετίζεται με έναν ή περισσότερους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Όταν πραγματοποιηθεί μία απόφαση μεταπομπής, ο κινητός σταθμός αρχίζει τον συγχρονισμό με τη γραμμή εισερχόμενης κίνησης (downlink) του σταθμού βάσης που έχει ως στόχο, εκτελεί συγχρονισμό αν δεν τον έκανε πριν τη σάρωση και τερματίζει τη σύνδεση με τον προηγούμενο ΣΒ. Τα MPDUs που δεν παραδόθηκαν στον σταθμό βάσης διατηρούνται μέχρι να λήξει ένας χρονομετρητής.

Οι δύο προαιρετικές μέθοδοι μεταπομπής που υποστηρίζονται στο πρότυπο IEEE 802.16e-2005 είναι η *γρήγορη εναλλαγή σταθμών βάσης* (Fast Base Station Switching – FBSS) και η *μεταπομπή εκτεταμένης ποικιλότητας* (Macro Diversity Handover – MDHO). Στις δύο αυτές μεθόδους, ο ΚΣ διατηρεί μία λίστα από τους εμπλεκόμενους ΣΒ, η οποία ονομάζεται *ενεργό σύνολο* (active set). Ο κινητός σταθμός παρακολουθεί συνεχώς το ενεργό σύνολο, εκτελεί συγχρονισμό και διατηρεί ένα έγκυρο ID σύνδεσης με κάθε σταθμό βάσης. Ο ΚΣ, ωστόσο, επικοινωνεί με ένα μόνο ΣΒ που ονομάζεται ΣΒ άγκυρας (anchor BS). Όταν απαιτείται αλλαγή του ΣΒ άγκυρας, η σύνδεση εναλλάσσεται από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλο, χωρίς να χρειάζεται ειδοποίηση για μεταπομπή. Ο κινητός σταθμός απλά αναφέρει τον επιλεγμένο ΣΒ άγκυρας στο CQICH.

Η μεταπομπή εκτεταμένης ποικιλότητας είναι παρόμοια με την FBSS, με μόνη διαφορά ότι ο κινητός σταθμός επικοινωνεί στα κανάλια εισερχόμενης και εξερχόμενης κίνησης ταυτόχρονα με όλους τους σταθμούς βάσης που υπάρχουν στο ενεργό σύνολο (ονομάζεται και σύνολο ποικιλότητας). Στο κανάλι εισερχόμενης κίνησης, πολλαπλά αντίγραφα που λαμβάνονται από τον κινητό σταθμό συνδυάζονται, χρησιμοποιώντας γνωστές τεχνικές συνδυασμού ποικιλότητας. Στο κανάλι εξερχόμενης κίνησης, όπου ο ΚΣ στέλνει δεδομένα σε πολλαπλούς ΣΒ, εκτελείται επιλογή ποικιλότητας για την ενεργοποίηση του καλύτερου καναλιού.

Οι FSBB και MDHO προσφέρουν κορυφαία απόδοση σε σχέση με την HHO, αλλά απαιτούν από τους ΣΒ να συγχρονίζονται στο ενεργό σύνολο ή σύνολο ποικιλότητας, να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα φορέα και να μοιράζονται πληροφορίες που σχετίζονται με την είσοδο στο δίκτυο. Η υποστήριξη των μεθόδων FBSS και MDHO στα δίκτυα WiMAX δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη πλήρως και δεν αποτελεί μέρος των προδιαγραφών δικτύου Release 1 του WiMAX Forum.

#### 2.4.4. Λειτουργίες ασφάλειας

Σε αντίθεση με το Wi-Fi, τα συστήματα WiMAX σχεδιάστηκαν από την αρχή να προσφέρουν ισχυρή ασφάλεια. Το πρότυπο περιλαμβάνει σύγχρονες μεθόδους που εξασφαλίζουν το απόρρητο των δεδομένων των χρηστών και αποτρέπουν τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, με επιπλέον βελτιστοποίηση πρωτοκόλλου για την κινητικότητα. Ένα υποεπίπεδο ιδιωτικότητας μέσα στο επίπεδο MAC του WiMAX διαχειρίζεται την ασφάλεια. Οι πιο σημαντικές πτυχές της είναι οι εξής:

**Υποστήριξη ιδιωτικότητας:** Τα δεδομένα των χρηστών κρυπτογραφούνται με τη χρήση συστημάτων κρυπτογράφησης αποδεδειγμένης ανθεκτικότητας ώστε να παρέχουν ιδιωτικότητα. Υποστηρίζονται το πρότυπο προηγμένης κρυπτογράφησης (Advanced Encryption Standard – AES) και το πρότυπο τριπλής κρυπτογράφησης δεδομένων (Triple Data Encryption Standard – 3DES). Το πιθανότερο είναι οι περισσότερες υλοποιήσεις συστημάτων να χρησιμοποιούν το πρότυπο AES, καθότι είναι το νέο πρότυπο κρυπτογράφησης που εγκρίθηκε ως συμβατό με το ομοσπονδιακό πρότυπο επεξεργασίας δεδομένων (Federal Information Processing Standard – FIPS) και είναι πιο εύκολο να υλοποιηθεί. Το κλειδί 128-bit ή 256-bit που χρησιμοποιείται για την παραγωγή του κρυπτογραφήματος δημιουργείται κατά τη φάση αυθεντικοποίησης και αλλάζει συχνά για επιπλέον προστασία.

**Αυθεντικοποίηση συσκευής/χρήστη:** Το WiMAX παρέχει ένα ευέλικτο μέσο για την αυθεντικοποίηση σταθμών συνδρομητών και χρηστών, προκειμένου να αποτρέψει την μη εξουσιοδοτημένη χρήση. Το πλαίσιο λειτουργίας της αυθεντικοποίησης βασίζεται στις προδιαγραφές EAP της ομάδας εργασίας μηχανικών για το διαδίκτυο (Internet Engineering Task Force – IETF) και υποστηρίζει διάφορα διαπιστευτήρια, όπως όνομα χρήστη, κωδικό πρόσβασης, ψηφιακά πιστοποιητικά και έξυπνες κάρτες. Οι τερματικές συσκευές του WiMAX ενσωματώνουν ψηφιακά πιστοποιητικά X.509 που περιέχουν το δημόσιο κλειδί και την διεύθυνση MAC που αντιστοιχεί σε κάθε μία. Οι διαχειριστές του WiMAX μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πιστοποιητικά για αυθεντικοποίηση συσκευών. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιήσουν και έναν συνδυασμό ονόματος χρήστη και κωδικού πρόσβασης ή μία έξυπνη κάρτα για επιπρόσθετη αυθεντικοποίηση πέρα από την αρχική.

**Ευέλικτο πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιού:** Το Πρωτόκολλο Ιδιωτικότητας και Διαχείρισης κλειδιού Έκδοση 2 (Privacy and Key Management Protocol Version 2 –PKMv2) χρησιμοποιείται για ασφαλή μεταφορά κλειδιών από το σταθμό βάσης στον κινητό σταθμό, με συχνή αναθεώρηση και ανανέωση των κλειδιών. Το PKM είναι ένα πρωτόκολλο πελάτη-εξυπηρετή (client-server): Ο κινητός σταθμός λειτουργεί ως πελάτης και ο σταθμός βάσης ως διακομιστής. Το PKM χρησιμοποιεί ψηφιακά πιστοποιητικά X.509 και αλγορίθμους κρυπτογράφησης δημόσιου κλειδιού RSA (Rivest-Shamer-Adleman) για να εκτελεί ασφαλές ανταλλαγές κλειδιών μεταξύ ΣΒ και ΚΣ.

**Προστασία μηνυμάτων ελέγχου:** Η ακεραιότητα των μηνυμάτων ελέγχου που



μεταδίδονται ασύρματα προστατεύεται χρησιμοποιώντας συστήματα σύνοψης μηνυμάτων, όπως το CMAC (κώδικας αυθεντικοποίησης μηνύματος βάσει κρυπτογραφήματος) που βασίζεται στο AES ή το HMAC (κώδικας αυθεντικοποίησης μηνύματος βάσει κατακερματισμού) που βασίζεται στο MD5 (αλγόριθμος σύνοψης μηνύματος 5). Όλα τα πρωτόκολλα τυποποιούνται από την ομάδα IETF.

**Υποστήριξη γρήγορης μεταπομπής:** Το WiMAX, προκειμένου να υποστηρίξει γρήγορες μεταπομπές, επιτρέπει στον κινητό σταθμό να χρησιμοποιεί προκαταρκτικό έλεγχο αυθεντικοποίησης με ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης, ώστε να διευκολύνει τη γρήγορη επανεισαγωγή. Ένα σύστημα τριμερούς χειραψίας υποστηρίζεται για να βελτιστοποιηθούν οι μηχανισμοί αυθεντικοποίησης εκ νέου ώστε να υποστηρίζουν γρήγορες μεταπομπές, ενώ ταυτόχρονα αποτρέπει τις ενδιάμεσες επιθέσεις.

#### 2.4.5. Υπηρεσίες πολυεκπομπής και ευρείας εκπομπής (Multicast – Broadcast)

Το επίπεδο MAC του κινητού WiMAX υποστηρίζει υπηρεσίες πολυεκπομπής και ευρείας εκπομπής (Multicast and Broadcast Services - MBS). Οι λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις υπηρεσίες MBS και υποστηρίζονται από το πρότυπο είναι:

- Μηχανισμοί ειδοποίησης για να μπορεί ο ΜΣ να κάνει αίτηση και να δημιουργεί MBS.
- Πρόσβαση του σταθμού συνδρομητών σε υπηρεσίες MBS μέσω ενός ή πολλών ΣΒ, ανάλογα με τις δυνατότητες και τις επιθυμίες του.
- MBS που σχετίζεται με ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και κρυπτογράφηση, χρησιμοποιώντας ένα παγκόσμια καθορισμένο κλειδί κρυπτογράφησης δεδομένων.
- Μία ξεχωριστή ζώνη μέσα στο πλαίσιο MAC με τις δικές της πληροφορίες MAP για την κυκλοφορία MBS.
- Μέθοδοι για παράδοση δεδομένων MBS σε αδρανείς σταθμούς συνδρομητών.
- Υποστήριξη για ποικιλότητα μεγάλης κλίμακας προκειμένου να βελτιωθούν οι επιδόσεις της παράδοσης των δεδομένων MBS.

### Κεφάλαιο 3. Αλγόριθμοι Κατανομής Πόρων σε συστήματα OFDMA

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι με τους οποίους μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την ποικιλότητα πολλαπλών χρηστών και την προσαρμοστική διαμόρφωση στα συστήματα OFDMA. Οι αλγόριθμοι που εκμεταλλεύονται αυτά τα κέρδη δεν προσδιορίζονται από το πρότυπο WiMAX και έτσι οι προγραμματιστές του WiMAX είναι ελεύθεροι να αναπτύξουν τις δικές τους καινοτόμες διαδικασίες. Το θέμα είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων που θα καθορίζουν ποιοι χρήστες θα προγραμματίζονται, πώς θα κατανέμονται οι υποφορείς σε αυτούς και πώς θα καθορίζονται τα κατάλληλα επίπεδα ισχύος για κάθε χρήστη σε κάθε υποφορέα. Σ' αυτό το κεφάλαιο, λοιπόν, θα μελετήσουμε μερικές από τις πιο πιθανές προσεγγίσεις για την κατανομή πόρων. Θα επικεντρωθούμε στην κατηγορία των τεχνικών οι οποίες επιχειρούν να εξισορροπήσουν την επιθυμία για υψηλή απόδοση με δικαιοσύνη μεταξύ των χρηστών στο σύστημα.

Αναφορικά με το σύστημα OFDMA για τη ζεύξη εισερχόμενης κίνησης (downlink), οι χρήστες εκτιμούν και επιστρέφουν πληροφορίες για τη κατάσταση του καναλιού (CSI) σε έναν κεντρικό σταθμό βάσης, όπου η κατανομή υποφορέων και ισχύος καθορίζονται σύμφωνα με το CSI των χρηστών και με τη διαδικασία κατανομής πόρων. Όταν καθοριστούν οι υποφορείς για κάθε χρήστη, ο σταθμός βάσης πρέπει να ενημερώσει τον κάθε χρήστη ποιοι υποφορείς του έχουν εκχωρηθεί. Αυτή η αντιστοίχιση υποφορέα πρέπει να μεταδοθεί σε όλους τους χρήστες, κάθε φορά που αλλάζει η κατανομή πόρων. Συνήθως η κατανομή πόρων πρέπει να εκτελείται ανάλογα με το χρόνο συνάφειας (coherence time) του καναλιού, αν και μπορεί να εκτελείται πιο συχνά, αν υπάρχουν πολλοί χρήστες που ανταγωνίζονται για τους πόρους.

Η κατανομή πόρων συνήθως διαμορφώνεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς, όπου (1) ελαχιστοποιείται η συνολική ισχύς εκπομπής με έναν περιορισμό στο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων χρηστών ή (2) μεγιστοποιείται ο συνολικός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων με έναν περιορισμό στη συνολική ισχύ εκπομπής. Ο πρώτος αντικειμενικός στόχος είναι κατάλληλος για εφαρμογές σταθερού ρυθμού μετάδοσης, όπως φωνή, ενώ ο δεύτερος είναι πιο κατάλληλος για εφαρμογές με ρυθμό μετάδοσης κατά ριπές, όπως δεδομένα και άλλες εφαρμογές IP. Επομένως, στο κεφάλαιο αυτό, θα εστιάσουμε στους αλγόριθμους που αφορούν στο ρυθμό μετάδοσης (κατηγορία 2), οι οποίοι είναι πιο σχετικοί με τα συστήματα WiMAX.

Ο στόχος είναι να αξιοποιήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα το διαθέσιμο εύρος ζώνης, το οποίο είναι δομημένο ως ένα ορθογώνιο δύο διαστάσεων (η μία διάσταση είναι ο χρόνος και η άλλη η συχνότητα). Η λειτουργία, λοιπόν, κατανομής πόρων στα συστήματα OFDMA είναι η εξής: Ο χρονοπρογραμματιστής (scheduler) λαμβάνει τις αιτήσεις (requests) που προέρχονται από τους κινητούς σταθμούς και καθορίζει μία αρχική διανομή εύρους ζώνης, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις των συνδρομητών και την ευαισθησία των δεδομένων, έτσι ώστε να υποστηριχθεί και η παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS). Ωστόσο, η τελική κατανομή του εύρους ζώνης γίνεται από έναν μηχανισμό αντιστοίχισης (mapper). Ο μηχανισμός της αντιστοίχισης συγκεντρώνει τις αιτήσεις που προωθούνται από τον

χρονοπρογραμματιστή και δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα μετάδοσης, ορίζοντας ακριβώς το χρόνο και τη συχνότητα για τη μετάδοση και λήψη δεδομένων για κάθε συνδεδεμένο κινητό σταθμό. Κάθε αίτηση διαμορφώνεται σε ορθογώνιο σχήμα μέσα στον OFDMA κάδο κατανομής, έχοντας τη μία διάσταση του ορθογωνίου συνδεδεμένη με το πεδίο του χρόνου και την άλλη διάσταση συνδεδεμένη με το πεδίο της συχνότητας. Οι αιτήσεις που αποτυγχάνουν να κατανεμηθούν επιστρέφουν στον χρονοπρογραμματιστή και η μετάδοσή τους αναβάλλεται για τουλάχιστον ένα ολόκληρο πλαίσιο (frame). Η οπισθοδρόμηση αυτή (regression) προκαλεί μειωμένη αποδοτικότητα ως προς τη συνολική καθυστέρηση του δικτύου, το χρόνο επεξεργασίας και την κατανάλωση των πόρων. Προκειμένου να αποφευχθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι συνέπειες της οπισθοδρόμησης, θα πρέπει να σχεδιάσουμε και να διαχειριστούμε τη διαδικασία της αντιστοίχισης (mapping) προσεκτικά.

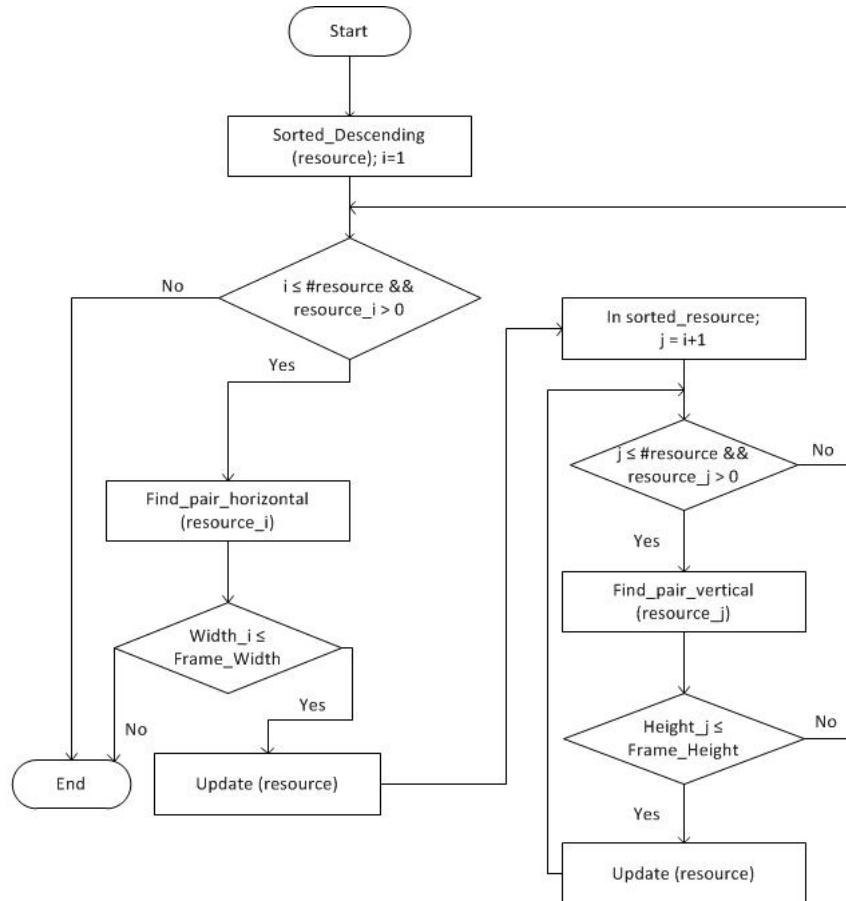
Οι υφιστάμενες προσεγγίσεις κατανομής πόρων στη σχετική ερευνητική βιβλιογραφία δεν είναι ευέλικτες και μελετούν τις απαιτήσεις των συνδρομητών από μία πλευρά. Οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαφοροποίηση στη ζήτηση εύρους ζώνης και έτσι υποφέρουν είτε από ανεπαρκή αξιοποίηση του καναλιού σε συνθήκες χαμηλής κίνησης δεδομένων, είτε από υψηλά επίπεδα μη εξυπηρετούμενων αιτήσεων σε συνθήκες υψηλής κίνησης δεδομένων. Οι αδυναμίες αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν από έναν ισχυρό και αποτελεσματικό αλγόριθμο κατανομής πόρων όπως θα δούμε παρακάτω.

### **3.1. Αλγόριθμος OCSA (One Column Striping with non-increasing Area first mapping)**

Ο OCSA είναι ένας από τους πιο πρόσφατους και αποδοτικούς αλγόριθμους κατανομής πόρων (burst mapping) που βασίζεται σε ορθογώνια δύο διαστάσεων (η μία διάσταση αφορά το χρόνο και η άλλη τη συχνότητα). Δημιουργεί, δηλαδή, ορθογώνια κατανομής μέσα στον OFDMA κάδο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δυνατά ζευγάρια διαστάσεων του ορθογωνίου κατανομής για κάθε συγκεκριμένη ριπή. Το πρόβλημα της κατανομής πόρων με βάση τον OSCA χωρίζεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, ο χρονοπρογραμματιστής (scheduler) υπολογίζει την κατανομή του κάθε χρήστη με βάση τη ζήτηση, την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσιών (απόδοση και καθυστέρηση) και τη διαθέσιμη χωρητικότητα. Ο περιορισμός της κατανομής σε ορθογώνια δεν λαμβάνεται υπόψη στο πρώτο βήμα αλλά αποτελεί τη βασική διαδικασία του δεύτερου βήματος.

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση, η κατανομή των αιτήσεων (requests) γίνεται κατά φθίνουσα σειρά (από τη μεγαλύτερη στη μικρότερη). Για να υπάρξει χώρος για διάφορα τμήματα των περιοχών (maps) άνω και κάτω ζεύξης, η κατανομή των αιτήσεων γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω στο υποπλαίσιο της κάτω ζεύξης (DL subframe). Έχοντας μια περιοχή ριπής, υπάρχουν αρκετοί συνδυασμοί του ύψους και του πλάτους της. Ο OSCA επιλέγει τον συνδυασμό με το ελάχιστο πλάτος. Με

αυτό τον τρόπο ο ΚΣ που λαμβάνει τα δεδομένα μπορεί να τερματίσει τη λειτουργία του ηλεκτρονικού κυκλώματος για το μεγαλύτερο μέρος του υπολοίπου του DL υποπλασίου, εξοικονομώντας με αυτόν τον τρόπο ενέργεια. [24]



Σχήμα 6: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου OCSA [24]

Ο αλγόριθμος, λοιπόν, έχει τρία βήματα. Το πρώτο βήμα (1<sup>ο</sup>) είναι ότι έχουμε μια κατανομή από αιτήσεις (resource allocations)  $\{A_i\}$  σε φθίνουσα σειρά.

Το επόμενο βήμα (2<sup>ο</sup>) αποτελείται από την τοποθέτηση αυτής της κατανομής (allocation) στο υποπλαίσιο εισερχόμενης κίνησης (DL subframe). Ο αλγόριθμος επιλέγει τη μεγαλύτερη αίτηση (request) από τη κατανομή  $A_i$  η οποία μπορεί να τοποθετηθεί στο χώρο που δεν χρησιμοποιείται (unused space). Στη συνέχεια, υπολογίζει τις διαστάσεις του ύψους και του πλάτους της αίτησης με βάση τη σχέση:  $W_{ij} \times H_{ij} = A_i$ . Ο μόνος περιορισμός είναι ότι το πλάτος της αίτησης ( $W_{ij}$ ) θα πρέπει να είναι μικρότερο από το διαθέσιμο πλάτος του DL υποπλασίου και αντίστοιχα, το ύψος της αίτησης ( $H_{ij}$ ) να είναι μικρότερο από το ύψος του DL υποπλασίου. Για παράδειγμα, εάν η αίτηση ισούται με 40, τα δυνατά ζευγάρια του ύψους και του πλάτους είναι: 2×20, 4×10, 5×8, 8×5 και 10×4. Τα ζευγάρια 1×40, 20×2 και 40×1 δεν είναι εφικτά γιατί το ύψος ή το πλάτος τους υπερβαίνει το μέγεθος του DL υποπλασίου. Στο παράδειγμά μας, το ύψος και πλάτος του DL υποπλασίου είναι 30 και 12

αντίστοιχα. Έχοντας αρκετά διαθέσιμα ζευγάρια, ο αλγόριθμος επιλέγει αυτό με το μικρότερο πλάτος. Έτσι, βοηθάει τον ΚΣ να εξοικονομήσει ενέργεια.

Στη συνέχεια, ας πούμε ότι έχουμε μια αίτηση που αντί για 40 είναι 37. Σαν αποτέλεσμα, δεν υπάρχουν εφικτά ζευγάρια διαστάσεων τοποθέτησης. Σε αυτό το βήμα (3<sup>ο</sup>), ο αλγόριθμος επιλέγει το ζευγάρι που καταλαμβάνει το μικρότερο δυνατό επιπλέον χώρο προκειμένου να τοποθετηθεί η αίτηση. Δοκιμάζοντας, λοιπόν, όλα τα διαθέσιμα πλάτη (από το 2 στο 12) έχουμε: 2×19, 3×13, 4×10, 5×8, 6×7, 7×6, 8×5, 9×5, 10×4, 11×4, 12×4. Τοποθετώντας, έπειτα, την αίτηση 37 στις προηγούμενες διαστάσεις θα απομείνουν 1, 2, 3, 3, 5, 5, 3, 8, 3, 7 και 11 σχισμές (slots), αντίστοιχα. Οι περιορισμοί του μέγιστου επιτρεπτού πλάτους και ύψους ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση. Επομένως, το μέγεθος του διαθέσιμου χώρου καθορίζει την κατανομή πόρων. Για παράδειγμα, η αίτηση 35 μπορεί να καταναμηθεί σαν 5×7 ή 7×5. Καμία από τις δύο αυτές διαστάσεις δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν ο ελεύθερος χώρος που ισούται με 90 είναι διαθέσιμος με διαστάσεις 3×30. Σε κάθε περίπτωση, ο OSCA επιλέγει το ζευγάρι διαστάσεων που καταλαμβάνει το μικρότερο δυνατό επιπλέον χώρο προκειμένου να τοποθετηθεί η κάθε αίτηση της κατανομής. Στο παράδειγμα που θέσαμε, λοιπόν, θα επιλεγεί σύμφωνα με τον αλγόριθμο OSCA το ζευγάρι διαστάσεων 2×19 προκειμένου να τοποθετηθεί στο DL υποπλαίσιο η αίτηση 37, δεσμεύοντας αναγκαστικά μία επιπλέον σχισμή (slot).

Αφού μια κατανομή τοποθετηθεί στο DL υποπλαίσιο, κάποιος χώρος πάνω από τις καταναμημένες ριπές μπορεί να μείνει ελεύθερος. Στο τρίτο βήμα (3<sup>ο</sup>) του αλγορίθμου OCSA (κατακόρυφη τοποθέτηση), ο OCSA προσπαθεί να εκμεταλλευτεί τον διαθέσιμο αυτό χώρο, προτού μετακινηθεί στο επόμενο DL υποπλαίσιο. Ψάχνει, λοιπόν, για τη μεγαλύτερη αίτηση της κατανομής που μπορεί να χωρέσει στο διαθέσιμο αυτό χώρο πάνω από τις ριπές. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εστιάζει σε αιτήσεις με χαμηλότερο ύψος και μεγαλύτερο πλάτος προκειμένου να τις τοποθετήσει στον χώρο αυτό. Εάν βρεθεί κάποια, πραγματοποιείται η τοποθέτηση και ο αλγόριθμος συνεχίζει τη κατακόρυφη τοποθέτηση έως ότου να μην υπάρχει άλλη αίτηση που να μπορεί να τοποθετηθεί στο χώρο αυτό του DL υποπλαισίου. Τέλος, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο δεύτερο βήμα και επιλέγει την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση προκειμένου να την τοποθετήσει αυτή τη φορά οριζόντια στο DL υποπλαίσιο.

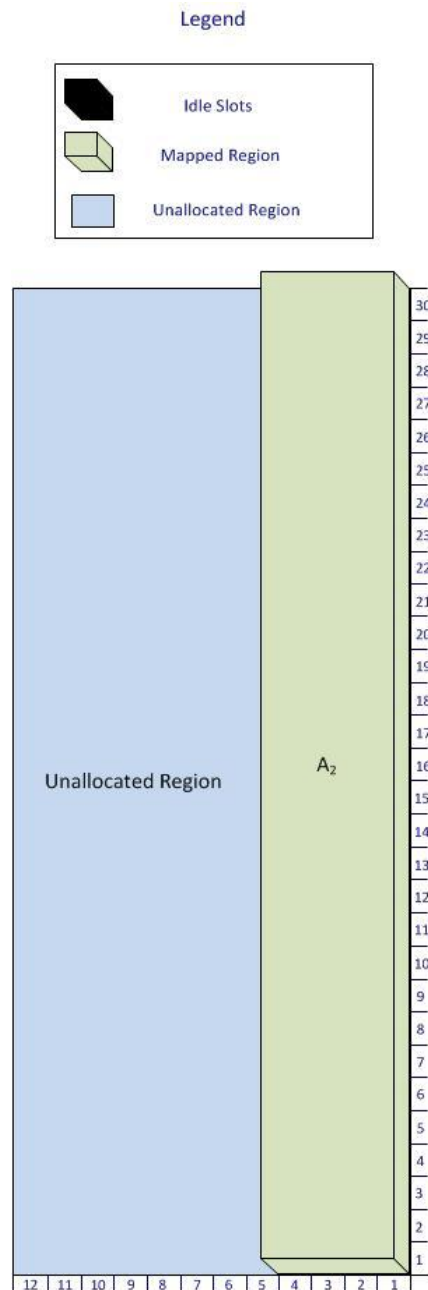
### 3.1.1. Παράδειγμα αλγορίθμου OCSA

Το μέγεθος του DL υποπλαισίου είναι σε αυτή τη περίπτωση 12×30 ή 360 σχισμές (slots). Ο παρακάτω Πίνακας 6 απεικονίζει ένα παράδειγμα για 7 αιτήσεις (MSs). Το άθροισμα όλων των αιτήσεων είναι 360.

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>
Allocations	55	120	89	72	11	9	4
Possible Mapping Pairs	5x11 11x5	<b>4x30</b> 5x24 6x20 8x15 10x12 12x10		<b>3x24</b> 4x18 6x12 8x9 9x8 12x6	1x11 11x1	1x9 3x3 9x1	1x4 <b>2x2</b> 4x2 8x1

**Πίνακας 6:** Πίνακας αιτήσεων κατανομής πόρων

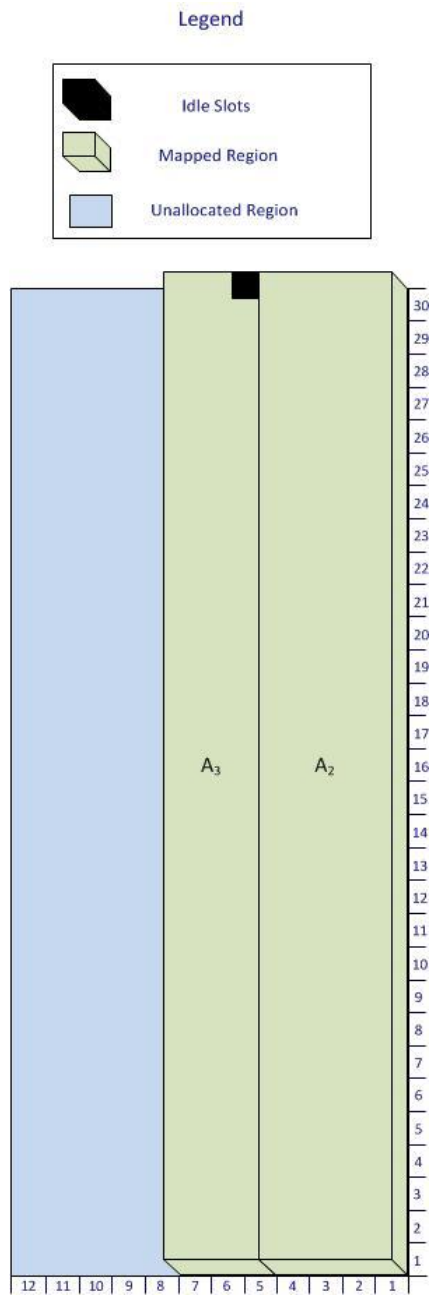
Σε πρώτη φάση, ο OCSA τοποθετεί τις παραπάνω αιτήσεις σε φθίνουσα σειρά. Επομένως, το αποτέλεσμα είναι: A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub>, A<sub>1</sub>, A<sub>5</sub>, A<sub>6</sub>, A<sub>7</sub>. Η τοποθέτηση στο DL υποπλαίσιο, όπως αναφέραμε και παραπάνω, γίνεται από δεξιά προς τα αριστερά και από κάτω προς τα πάνω. Η αίτηση A<sub>2</sub> επιλέγεται πρώτη και με βάση το παραπάνω Πίνακα 6 ο αλγόριθμος OCSA επιλέγει το ζεύγος διαστάσεων 4x30 γιατί έχει το μικρότερο πλάτος. Η τοποθέτηση της αίτησης A<sub>2</sub> απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 7:



**Σχήμα 7:** Τοποθέτηση αίτησης  $A_2$  (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA

Η τοποθέτηση της αίτησης  $A_2$  δεν αφήνει ελεύθερο χώρο στον κάδο (Bin) ή DL υποπλαίσιο πάνω από την κατανομημένη ριπή.

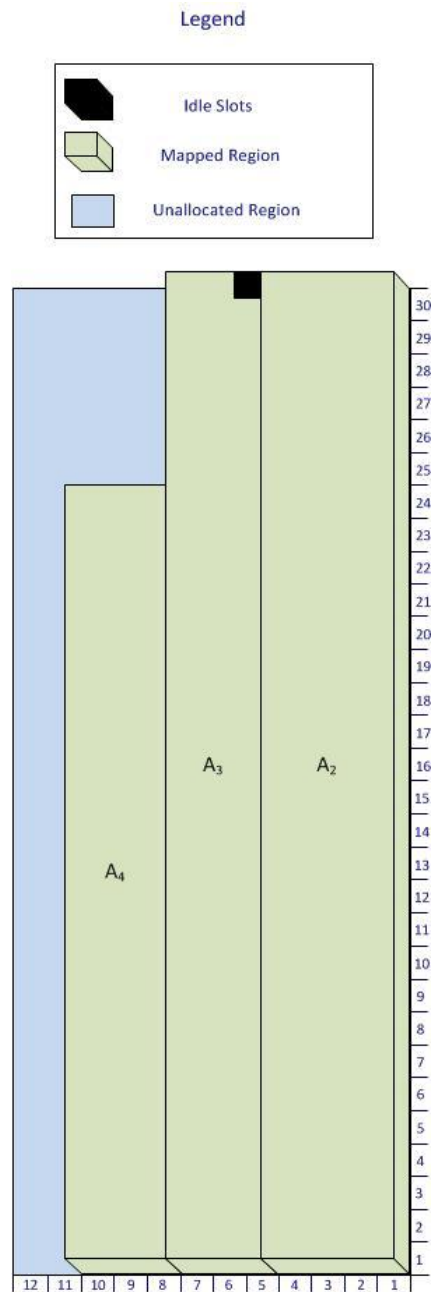
Στη συνέχεια, ο OCSA επιλέγει την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση δηλαδή την  $A_3$ . Επειδή όμως δεν υπάρχουν εφικτά ζευγάρια διαστάσεων τοποθέτησης για τη συγκεκριμένη αίτηση, ο αλγόριθμος επιλέγει το ζευγάρι που καταλαμβάνει το μικρότερο δυνατό επιπλέον χώρο προκειμένου να τοποθετηθεί η αίτηση και το οποίο ισούται με:  $3 \times 30$ . Η τοποθέτηση της αίτησης  $A_3$  απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 8:



**Σχήμα 8:** Τοποθέτηση αίτησης  $A_3$  (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA

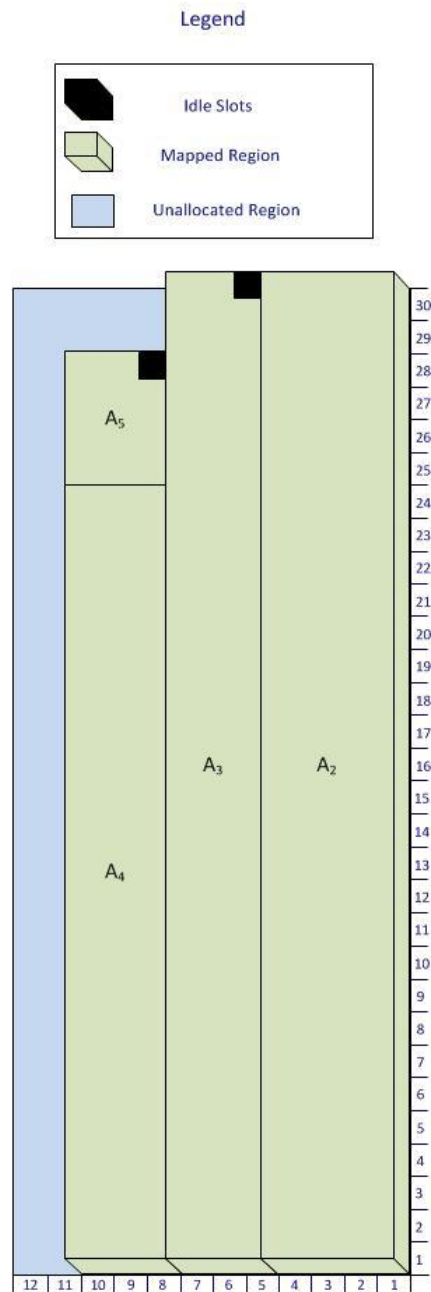
Με την τοποθέτηση της αίτησης  $A_3$  μένει μία ανεκμετάλλευτη σχισμή (idle slot). Ο αλγόριθμος συνεχίζει με την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση δηλαδή την  $A_4$  και η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 9:





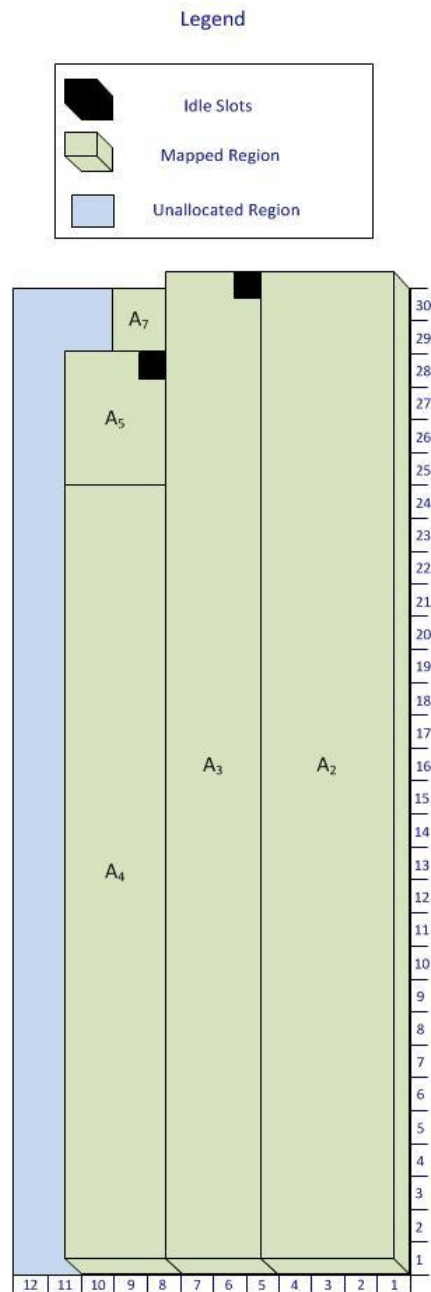
**Σχήμα 9:** Τοποθέτηση αίτησης  $A_4$  (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA

Στη συνέχεια, τοποθετείται η αίτηση  $A_5$  σύμφωνα με το βήμα 3 του αλγορίθμου OCSA στον ελεύθερο χώρο που διαμορφώθηκε πάνω από τη ριπή  $A_4$ . Η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 10:



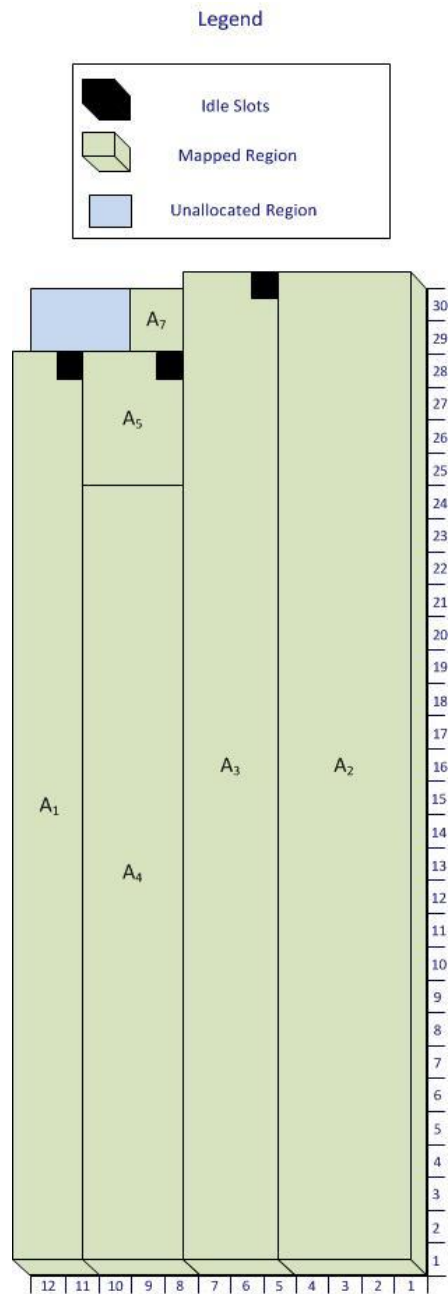
**Σχήμα 10:** Τοποθέτηση αίτησης A<sub>5</sub> (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA

Ο OCSA συνεχίζει με το βήμα 3 και τοποθετεί την αίτηση A<sub>7</sub> στον ελεύθερο χώρο που διαμορφώθηκε πάνω από τη ριπή A<sub>5</sub>. Η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 11:



**Σχήμα 11:** Τοποθέτηση αίτησης  $A_7$  (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος επιστρέφει στο βήμα 2 και τοποθετεί την αίτηση  $A_1$  στον ελεύθερο χώρο που έχει απομείνει αριστερά των ριπών. Η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 12:



**Σχήμα 12:** Τοποθέτηση αίτησης  $A_1$  (MS) με βάση τον αλγόριθμο OCSA

Τέλος, ο αλγόριθμος OCSA δεν μπορεί να τοποθετήσει την αίτηση  $A_6$  στο συγκεκριμένο DL υποπλαίσιο καθότι ο διαθέσιμος χώρος που απομένει και ισούται με 4 δεν είναι αρκετός προκειμένου να χωρέσει η αίτηση  $A_6$  που έχει μέγεθος 9. Σαν αποτέλεσμα, η συγκεκριμένη αίτηση δεν εξυπηρετείται (unserved).

### 3.1.2. Συμπεράσματα παραδείγματος αλγορίθμου OCSA

Στο παράδειγμα του OCSA που αναλύσαμε παραπάνω, στο τέλος της κατανομής των αιτήσεων ο συνολικός χώρος που παρέμεινε ανεκμετάλλευτος ισούται με 6 σχισμές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12 (μπλε χρώμα). Επιπλέον, άλλες 3 σχισμές παρέμειναν ανεκμετάλλευτες επειδή δεσμεύτηκαν προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι αιτήσεις  $A_3$ ,  $A_5$  και  $A_1$  (Σχήμα 12 – μαύρο χρώμα). Επομένως, η αποδοτικότητα (efficiency) του αλγορίθμου OCSA λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις σχισμές που δεν χρησιμοποιήθηκαν (σύνολο 9) είναι 97.50%.

### 3.2. Αλγόριθμος HBM (Horizon Burst Mapping)

Ο HBM είναι, επίσης, ένας αλγόριθμος κατανομής πόρων (burst mapping) που βασίζεται σε ορθογώνια δύο διαστάσεων και αποτελείται από δύο βήματα. Σε πρώτη φάση, ο αλγόριθμος τοποθετεί τις αιτήσεις της κατανομής, οι οποίες είναι σε φθίνουσα σειρά, στο υποπλαίσιο εισερχόμενης κίνησης (DL subframe), αφήνοντας ανεκμετάλλευτο τον ελάχιστο δυνατό χώρο (wasted space). Στη συνέχεια, δημιουργεί ορίζοντες (horizons) προκειμένου να τοποθετήσει στο DL υποπλαίσιο όσες αιτήσεις δεν μπόρεσαν να κατανεμηθούν στο πρώτο βήμα. [25]

Ο HBM, λοιπόν, ξεκινάει τοποθετώντας τις αιτήσεις κατά φθίνουσα σειρά δίνοντας έτσι προτεραιότητα στις μεγαλύτερες αιτήσεις να ταξινομηθούν πρώτα. Στη συνέχεια, ο HBM επιλέγει τις κατάλληλες διαστάσεις για κάθε αίτηση προτού ξεκινήσει την κατανομή τους στο DL υποπλαίσιο. Το βασικό κριτήριο για την επιλογή των διαστάσεων του ορθογωνίου της ριπής είναι ο ανεκμετάλλευτος χώρος (wasted space) που αφήνει κάθε αίτηση μετά την τοποθέτησή της. Ο αλγόριθμος υπολογίζει αυτό το χώρο χρησιμοποιώντας ένα δείκτη ( $W_{rest}$ ), ο οποίος υποδεικνύει το διαθέσιμο πλάτος του DL υποπλαισίου ή κάδου (downlink bin). Προτού ξεκινήσει η κατανομή των αιτήσεων, ο κάδος έχει διαστάσεις  $H \times W$ , επομένως, ο δείκτης  $W_{rest}$  λαμβάνει σαν αρχική τιμή το πλάτος του κάδου ( $W$ ). Άρα, η πρώτη αίτηση για κάθε πλαίσιο μπορεί να τοποθετηθεί σε χώρο διαστάσεων  $H \times W_{rest}$ . Υποθέτοντας ότι ο αριθμός των σχισμών (slots) της πρώτης αίτησης ( $i_{th}$ ) ισούται με  $A_i$ , το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των διαστάσεων του ορθογωνίου που θα μπει η αίτηση. Το ορθογώνιο αυτό θα έχει σαν ανώτατα όρια τις τιμές  $H$  και  $W_{rest}$  για το ύψος και το πλάτος του, αντίστοιχα. Η τοποθέτηση της ριπής ξεκινάει από το δεξί κάτω άκρο του κάδου και συνεχίζει προς την αριστερή γωνία του. Ο παρακάτω ψευδοκώδικας υποδεικνύει την πρώτη φάση του αλγορίθμου HBM.

---

**Αλγόριθμος 1: Καθορισμός οριζόντων και από δεξιά προς τα αριστερά τοποθέτηση αιτήσεων**

1: Καθορίζουμε το σετ των εισερχομένων αιτήσεων  $S=\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots\}$

2: Θέτουμε το διαθέσιμο ύψος του κάδου ίσο με  $H$

3: Θέτουμε το διαθέσιμο πλάτος του κάδου ίσο με  $W_{rest}=W$

4: **Do**

5: Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη αίτηση και τη θέτουμε ως  $A_i$

6: Βρίσκουμε το κατάλληλο πλάτος  $m$ , το οποίο ελαχιστοποιεί τις ανεκμετάλλετες σχισμές (slots) στον κάδο:

$$\arg \min_{m \in [1, W_{rest}]} (m \times \lceil A_i/m \rceil - A_i)$$

7: Κατανέμουμε την  $A_i$  στο ορθογώνιο:

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$x = W_{rest} - m, \quad y = H - \lceil A_i/m \rceil$$

Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$$\text{height} = \lceil A_i/m \rceil, \quad \text{width} = m$$

8: Θέτουμε τις προδιαγραφές του ορίζοντα  $i_{th}$ :

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$\text{Horizon}_i(x) = W_{rest} - m, \quad \text{Horizon}_i(y) = H$$

Διαστάσεις ορθογωνίου ορίζοντα  $\text{Horizon}_i$ :

$$\text{Horizon}_i(\text{height}) = H - \lceil A_i/m \rceil, \quad \text{Horizon}_i(\text{width}) = m$$

9: Ανανεώνουμε το διαθέσιμο πλάτος:  $W_{rest} = W_{rest} - m$

10: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή από το  $S$  σετ

11: Επιλέγουμε την επόμενη μεγαλύτερη ριπή από το  $S$  σετ ως  $A_i$

12: **While** ( $H \times W_{rest} < A_i$  OR  $S \in \emptyset$ )

---

Στο τέλος της πρώτης φάσης, ένα σετ από ορίζοντες έχει καθοριστεί και τουλάχιστον μία ριπή έχει κατανεμηθεί. Κάθε ορίζοντας υποδεικνύει μία ανεκμετάλλευτη δισδιάστατη ορθογωνική περιοχή. Στη συνέχεια, η δεύτερη φάση ξεκινάει, κατά την οποία ο HBM προσπαθεί να τοποθετήσει τις εναπομείναντες αιτήσεις στους ορίζοντες. Ο αλγόριθμος ψάχνει τον κατάλληλο ορίζοντα που ελαχιστοποιεί τις ανεκμετάλλευτες σχισμές και τοποθετεί σ' αυτόν την αίτηση. Έπειτα, οι διαστάσεις του ορίζοντα υπολογίζονται ξανά και η συγκεκριμένη αίτηση διαγράφεται από το σετ της κατανομής. Ο HBM συνεχίζει έως ότου τοποθετήσει όλες αιτήσεις χωράνε στους ορίζοντες. Ο παρακάτω ψευδοκώδικας υποδεικνύει την δεύτερη φάση του αλγορίθμου HBM.

---

### **Αλγόριθμος 2: από κάτω προς τα πάνω τοποθέτηση εναπομείναντων αιτήσεων**

- 1: Καθορίζουμε το σετ των εναπομείναντων αιτήσεων  $S'=\{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots\}$
- 2: Για κάθε εναπομείνουσα αίτηση (**For** {each remaining unmapped request})
- 3: Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη αίτηση και τη θέτουμε ως  $A_j$
- 4: Για κάθε ορίζοντα για τον οποίο ισχύει:

$$Horizon(height) \times Horizon(width) \geq A_j$$

Επιλέγουμε τον ορίζοντα  $Horizon_q$  ο οποίος ελαχιστοποιεί τις ανεκμετάλλευτες σχισμές, κατανένοντας την αίτηση  $A_j$ :

$$\arg \min_q (Horizon_q(width) \times \left\lceil \frac{A_j}{Horizon_q(width)} \right\rceil \text{MOD} A_j)$$

- 5: Κατανέμουμε την  $A_j$  στο ορθογώνιο:

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$x = Horizon_q(x), \quad y = Horizon_q(height) - \lceil A_j / Horizon_q(width) \rceil$$

Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$$height = \lceil A_j / Horizon_q(width) \rceil, \quad width = (Horizon_q(width))$$

- 6: Ενημερώνουμε τις προδιαγραφές του ορίζοντα  $q_{th}$ :

Το πάνω αριστερό άκρο παραμένει ίδιο στον κάδο:

Διαστάσεις ορθογωνίου ορίζοντα:

$$Horizon_q(height) = Horizon_q(height) - \lceil A_j / Horizon_q(width) \rceil,$$

Το πλάτος  $\text{Horizon}_q$  (width) παραμένει ίδιο

7: Αφαιρούμε την κατανομημένη ριπή από το  $S'$  σετ

8: Επιλέγουμε την επόμενη μεγαλύτερη ριπή από το  $S'$  σετ ως  $A_j$

9: Τέλος αλγορίθμου HBM (**End\_for**)

---

### 3.2.1. Παράδειγμα αλγορίθμου HBM

Υποθέτουμε ότι δέκα τυχαίοι κινητοί σταθμοί (MSs) συνδέονται στο σταθμό βάσης (BS). Ο παρακάτω Πίνακας 7 υποδεικνύει τις δέκα αυτές αιτήσεις, οι οποίες θα κατανομηθούν σε ένα DL υποπλαίσιο ή κάδο με διαστάσεις: ύψος 30 και πλάτος 27, δηλαδή 30x27 (810 συνολικά σχισμές).

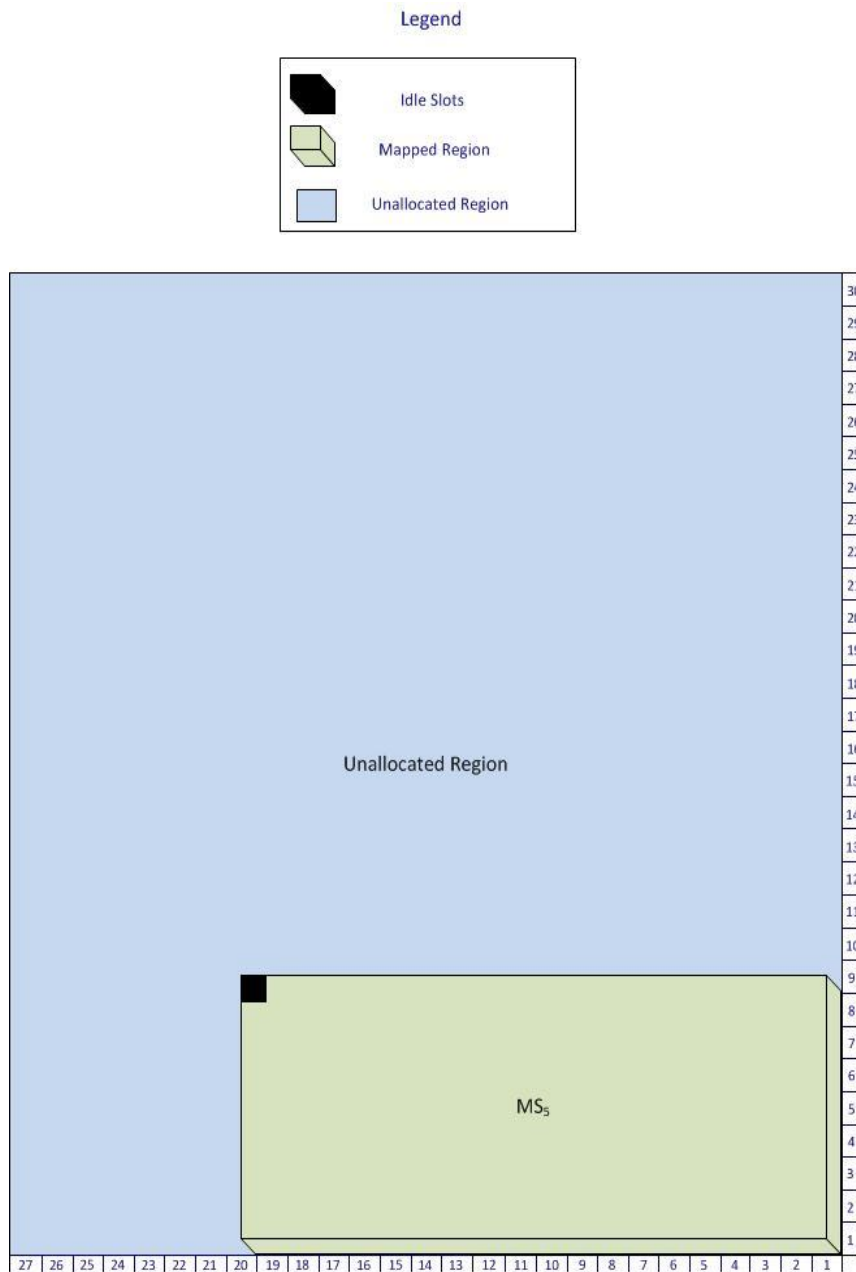
<b>MS<sub>1</sub></b>	134 σχισμές
<b>MS<sub>2</sub></b>	42 σχισμές
<b>MS<sub>3</sub></b>	121 σχισμές
<b>MS<sub>4</sub></b>	99 σχισμές
<b>MS<sub>5</sub></b>	151 σχισμές
<b>MS<sub>6</sub></b>	80 σχισμές
<b>MS<sub>7</sub></b>	17 σχισμές
<b>MS<sub>8</sub></b>	112 σχισμές
<b>MS<sub>9</sub></b>	22 σχισμές
<b>MS<sub>10</sub></b>	16 σχισμές

**Πίνακας 7:** Δέκα τυχαίες αιτήσεις (requests)

Στην πρώτη φάση, ο HBM ταξινομεί όλες τις αιτήσεις σε φθίνουσα σειρά και επιλέγει τη μεγαλύτερη, δηλαδή την MS<sub>5</sub>. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος ψάχνει το κατάλληλο πλάτος για την αίτηση. Η ελάχιστη δυνατή τιμή του πλάτους είναι έξι, καθότι αυτή μπορεί να καλύψει τη συγκεκριμένη αίτηση ( $6 \times 30 \geq 151$ ). Σύμφωνα με τη γραμμή 7 του αλγορίθμου 1, ο αλγόριθμος παράγει τα ακόλουθα αποτελέσματα: για πλάτος ίσο με 6, απομένουν 5 ανεκμετάλλετες σχισμές ( $6 \times \left\lfloor \frac{151}{6} \right\rfloor - 151$ ). Παρόμοια, για πλάτος ίσο με 7, απομένουν 3 ανεκμετάλλετες σχισμές, για πλάτος ίσο με 8 απομένει 1 ανεκμετάλλετη σχισμή,...,για πλάτος ίσο με 19 απομένει 1 ανεκμετάλλετη σχισμή και για πλάτος ίσο με 27 απομένουν 11 ανεκμετάλλετες σχισμές. Ο αλγόριθμος επιλέγει το πλάτος ίσο με 19, καθότι προκύπτει μία μόνο ανεκμετάλλετη σχισμή (σε περίπτωση που δύο ή περισσότερα πλάτη αφήνουν τον ίδιο αριθμό ανεκμετάλλετων σχισμών, ο αλγόριθμος επιλέγει το μεγαλύτερο πλάτος

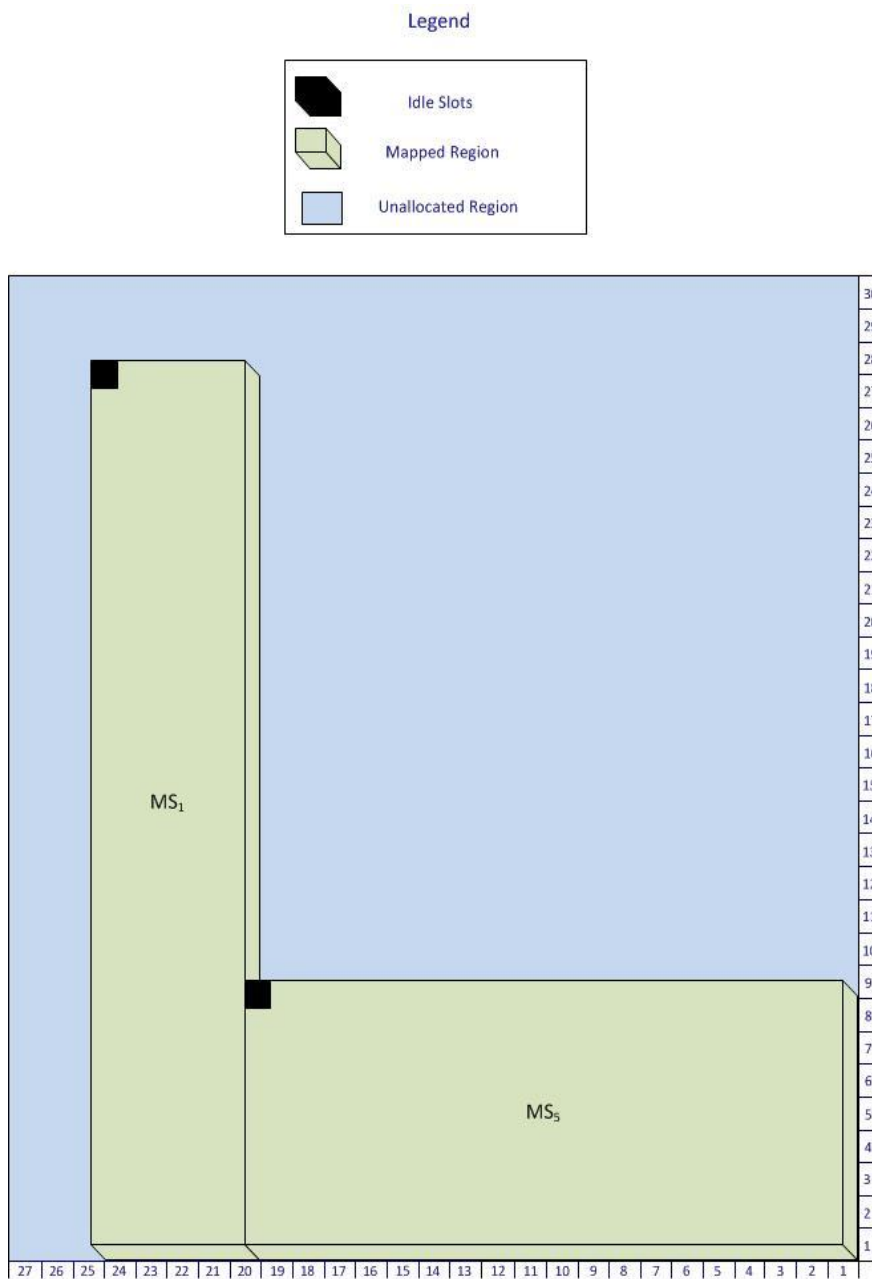


για να διαμορφώσει ευρύτερους ορίζοντες). Στη συνέχεια, υπολογίζεται το ύψος της αίτησης ( $A_{\text{height}}=8$ ) και η αίτηση  $MS_5$  τοποθετείται στον κάδο. Η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 13:



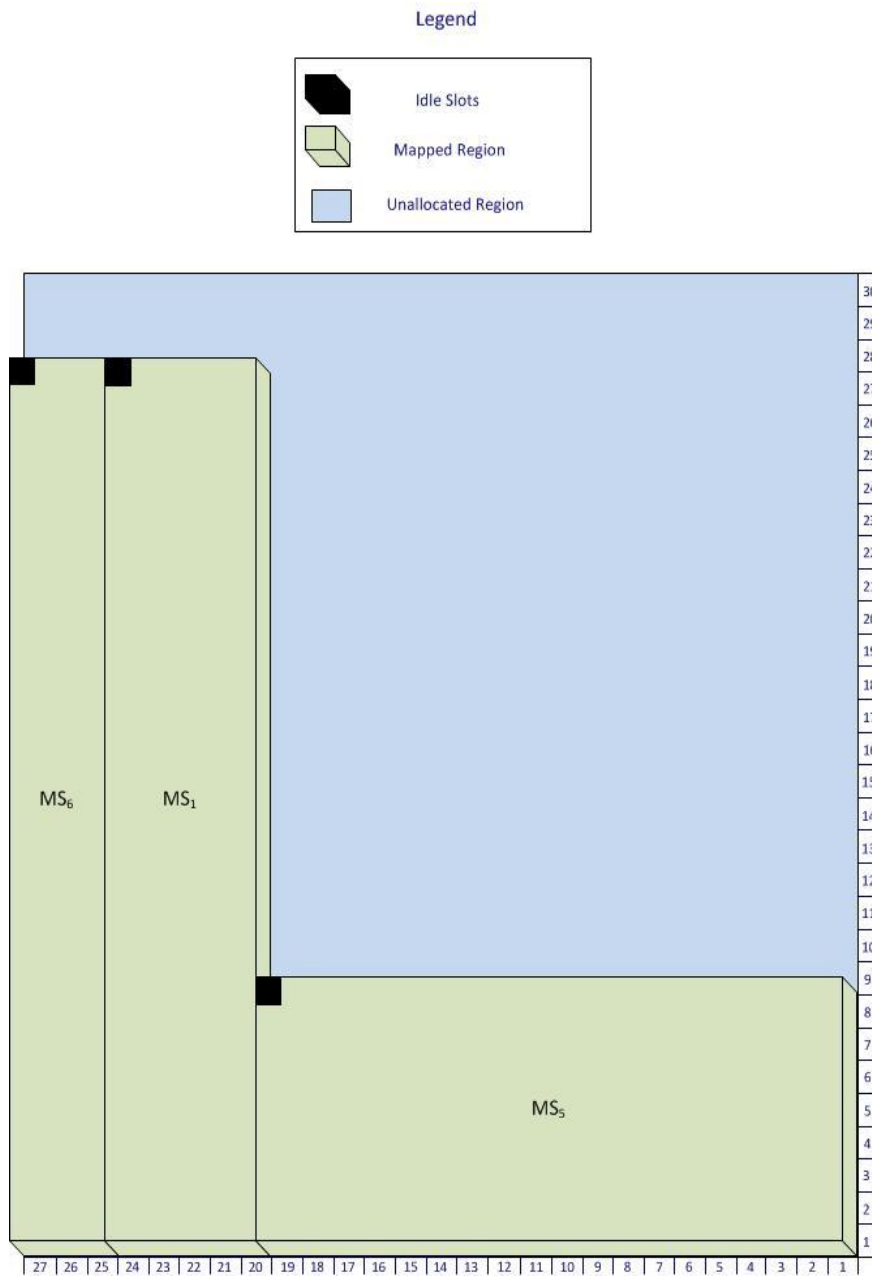
**Σχήμα 13:** Τοποθέτηση αίτησης  $MS_5$  με βάση τον αλγόριθμο HBM

Ο HBM συνεχίζει με την επόμενη αίτηση, η οποία είναι η  $MS_1$ . Τώρα, ο αλγόριθμος περιορίζει την έρευνά του στο χώρο που έχει απομείνει στον κάδο ( $20 \leq W \leq 27$ ). Το κατάλληλο πλάτος για  $A_{\text{slots}}=134$  είναι 5 και απομένει μία ανεκμετάλλευτη σχισμή. Η  $MS_1$  τοποθετείται δίπλα στην  $MS_5$  όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 14:



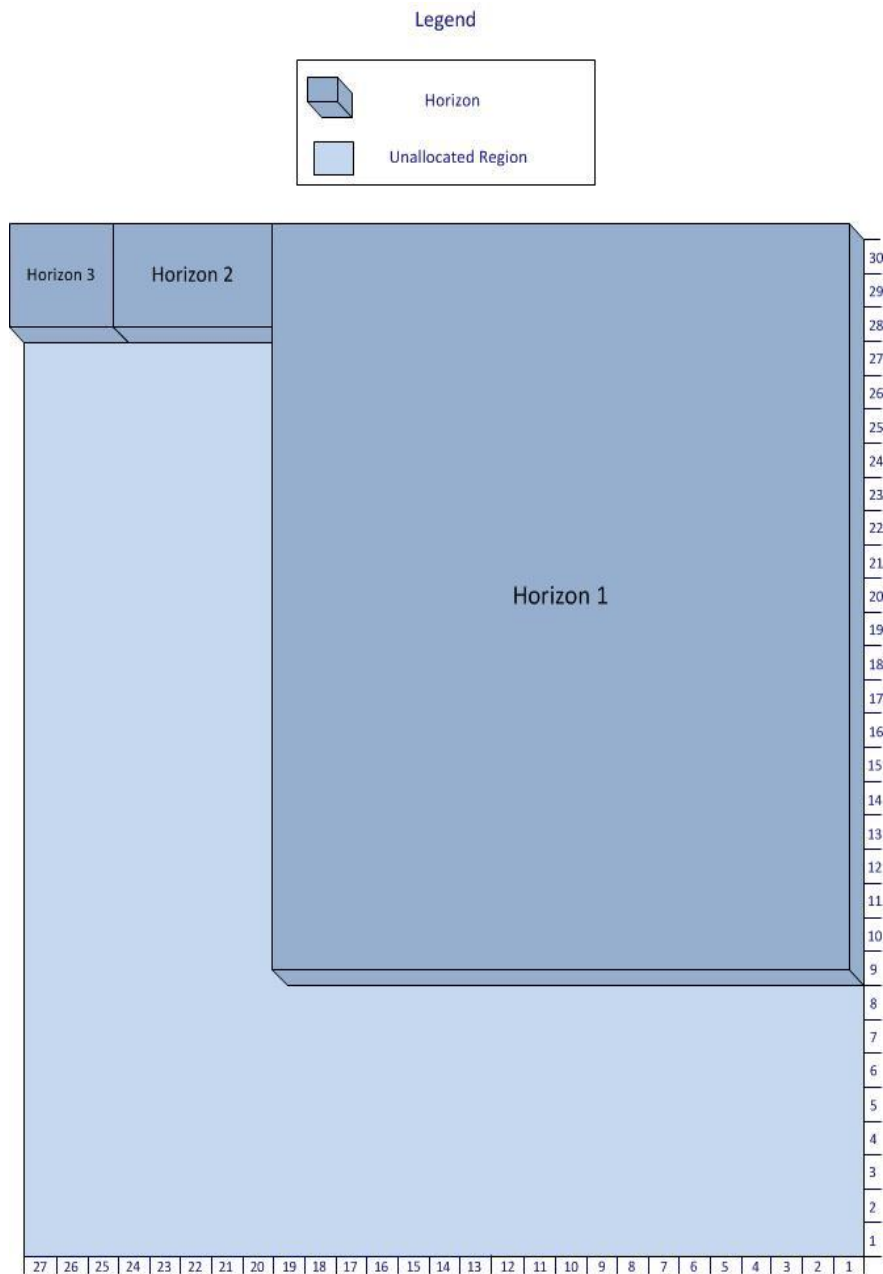
**Σχήμα 14:** Τοποθέτηση αίτησης  $MS_1$  με βάση τον αλγόριθμο HBM

Ο αλγόριθμος συνεχίζει με την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση, την  $MS_3$ . Ωστόσο, ο διαθέσιμος χώρος που έχει απομείνει ( $3 \times 30$ ) δεν είναι αρκετός προκειμένου να χωρέσουν 121 σχισμές. Έτσι, ο αλγόριθμος συνεχίζει με τις επόμενες αιτήσεις. Η επόμενη αίτηση που μπορεί να χωρέσει στο χώρο που έχει απομείνει αριστερά των κατανεμημένων ριπών είναι η  $MS_6$  (80 σχισμές). Ο HBM, λοιπόν, υπολογίζει το κατάλληλο πλάτος που είναι ίσο με τρία και τοποθετεί την αίτηση σε ένα ορθογώνιο με διαστάσεις  $3 \times 30$  αφήνοντας μία μόνο ανεκμετάλλευτη σχισμή. Η τοποθέτησή της  $MS_6$  απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 15:



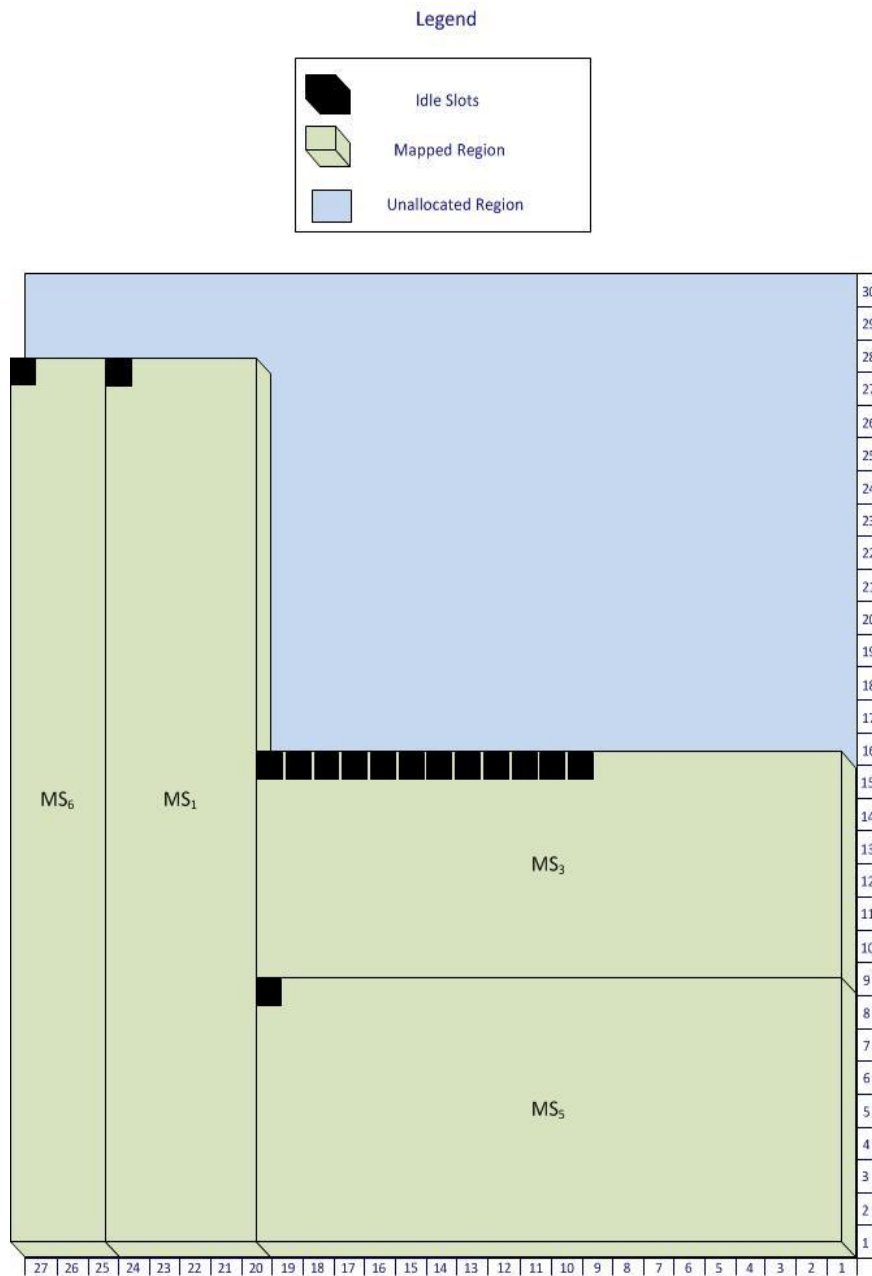
**Σχήμα 15:** Τοποθέτηση αίτησης  $MS_6$  με βάση τον αλγόριθμο HBM

Με την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης, το DL υποπλαίσιο περιλαμβάνει τρεις αιτήσεις όπως φαίνεται και στο Σχήμα 15. Σαν αποτέλεσμα δημιουργούνται τρεις οριζόντες (Σχήμα 16 – έντονο μπλε χρώμα) στους οποίους θα τοποθετηθούν οι εναπομείναντες αιτήσεις.



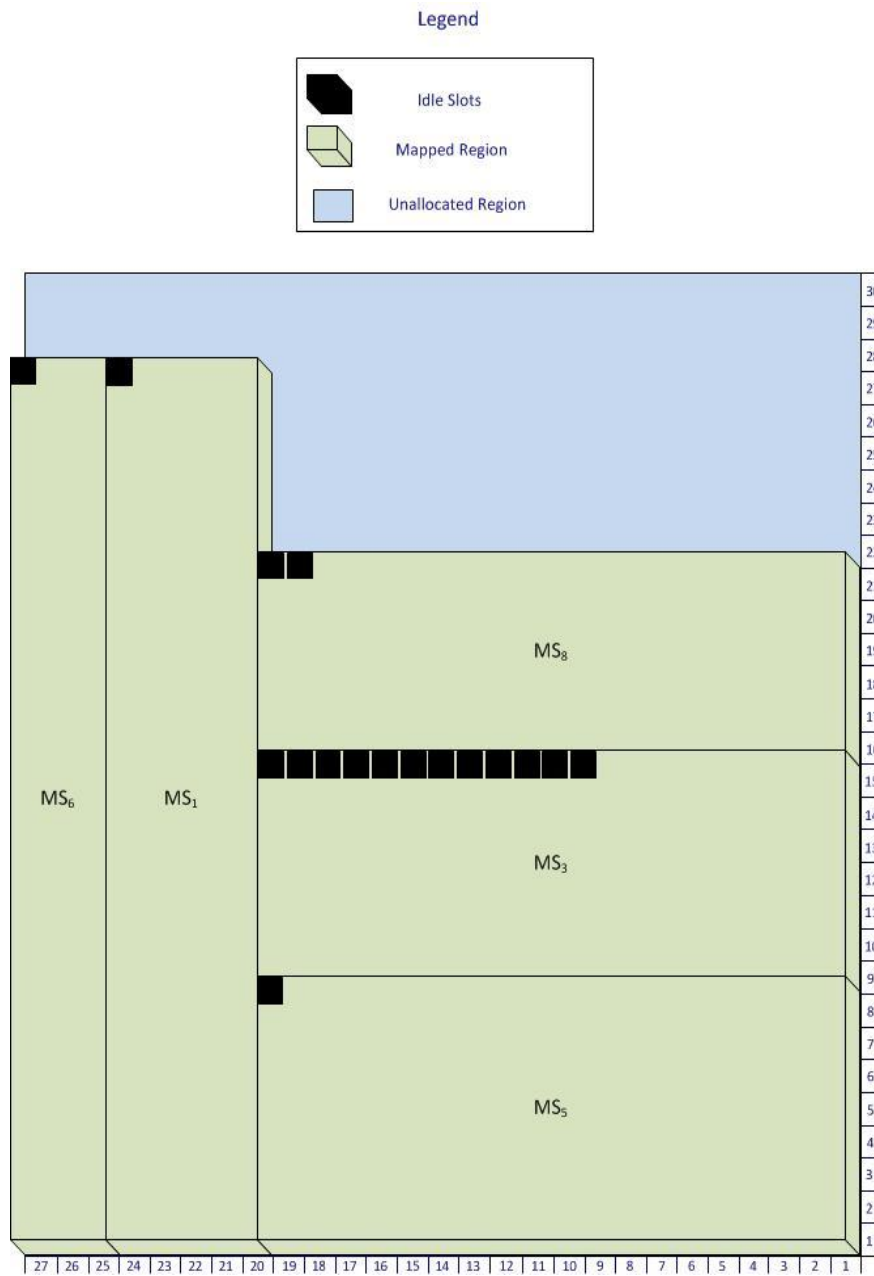
**Σχήμα 16:** Οι ορίζοντες που διαμορφώθηκαν με βάση τον αλγόριθμο HBM (1η φάση)

Η δεύτερη φάση ξεκινάει και ο αλγόριθμος ψάχνει τον κατάλληλο ορίζοντα προκειμένου να χωρέσει η μεγαλύτερη αίτηση από αυτές που έμειναν, δηλαδή η  $MS_3$ . Οι 121 σχισμές της μπορούν να καλυφθούν μόνο από τον πρώτο ορίζοντα (Horizon 1). Η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 17:



**Σχήμα 17:** Τοποθέτηση αίτησης MS<sub>3</sub> με βάση τον αλγόριθμο HBM

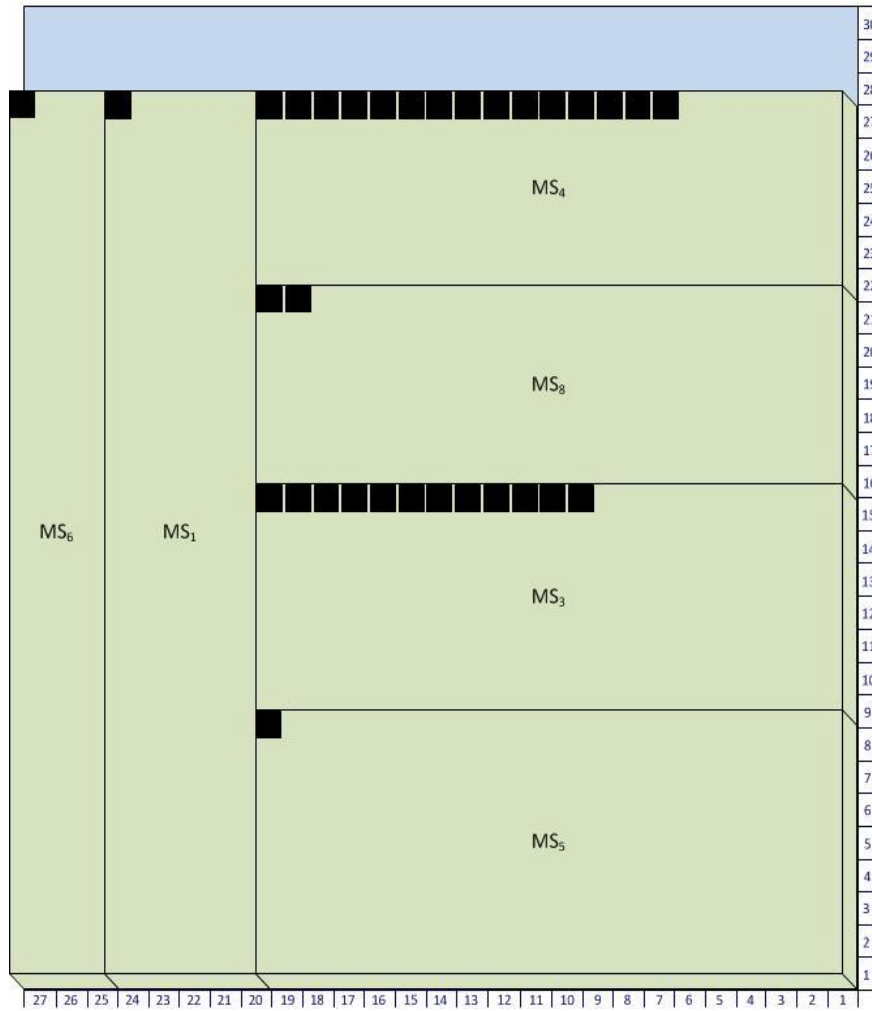
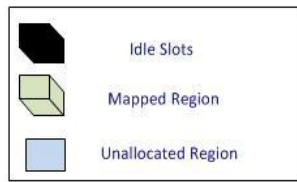
Ο αλγόριθμος συνεχίζει με την αίτηση MS<sub>8</sub> και την τοποθετεί στον πρώτο οριζοντα πάνω από την ριπή MS<sub>3</sub> (Σχήμα 18).



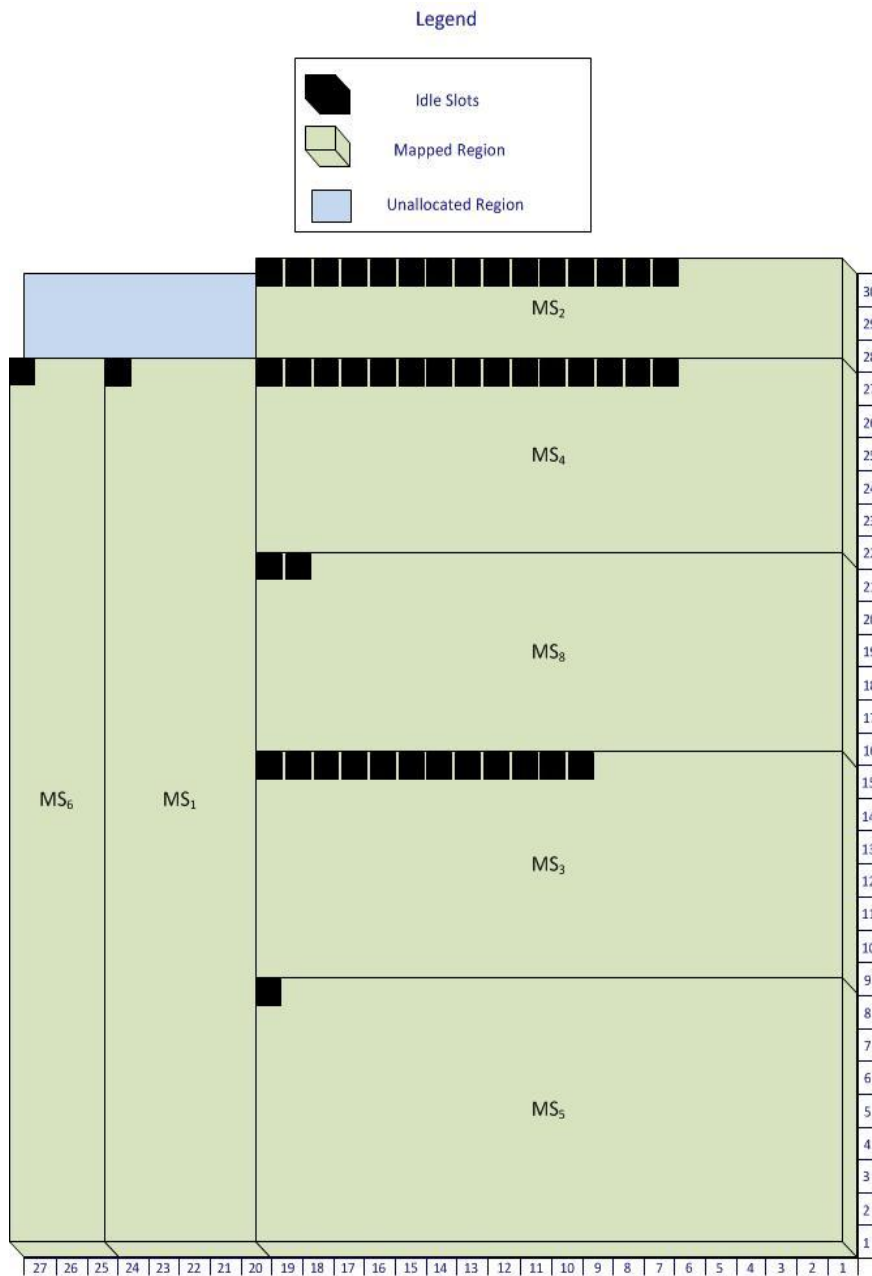
**Σχήμα 18:** Τοποθέτηση αίτησης MS<sub>8</sub> με βάση τον αλγόριθμο HBM

Στη συνέχεια, τοποθετούνται με τον ίδιο τρόπο στον πρώτο ορίζοντα και οι αιτήσεις MS<sub>4</sub> και MS<sub>2</sub> (Σχήματα 19 και 20).

Legend



Σχήμα 19: Τοποθέτηση αίτησης MS<sub>4</sub> με βάση τον αλγόριθμο HBM



**Σχήμα 20:** Τοποθέτηση αίτησης  $MS_2$  με βάση τον αλγόριθμο HBM

### 3.2.2. Συμπεράσματα παραδείγματος αλγορίθμου HBM

Στο παράδειγμα του HBM που αναλύσαμε παραπάνω, στο τέλος της κατανομής των αιτήσεων ο συνολικός χώρος που παρέμεινε ανεκμετάλλευτος ισούται με 24 σχισμές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 20 (μπλε χρώμα). Επιπλέον, άλλες 47 σχισμές παρέμειναν ανεκμετάλλευτες επειδή δεσμεύτηκαν προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι αιτήσεις  $MS_5$ ,  $MS_1$ ,  $MS_6$ ,  $MS_3$ ,  $MS_8$ ,  $MS_4$  και  $MS_2$  (Σχήμα 20 – μαύρο χρώμα). Τέλος, τρεις αιτήσεις (οι  $MS_7$ ,  $MS_9$  και  $MS_{10}$ ) δεν μπόρεσαν να κατανεμηθούν στο DL υποπλαίσιο επειδή οι οριζόντες 2 και



3 που απέμειναν (διαστάσεων 15 και 9 αντίστοιχα), δεν επαρκούσαν για να χωρέσουν οι τρεις αυτές αιτήσεις.

### 3.3. Βελτιωμένος αλγόριθμος IHBM (Improved Horizon Burst Mapping) με συνένωση οριζόντων

Ο βελτιωμένος αλγόριθμος IHBM αφορά τη δεύτερη φάση του πρώτου αλγορίθμου HBM (η πρώτη φάση είναι ακριβώς ίδια με του HBM). Ο αλγόριθμος αυτός, λοιπόν, όταν διαπιστώσει ότι μία αίτηση δεν χωράει σε κανέναν ορίζοντα του κάδου, ξεκινάει και συνενώνει τους ορίζοντες έναν έναν προκειμένου να δημιουργήσει ένα νέο μεγαλύτερο ορίζοντα, στον οποίο θα τοποθετηθεί η αίτηση που πριν δεν χωρούσε. Εφόσον τοποθετηθεί η αίτηση, υπολογίζονται ξανά οι διαστάσεις του ενωμένου οριζόντα (unified horizon) προκειμένου να τοποθετηθεί μία ακόμα αίτηση που μπορεί να χωράει. Αν δεν χωράει η συγκεκριμένη αίτηση στον ενωμένο ορίζοντα τότε κρίνεται ότι δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί (unserved) και ο αλγόριθμος συνεχίζει με την επόμενη μεγαλύτερη. Ο παρακάτω ψευδοκώδικας υποδεικνύει την δεύτερη φάση του βελτιωμένου αλγορίθμου IHBM. [26]

---

#### Αλγόριθμος 2: από κάτω προς τα πάνω τοποθέτηση εναπομείναντων αιτήσεων και συνένωση οριζόντων

- 1: Καθορίζουμε το σετ των εναπομείναντων αιτήσεων  $S'=\{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots\}$
- 2: Για κάθε εναπομείνουσα αίτηση (**For** {each remaining unmapped request})
- 3: Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη αίτηση και τη θέτουμε ως  $A_j$
- 4: **Εάν (If)** υπάρχει ορίζοντας για τον οποίο ισχύει:

$$Horizon(height) \times Horizon(width) \geq A_j$$

Βρίσκουμε τον ορίζοντα  $Horizon_q$  ο οποίος ελαχιστοποιεί τις ανεκμετάλλευτες σχισμές, κατανένοντας την αίτηση  $A_j$ :

$$\arg \min_q (Horizon_q(width) \times \left\lceil \frac{A_j}{Horizon_q(width)} \right\rceil MOD A_j)$$

- 5: Κατανέμουμε την  $A_j$  στο ορθογώνιο:

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$x = \text{Horizon}_q(x), \quad y = \text{Horizon}_q(\text{height}) - \lceil A_j / \text{Horizon}_q(\text{width}) \rceil$$

Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$$\text{height} = \lceil A_j / \text{Horizon}_q(\text{width}) \rceil, \quad \text{width} = \text{Horizon}_q(\text{width})$$

6: Ενημερώνουμε τις διαστάσεις του ορίζοντα  $q_{th}$ :

Το πάνω αριστερό άκρο παραμένει ίδιο στον κάδο:

Διαστάσεις ορθογωνίου ορίζοντα:

$$\text{Horizon}_q(\text{height}) = \text{Horizon}_q(\text{height}) - \lceil A_j / \text{Horizon}_q(\text{width}) \rceil,$$

Το πλάτος  $\text{Horizon}_q(\text{width})$  παραμένει ίδιο

7: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή από το  $S'$  σετ

8: **Αλλιώς (Else)** ξεκινάει η συνένωση οριζόντων

9: Τοποθετούμε τους ορίζοντες σε φθίνουσα σειρά με βάση τις διαστάσεις τους (ύψος x πλάτος)

10: Καθορίζουμε το σετ των εναπομείναντων οριζόντων  $SH = \{HZ_1, HZ_2, \dots\}$

11: Προσδιορίζουμε τον ενωμένο ορίζοντα  $UHZ$ :

$$UHZ_{\text{height}} = 0, \quad UHZ_{\text{width}} = 0$$

12: **Do**

13: Επιλέγουμε τον ορίζοντα (HZ) με τις μεγαλύτερες διαστάσεις από το SH σετ.

14: Προσθέτουμε τον ορίζοντα (HZ) στον ενωμένο ορίζοντα (unified horizon):

$$UHZ_{\text{width}} = UHZ_{\text{width}} + HZ_{\text{width}}$$

$$UHZ_{\text{height}} = \min(UHZ_{\text{height}}, HZ_{\text{height}}) \neq 0$$

15: Αφαιρούμε τον ορίζοντα HZ από το SH σετ.

16: **While** ( $UHZ_{\text{height}} \times UHZ_{\text{width}} < A_j$  **and**  $SH \neq \emptyset$ )

17: **If** ( $UHZ_{\text{height}} \times UHZ_{\text{width}} \geq A_j$ )

18: Τοποθετούμε την αίτηση  $A_j$  στον ενωμένο ορίζοντα:

$$A_{\text{height}} = \lceil A_j / UHZ_{\text{width}} \rceil, \quad A_{\text{width}} = HZ_{\text{width}}$$

19: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή  $A_j$  από το  $S'$  σετ

20: Ενημερώνουμε τις διαστάσεις του ενωμένου ορίζοντα:

$$UHZ_{height} = UHZ_{height} - A_{height}$$

$UHZ_{width}$  παραμένει το ίδιο

21: Καταργούμε τον ορίζοντα που σχημάτισε τον ενωμένο ορίζοντα και θέτουμε τον ενωμένο ορίζοντα σαν έναν νέο ξεχωριστό ορίζοντα HZ.

22: **Else**

23: Καταργούμε τον ενωμένο ορίζοντα και κρατάμε τους αρχικούς ορίζοντες. Η συγκεκριμένη αίτηση  $A_j$  δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί, επιστρέφει στον χρονοπρογραμματιστή και αφαιρείται από το  $S'$  σετ.

24: **EndIf**

25: **EndIf**

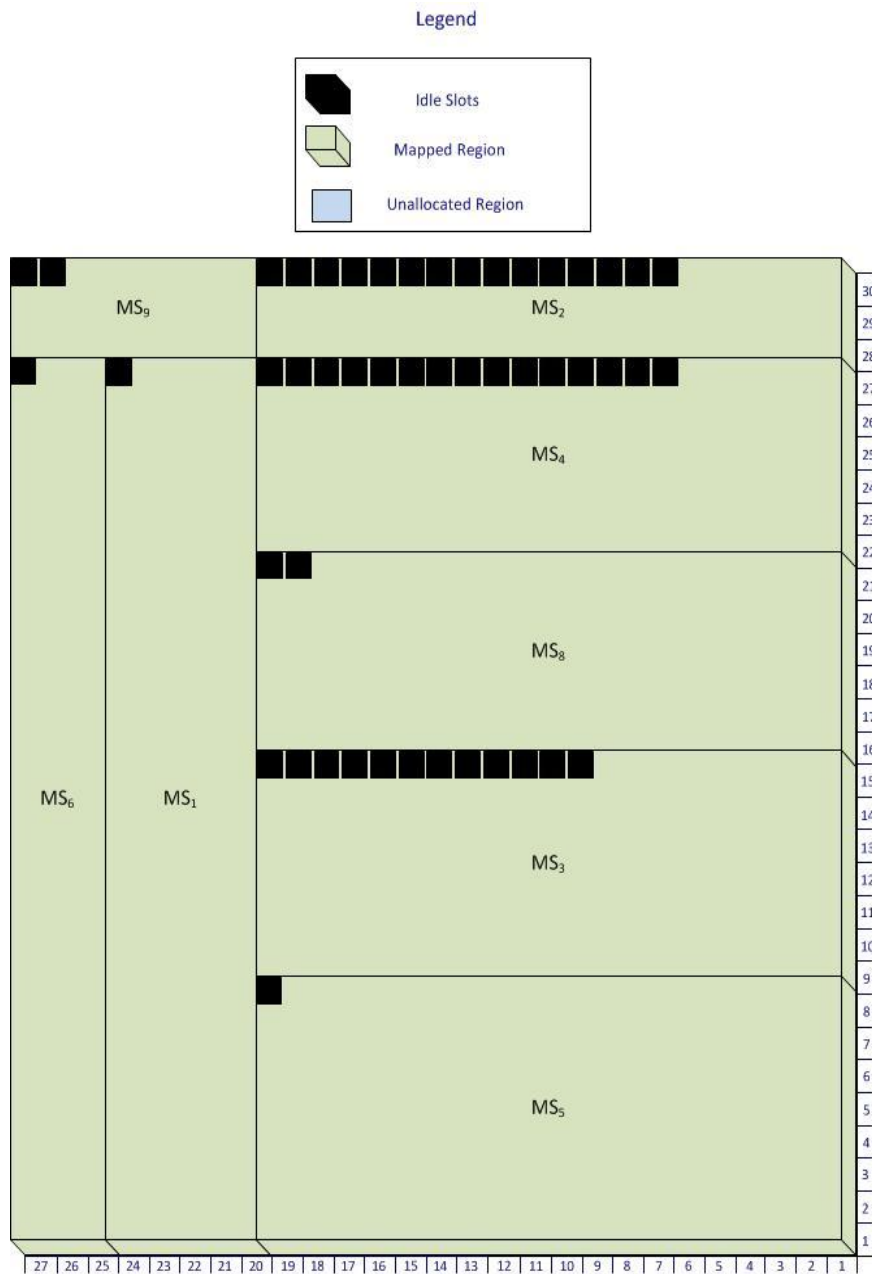
26: Επιλέγουμε την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση από το  $S'$  σετ ως  $A_j$

27: **While** ( $S' \neq \emptyset$ )

---

### 3.3.1. Παράδειγμα βελτιωμένου αλγορίθμου IHBM

Σε συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος του αλγορίθμου HBM, ο τελευταίος δεν μπόρεσε να εξυπηρετήσει τρεις αιτήσεις ( $MS_7$ ,  $MS_9$  και  $MS_{10}$ ) επειδή οι ορίζοντες 2 και 3 που απέμειναν (διαστάσεων 15 και 9 αντίστοιχα), δεν επαρκούσαν για να χωρέσουν οι τρεις αυτές αιτήσεις. Ο βελτιωμένος, λοιπόν, αλγόριθμος IHBM στη φάση αυτή θα ενώσει τους ορίζοντες 2 και 3 σε ένα νέο ενωμένο ορίζοντα διαστάσεων  $3 \times 8$  (24 σχισμές) για το ύψος και το πλάτος αντίστοιχα. Έτσι, η αίτηση  $MS_9$  (22 σχισμές) θα μπορέσει να κατανεμηθεί στον κάδο. Η τοποθέτησή της απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 21:



**Σχήμα 21:** Τοποθέτηση αίτησης  $MS_9$  με βάση τον αλγόριθμο IHBM

### 3.3.2. Συμπεράσματα παραδείγματος βελτιωμένου αλγορίθμου IHBM

Στο παραπάνω παράδειγμα του IHBM, στο τέλος της κατανομής των αιτήσεων ο συνολικός χώρος που παρέμεινε ανεκμετάλλετος ισούται με 49 σχισμές, οι οποίες δεσμεύτηκαν προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι αιτήσεις  $MS_5$ ,  $MS_1$ ,  $MS_6$ ,  $MS_3$ ,  $MS_8$ ,  $MS_4$ ,  $MS_2$  και  $MS_9$  (Σχήμα 21 – μαύρο χρώμα). Επιπλέον, δύο αιτήσεις (οι  $MS_7$  και  $MS_{10}$ ) δεν μπόρεσαν να κατανεμηθούν στο DL υποπλαίσιο επειδή δεν υπάρχουν άλλοι διαθέσιμοι ορίζοντες. Εν τέλει, συμπεραίνουμε ότι η κατανομή πόρων με τον βελτιωμένο αλγόριθμο

IHBM είναι αποδοτικότερη σε σχέση με τον HBM αφού εξυπηρετούνται περισσότερες αιτήσεις και μένει λιγότερος ανεκμετάλλευτος χώρος στο DL υποπλαίσιο.

### **3.4. Ένα νέο σχήμα κατανομής πόρων για συστήματα OFDMA**

Προκειμένου να αξιοποιήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα το διαθέσιμο χώρο στον OFDMA κάδο κατανομής ή DL υποπλαίσιο, αφήνοντας όσο το δυνατόν λιγότερες ανεκμετάλλευτες σχισμές αλλά και να εξυπηρετήσουμε περισσότερες αιτήσεις εισερχόμενης κίνησης, προτείνουμε στη παρούσα διπλωματική εργασία ένα νέο βελτιωμένο αλγόριθμο κατανομής πόρων για συστήματα OFDMA σε δίκτυα WiMAX. Ο προτεινόμενος αυτός αλγόριθμος στηρίζει μεγάλο μέρος της λειτουργίας του στον αλγόριθμο IHBM (Improved Horizon Burst Mapping), αλλά περιλαμβάνει και μία νέα λειτουργία, τη διαίρεση των αιτήσεων, χάρη στην οποία επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από τους υπόλοιπους αλγορίθμους που παρουσιάζονται στη διπλωματική εργασία. Όπως θα δούμε και παρακάτω στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των αλγορίθμων (Κεφάλαιο 4), ο προτεινόμενος αλγόριθμος αξιοποιεί καλύτερα τον διαθέσιμο χώρο στον OFDMA κάδο κατανομής, εξυπηρετώντας περισσότερες αιτήσεις και αφήνοντας λιγότερες ανεκμετάλλευτες σχισμές σε σύγκριση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους. Το μόνο πρόβλημα που παραμένει είναι ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει ίδια ή ελαφρώς χειρότερη επίδοση σε σχέση με τους αλγορίθμους HBM και IHBM, στον αριθμό των κινητών σταθμών που εξυπηρετεί, όταν οι τελευταίοι είναι πολλοί, δηλαδή σε συνθήκες υψηλής κίνησης δεδομένων.

### **3.5. Προτεινόμενος αλγόριθμος (Proposed Algorithm)**

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί, λοιπόν, μία επιπλέον βελτίωση του IHBM (Improved Horizon Burst Mapping) αλγορίθμου. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αυτός αφορά τη δεύτερη φάση του αλγορίθμου IHBM (η πρώτη φάση είναι ακριβώς ίδια με του IHBM). Δηλαδή, οι αιτήσεις κατανέμονται με φθίνουσα σειρά στο DL υποπλαίσιο από αριστερά προς τα δεξιά και ο αλγόριθμος δημιουργεί οριζόντες προκειμένου να τοποθετήσει τις εναπομείναντες αιτήσεις. Στη συνέχεια, στη δεύτερη φάση, ο προτεινόμενος αλγόριθμος τοποθετεί τις αιτήσεις που έμειναν στους κατάλληλους οριζόντες. Όπως και ο IHBM, αν μία αίτηση δεν χωράει σε κανέναν οριζόντα, τότε ο αλγόριθμος συνενώνει τους οριζόντες μεταξύ τους προκειμένου να δημιουργήσει ένα νέο μεγαλύτερο οριζόντα στον οποίο θα τοποθετηθεί η αίτηση που πριν δεν χωρούσε. Η βελτίωση του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι αν μία αίτηση μετά και τη συνένωση των οριζόντων εξακολουθεί να μην χωράει στον ενωμένο μεγαλύτερο οριζόντα, τότε ο αλγόριθμος προβαίνει στη διαίρεσή της (cutting). Δηλαδή, ο αλγόριθμος

σπάει την αίτηση και τοποθετεί το πρώτο κομμάτι της στον ενωμένο ορίζοντα με διαστάσεις ίσες με αυτές του ενωμένου ορίζοντα. Οι σχισμές (slots) που θα απομείνουν, δηλαδή το δεύτερο κομμάτι της αίτησης, θα επιστρέψουν σαν μία νέα αίτηση στο σετ του χρονοπρογραμματιστή (scheduler), η οποία θα εξυπηρετηθεί στο επόμενο πλαίσιο (frame). Ο παρακάτω ψευδοκώδικας υποδεικνύει την δεύτερη φάση του προτεινόμενου αλγορίθμου.

---

**Αλγόριθμος 2: από κάτω προς τα πάνω τοποθέτηση εναπομείναντων αιτήσεων, συνένωση οριζόντων και διαίρεση αιτήσεων**

- 1: Καθορίζουμε το σετ των εναπομείναντων αιτήσεων  $S'=\{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots\}$
- 2: Για κάθε εναπομείνουσα αίτηση (**For** {each remaining unmapped request})
- 3: Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη αίτηση και τη θέτουμε ως  $A_j$
- 4: **Εάν (If)** υπάρχει ορίζοντας για τον οποίο ισχύει:

$$Horizon(height) \times Horizon(width) \geq A_j$$

Βρίσκουμε τον ορίζοντα  $Horizon_q$  ο οποίος ελαχιστοποιεί τις ανεκμετάλλευτες σχισμές, κατανέμοντας την αίτηση  $A_j$ :

$$\arg \min_q (Horizon_q(width) \times \left\lceil \frac{A_j}{Horizon_q(width)} \right\rceil \text{MOD} A_j)$$

- 5: Κατανέμουμε την  $A_j$  στο ορθογώνιο:

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$x = Horizon_q(x), \quad y = Horizon_q(height) - \lceil A_j / Horizon_q(width) \rceil$$

Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$$height = \lceil A_j / Horizon_q(width) \rceil, \quad width = Horizon_q(width)$$

- 6: Ενημερώνουμε τις διαστάσεις του ορίζοντα  $q_{th}$ :

Το πάνω αριστερό άκρο παραμένει ίδιο στον κάδο:

Διαστάσεις ορθογωνίου ορίζοντα:

$$Horizon_q(height) = Horizon_q(height) - \lceil A_j / Horizon_q(width) \rceil,$$

Το πλάτος  $Horizon_q(width)$  παραμένει ίδιο

7: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή από το  $S'$  σετ

8: **Αλλιώς (Else)** ξεκινάει η συνένωση οριζόντων

9: Τοποθετούμε τους οριζόντες σε φθίνουσα σειρά με βάση τις διαστάσεις τους (ύψος x πλάτος)

10: Καθορίζουμε το σετ των εναπομείναντων οριζόντων  $SH = \{HZ_1, HZ_2, \dots\}$

11: Προσδιορίζουμε τον ενωμένο ορίζοντα  $UHZ$ :

$$UHZ_{height} = 0, UHZ_{width} = 0$$

12: **Do**

13: Επιλέγουμε τον ορίζοντα (HZ) με τις μεγαλύτερες διαστάσεις από το SH σετ.

14: Προσθέτουμε τον ορίζοντα (HZ) στον ενωμένο ορίζοντα (unified horizon):

$$UHZ_{width} = UHZ_{width} + HZ_{width}$$

$$UHZ_{height} = \min(UHZ_{height}, HZ_{height}) \neq 0$$

15: Αφαιρούμε τον ορίζοντα HZ από το SH σετ.

16: **While** ( $UHZ_{height} \times UHZ_{width} < A_j$  **and**  $SH \neq \emptyset$ )

17: **If** ( $UHZ_{height} \times UHZ_{width} \geq A_j$ )

18: Τοποθετούμε την αίτηση  $A_j$  στον ενωμένο ορίζοντα:

$$A_{height} = \lceil A_j / UHZ_{width} \rceil, A_{width} = HZ_{width}$$

19: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή  $A_j$  από το  $S'$  σετ

20: Ενημερώνουμε τις διαστάσεις του ενωμένου ορίζοντα:

$$UHZ_{height} = UHZ_{height} - A_{height}$$

$$UHZ_{width} \text{ παραμένει το ίδιο}$$

21: Καταργούμε τον ορίζοντα που σχημάτισε τον ενωμένο ορίζοντα και θέτουμε τον ενωμένο ορίζοντα σαν έναν νέο ξεχωριστό ορίζοντα HZ.

22: **Else**

23: Η συγκεκριμένη αίτηση  $A_j$  διαιρείται σε δύο μέρη και το πρώτο μέρος κατανέμεται στον ενωμένο ορίζοντα με διαστάσεις ίσες με αυτές του ενωμένου ορίζοντα.

24: Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$height = UHZ_{height}$  ,  $width = UHZ_{width}$

25: Καταργείται ο ενωμένος ορίζοντας εφόσον πλέον έχει τοποθετηθεί το πρώτο μέρος της αίτησης.

26: Το δεύτερο μέρος της αίτησης  $A_{j2} = A_j - (UHZ_{height} \times UHZ_{width})$  επιστρέφει στον προγραμματιστή και εξυπηρετείται στο επόμενο πλαίσιο (frame).

27: **EndIf**

28: **EndIf**

29: Επιλέγουμε την επόμενη μεγαλύτερη αίτηση από το  $S'$  σετ ως  $A_j$

30: **While** ( $S' \neq \emptyset$ )

---

### 3.5.1. Παράδειγμα προτεινόμενου αλγορίθμου

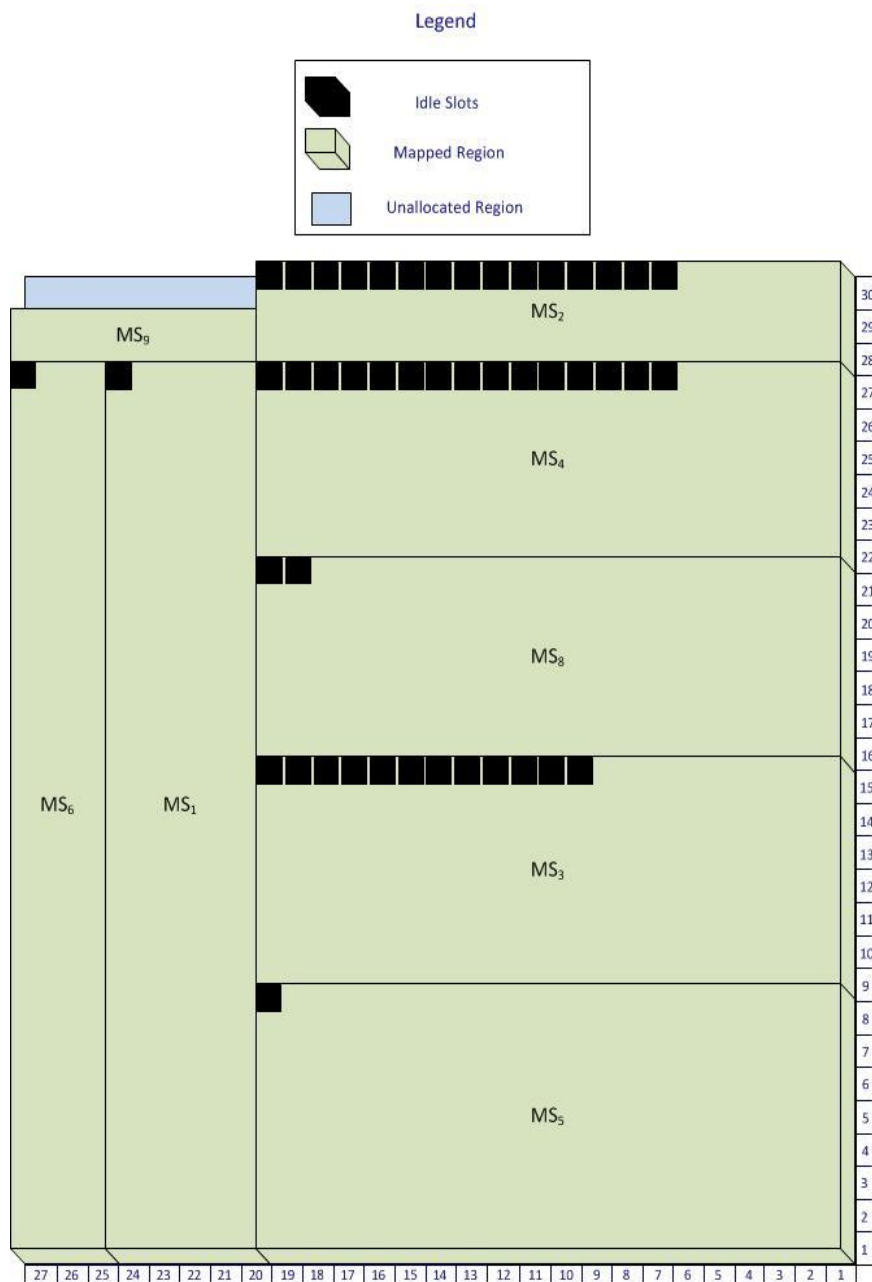
Με βάση το προηγούμενο παράδειγμα του IHBM έστω ότι έχουμε πάλι τις δέκα αιτήσεις με μόνη διαφορά στις τιμές των αιτήσεων  $MS_7$ ,  $MS_9$  και  $MS_{10}$ . Ο παρακάτω Πίνακας 8 υποδεικνύει τις δέκα αυτές αιτήσεις, οι οποίες θα κατανεμηθούν σε ένα DL υποπλαίσιο ή κάδο με διαστάσεις: ύψος 30 και πλάτος 27, δηλαδή 30x27 (810 συνολικά σχισμές).

$MS_1$	134 σχισμές
$MS_2$	42 σχισμές
$MS_3$	121 σχισμές
$MS_4$	99 σχισμές
$MS_5$	151 σχισμές
$MS_6$	80 σχισμές
$MS_7$	15 σχισμές
$MS_8$	112 σχισμές
$MS_9$	16 σχισμές
$MS_{10}$	10 σχισμές

**Πίνακας 8:** Δέκα τυχαίες αιτήσεις (requests)



Οι αιτήσεις  $MS_1, MS_2, MS_3, MS_4, MS_5, MS_6,$  και  $MS_8$  κατανέμονται στον κάδο με τον ίδιο τρόπο που τις τοποθετεί και ο αλγόριθμος HBM (Σχήμα 20). Επομένως, στους δύο οριζόντες (διαστάσεων 15 και 9 σχισμών αντίστοιχα) μένει να κατανεμηθούν οι αιτήσεις  $MS_9, MS_7$  και  $MS_{10}$  κατά φθίνουσα σειρά. Επειδή η αίτηση  $MS_9$  δεν χωράει σε κανέναν από τους δύο οριζόντες, ο προτεινόμενος αλγόριθμος (όπως και ο IHBM) συνενώνει τους δύο οριζόντες για να δημιουργήσει ένα μεγαλύτερο και τοποθετεί την αίτηση. Ο νέος οριζοντας που δημιουργείται έχει διαστάσεις  $1 \times 8$  για το ύψος και το πλάτος, αντίστοιχα. Η τοποθέτηση της αίτησης  $MS_9$  απεικονίζεται στο παρακάτω Σχήμα 22:



**Σχήμα 22:** Τοποθέτηση αίτησης  $MS_9$  με βάση τον προτεινόμενο αλγόριθμο



### 3.5.2. Συμπεράσματα παραδείγματος προτεινόμενου αλγορίθμου

Στο παραπάνω παράδειγμα του προτεινόμενου αλγορίθμου, στο τέλος της κατανομής των αιτήσεων ο συνολικός χώρος που παρέμεινε ανεκμετάλλευτος ισούται με 47 σχισμές, οι οποίες δεσμεύτηκαν προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι αιτήσεις  $MS_5$ ,  $MS_{11}$ ,  $MS_6$ ,  $MS_3$ ,  $MS_8$ ,  $MS_4$  και  $MS_2$  (Σχήμα 23 – μαύρο χρώμα). Επιπλέον, μία αίτηση (η  $MS_{10}$ ) δεν μπόρεσε να κατανεμηθεί στο DL υποπλαίσιο επειδή δεν υπάρχουν άλλοι διαθέσιμοι ορίζοντες. Τελικά, συμπεραίνουμε ότι η κατανομή πόρων με τον προτεινόμενο αλγόριθμο είναι αποδοτικότερη σε σχέση με τον IHBM αφού εξυπηρετούνται περισσότερες αιτήσεις και μένει λιγότερος ανεκμετάλλευτος χώρος στο DL υποπλαίσιο. Καλύτερη εικόνα για την απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου θα έχουμε στο επόμενο κεφάλαιο με τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων.

### 3.6. Αλγόριθμος SHBM (Same Height Burst Mapping)

Ο αλγόριθμος κατανομής πόρων SHBM αποτελείται από δύο φάσεις και βασίζεται στον HBM μόνο στο γεγονός ότι τοποθετεί σε πρώτη φάση στο κάδο τη μεγαλύτερη αίτηση του χρονοπρογραμματιστή αφήνοντας ανεκμετάλλευτο τον ελάχιστο δυνατό χώρο (wasted space). Στη συνέχεια, στη δεύτερη φάση τοποθετεί τις επόμενες αιτήσεις με βάση το ύψος της πρώτης αίτησης ώστε να δημιουργήσει μία νέα βάση στον κάδο. Αν κάποια αίτηση δεν χωράει κατά μήκος του κάδου, τότε ο αλγόριθμος υπολογίζει ξανά το πλάτος της ώστε να μείνει ανεκμετάλλευτος ο ελάχιστος δυνατός χώρος και τοποθετεί την αίτηση στη νέα βάση. Οι μετέπειτα αιτήσεις τοποθετούνται στη νέα βάση με παρόμοιο ύψος με τη πρώτη αίτηση που τοποθετήθηκε ώστε με τη σειρά τους να δημιουργήσουν μία νέα βάση. Ο παρακάτω ψευδοκώδικας υποδεικνύει την λειτουργία του αλγορίθμου SHBM.

---

#### Αλγόριθμος 1: Καθορισμός πρώτης αίτησης

- 1: Καθορίζουμε το σέτ των εισερχομένων αιτήσεων  $S=\{A_1, A_2, \dots A_i \dots\}$
- 2: Θέτουμε το διαθέσιμο ύψος του κάδου ίσο με  $H$
- 3: Θέτουμε το διαθέσιμο πλάτος του κάδου ίσο με  $W_{rest}=W$

4: **Do**

5: Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη αίτηση και τη θέτουμε ως  $A_i$

6: Βρίσκουμε το κατάλληλο πλάτος  $m$ , το οποίο ελαχιστοποιεί τις ανεκμετάλλευτες σχισμές (slots) στον κάδο:

$$\arg \min_{m \in [1, W_{rest}]} (m \times \lceil A_i/m \rceil - A_i)$$

7: Κατανέμουμε την  $A_i$  στο ορθογώνιο:

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$x = W_{rest} - m, \quad y = H - \lceil A_i/m \rceil$$

Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$$\text{height} = \lceil A_i/m \rceil, \quad \text{width} = m$$

8: Ανανεώνουμε το διαθέσιμο πλάτος:  $W_{rest} = W_{rest} - m$

10: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή από το  $S$  σετ

11: **While**( $H \times W_{rest} < A_i$  OR  $S \in \emptyset$ )

---

---

### **Αλγόριθμος 2: Από δεξιά προς τα αριστερά τοποθέτηση αιτήσεων με ίδιο ύψος**

1: **Do**

2: Επιλέγουμε τη μεγαλύτερη αίτηση και τη θέτουμε ως  $A_j$

3: Κατανέμουμε την  $A_j$  στο ορθογώνιο:

Το πάνω αριστερό άκρο έχει συντεταγμένες στον κάδο:

$$x = W_{rest} - \left\lceil \frac{A_j}{\lceil A_i/m \rceil} \right\rceil, \quad y = H - \lceil A_i/m \rceil$$

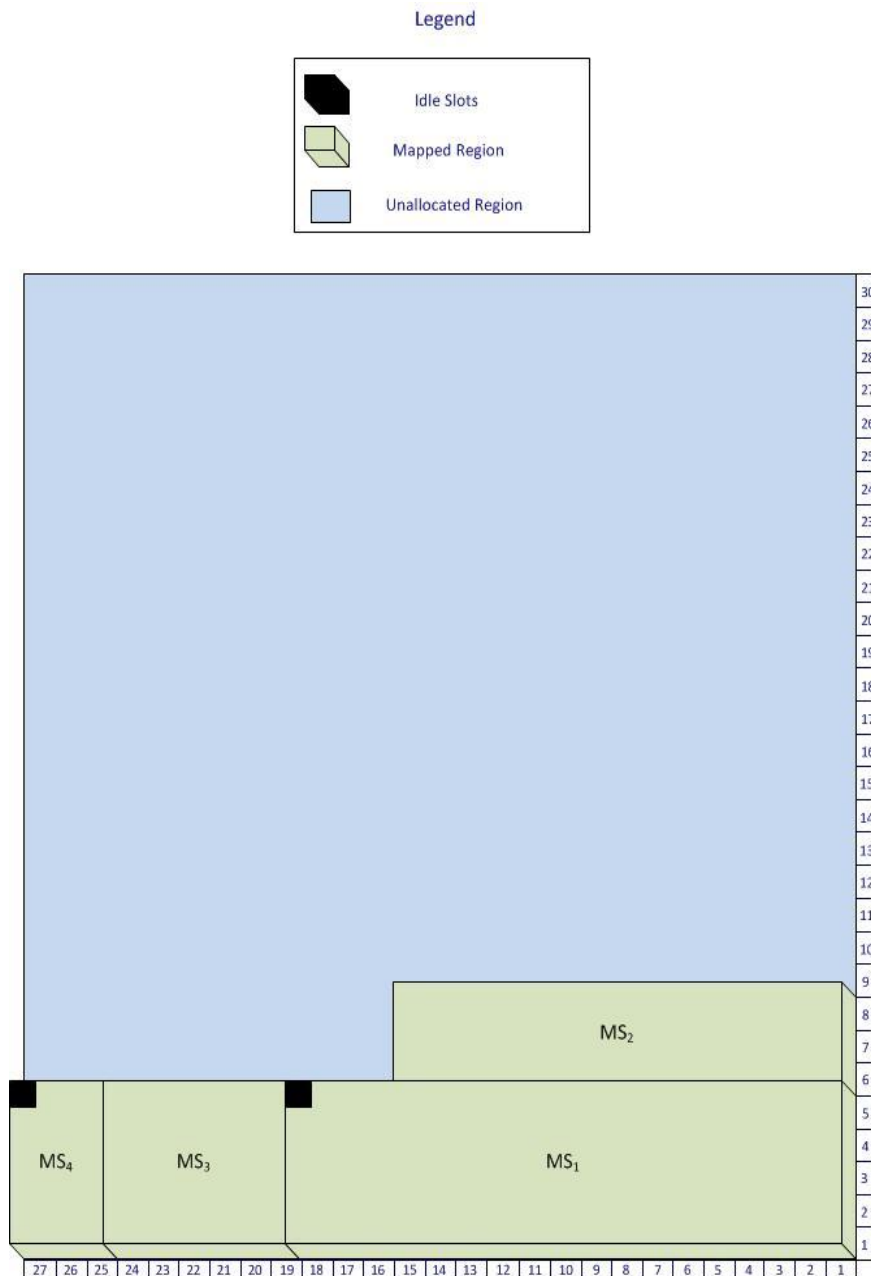
Διαστάσεις ορθογωνίου ριπής:

$$\text{height} = \lceil A_i/m \rceil, \quad \text{width} = \left\lceil \frac{A_j}{\lceil A_i/m \rceil} \right\rceil$$

- 4: Ανανεώνουμε το διαθέσιμο πλάτος:  $W\_rest = W\_rest - \left\lfloor \frac{A_j}{[A_i/m]} \right\rfloor$
- 5: Αφαιρούμε την κατανεμημένη ριπή από το S σετ
- 6: Επιλέγουμε την επόμενη μεγαλύτερη ριπή από το S σετ ως  $A_j$
- 6: **While** ( $H \times W\_rest < A_j$  OR  $S \in \emptyset$  )
- 7: If  $H \times W\_rest > A_j$
- 8: Θέτουμε το διαθέσιμο ύψος του κάδου ίσο με  $H = H - [A_i/m]$
- 9: Θέτουμε το διαθέσιμο πλάτος του κάδου ίσο με  $W\_rest = W$
- 10: Το πρόγραμμα καλεί τον αλγόριθμο 1 και ξανατρέχει από την αρχή με τις νέες διαστάσεις του κάδου.
- 11: EndIf
- 

### 3.6.1. Παράδειγμα αλγορίθμου SHBM

Έστω ότι έχουμε τέσσερις αιτήσεις:  $MS_1=89$ ,  $MS_2=45$ ,  $MS_3=30$  και  $MS_4=14$  οι οποίες θα κατανεμηθούν σε ένα DL υποπλαίσιο ή κάδο με διαστάσεις: ύψος 30 και πλάτος 27, δηλαδή  $30 \times 27$  (810 συνολικά σχισμές). Ο αλγόριθμος θα ξεκινήσει από την αίτηση  $MS_1$  και θα υπολογίσει τις διαστάσεις της, οι οποίες είναι  $5 \times 18$  για το ύψος και το πλάτος, αντίστοιχα. Η  $MS_1$  θα τοποθετηθεί στον κάδο και στη συνέχεια ο αλγόριθμος θα μεταβεί στην επόμενη μεγαλύτερη αίτηση που χωράει κατά μήκος του κάδου με ύψος ίσο με αυτό της  $MS_1$ , δηλαδή 5. Η αίτηση αυτή είναι η  $MS_3$ , η οποία θα τοποθετηθεί δίπλα στην  $MS_1$ . Παρόμοια και για την αίτηση  $MS_4$ . Όσον αφορά την αίτηση  $MS_2$  δεν χωράει να τοποθετηθεί δίπλα στην  $MS_1$  με ύψος ίσο με 5, οπότε θα υπολογιστούν οι διαστάσεις της με βάση τις ελάχιστες ανεκμετάλλευτες σχισμές που αφήνει η τοποθέτησή της και θα κατανεμηθεί στη νέα βάση του κάδου. Στο παρακάτω Σχήμα 24 απεικονίζεται η τοποθέτηση των αιτήσεων:



**Σχήμα 24:** Τοποθέτηση αιτήσεων με βάση τον αλγόριθμο SHBM

### 3.6.2. Συμπεράσματα παραδείγματος αλγορίθμου SHBM

Αν υπάρχουν και άλλες αιτήσεις στον προγραμματιστή ο SHBM θα συνεχίσει την τοποθέτηση στα αριστερά της ριπής  $MS_2$  (Σχήμα 24) όσων αιτήσεων χωράνε και στη συνέχεια θα δημιουργήσει πάλι μία νέα βάση στο DL υποκανάλι. Ο αλγόριθμος συνεχίζει έως ότου τελειώσουν οι αιτήσεις ή γεμίσει ο κάδος. Όπως θα δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο με τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων, ο SHBM είναι λιγότερο αποδοτικός σε σχέση με τους προηγούμενους αλγορίθμους.

## Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων Αλγορίθμων Κατανομής Πόρων για συστήματα OFDMA σε δίκτυα WiMAX

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράψαμε τους βασικούς αλγορίθμους κατανομής πόρων σε OFDMA συστήματα. Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων τεσσάρων αλγορίθμων του προηγούμενου κεφαλαίου, για δύο διαφορετικά σενάρια και θα γίνει σύγκριση μεταξύ τους.

Το περιβάλλον προσομοίωσης στο οποίο σχεδιάστηκαν και προσομοιώθηκαν οι αλγόριθμοι HBM, IHBM, Προτεινόμενος Αλγόριθμος και SHBM είναι η Matlab. Επιπλέον, οι παράμετροι του προτύπου IEEE 802.16e που υιοθετήθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης είναι:

**A)** Υιοθετήθηκε το γνωστό σενάριο που ονομάζεται μερική χρήση των υποφορέων (partial usage of subcarriers – PUSC) γιατί είναι το πιο συνηθισμένο σενάριο διαίρεσης της συχνότητας (frequency diversity) για καθημερινά περιβάλλοντα κινητών επικοινωνιών. Με βάση αυτή τη τεχνική το υποπλαίσιο της εισερχόμενης κίνησης (downlink sub-frame) καθορίζει 30 διαφορετικά κανάλια.

**B)** Το μήκος του πλαισίου (frame) τέθηκε στα 10 ms. Επομένως, τρία σύμβολα προορίζονται για πληροφορίες ελέγχου (control information) (ένα για επικεφαλίδα (preamble) και δύο για MAP και FCH). Τα σύμβολα αυτά αποκλείονται από τις διαθέσιμες σχισμές (slots) για τις ανάγκες της κατανομής (allocation).

**Γ)** Όλοι οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν τη τυπική στατική αναλογία 2:1 (static ratio) του προτύπου IEEE 802.16.

**Δ)** Κάθε προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για 6000 πλαίσια (frames). Υποθέτουμε ότι κάθε κινητός σταθμός (MS) ζητάει μία ριπή για κάθε πλαίσιο. Η υπόθεση αυτή δεν αποτελεί περιορισμό, καθώς ο αριθμός των ζητούμενων ριπών ανά πλαίσιο μπορεί να αυξηθεί, αυξάνοντας απλά τους συνδεδεμένους κινητούς σταθμούς. [26]

Ο παρακάτω Πίνακας 9 συνοψίζει τις παραμέτρους του περιβάλλοντος προσομοίωσης:

<b>Channel Mode</b>	PUSC
<b>Frame Size</b>	10 ms
<b>Preamble Size</b>	1 Symbol
<b>MAP, FCH Sizes</b>	2 Symbols
<b>Downlink sub-frame Symbols</b>	2:1 downlink-to-uplink ratio
<b>Total sub-frame capacity</b>	810 symbols
<b>Frame Iterations (Trials)</b>	6000

**Πίνακας 9:** Παράμετροι περιβάλλοντος προσομοίωσης

#### 4.1. Σενάρια κίνησης (traffic profiling)

Προκειμένου να εκτιμήσουμε την απόδοση των τεσσάρων αλγορίθμων κατανομής πόρων υπό ρεαλιστικές συνθήκες, χρειάζονται κάποια σενάρια κίνησης. Τα τελευταία μπορούν να θεωρηθούν ως μία συνάρτηση της ζήτησης του εύρους ζώνης (bandwidth demands), το οποίο με τη σειρά του καθορίζεται από τη κίνηση που παράγεται σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Στη προσομοίωσή μας, οι απαιτήσεις της εισερχόμενης κίνησης ακολουθούν μία κατανομή Poisson, όπου η παράμετρος  $\lambda$  λαμβάνει διακριτές τιμές για κάθε χρονική περίοδο.

##### 4.1.1. Πρώτο Σενάριο

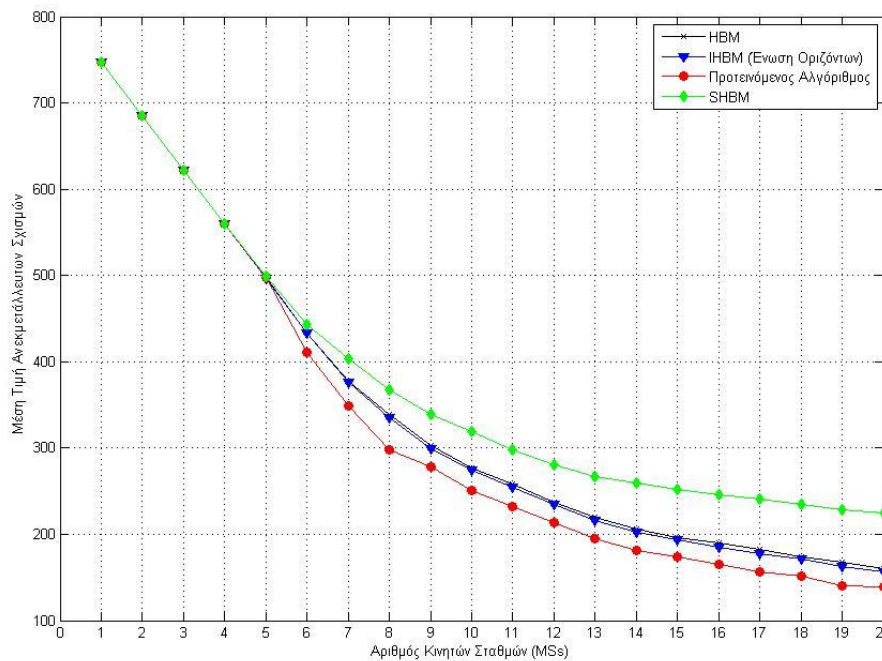
Στο πρώτο σενάριο η ζήτηση του εύρους ζώνης της εισερχόμενης κίνησης είναι διαφορετική για συγκεκριμένο αριθμό πλαισίων. Ο παρακάτω Πίνακας 10 απεικονίζει τη διαφορετική ζήτηση.

Traffic Classes	Very High	High	Medium	Low
<b>Corresponding Frames</b>	1250	1250	1250	1250
<b><math>\lambda</math> (slots)</b>	100	75	50	25

**Πίνακας 10:** Κίνηση κατανομής Poisson

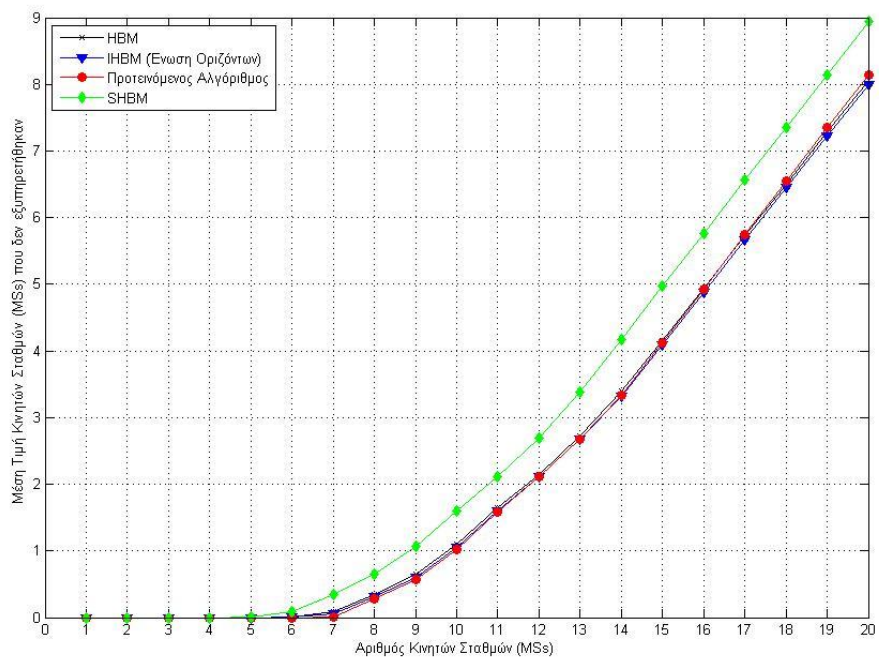


Για κάθε περίπτωση, ο αριθμός των συνδεδεμένων κινητών σταθμών (MSs) στο σταθμό βάσης (BS) διαφέρει και ποικίλει από 1 έως 20. Παρακάτω, λοιπόν, απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το πρώτο σενάριο και περιλαμβάνουν τρία γραφήματα. Το πρώτο αφορά τη μέση τιμή των ανεκμετάλλευτων σχισμών (idle slots) καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κινητών σταθμών (MSs). Το δεύτερο αφορά τη μέση τιμή των κινητών σταθμών (MSs) που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς ο αριθμός τους αυξάνεται και το τρίτο αφορά τη μέση τιμή των σχισμών που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς ο αριθμός των ΚΣ αυξάνεται.



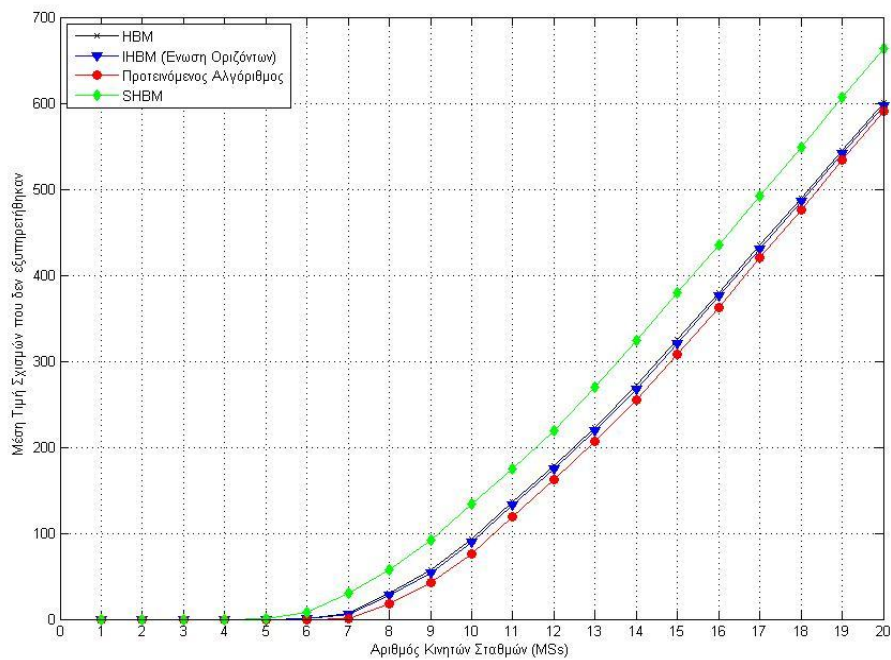
**Σχήμα 25:** 1ο Σενάριο: Μέση τιμή των ανεκμετάλλευτων σχισμών (idle slots) καθώς αυξάνεται ο αριθμός των MSs.

Παρατηρούμε στο Σχήμα 25 με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος (με τη διαίρεση των αιτήσεων – κόκκινο χρώμα) παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση, αφήνοντας τις λιγότερες ανεκμετάλλευτες σχισμές καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κινητών σταθμών. Αντίθετα, ο SHBM αλγόριθμος (πράσινο χρώμα) παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση, με τους άλλους δύο αλγόριθμους (HBM και IHBM (μαύρο και μπλε χρώμα, αντίστοιχα)) να βρίσκονται ανάμεσα σ' αυτόν και τον προτεινόμενο και πολύ κοντά μεταξύ τους.



**Σχήμα 26:** 1ο Σενάριο: Μέση τιμή των κινητών σταθμών (MSs) που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς ο αριθμός τους αυξάνεται

Στο Σχήμα 26 με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, παρατηρούμε ότι η απόδοση των αλγορίθμων HBM, IHBM και Proposed έχει πολύ μικρή διαφορά, με τον προτεινόμενο να είναι λίγο καλύτερος στην αρχή αλλά όσο αυξάνονται οι κινητοί σταθμοί και προστίθενται νέες αιτήσεις από τις διαιρέσεις που κάνει, να χειροτερεύει λίγο η απόδοσή του σε σχέση με τους άλλους δύο. Ο SHBM και σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση έχοντας τους περισσότερους κινητούς σταθμούς που δεν εξυπηρετήθηκαν.



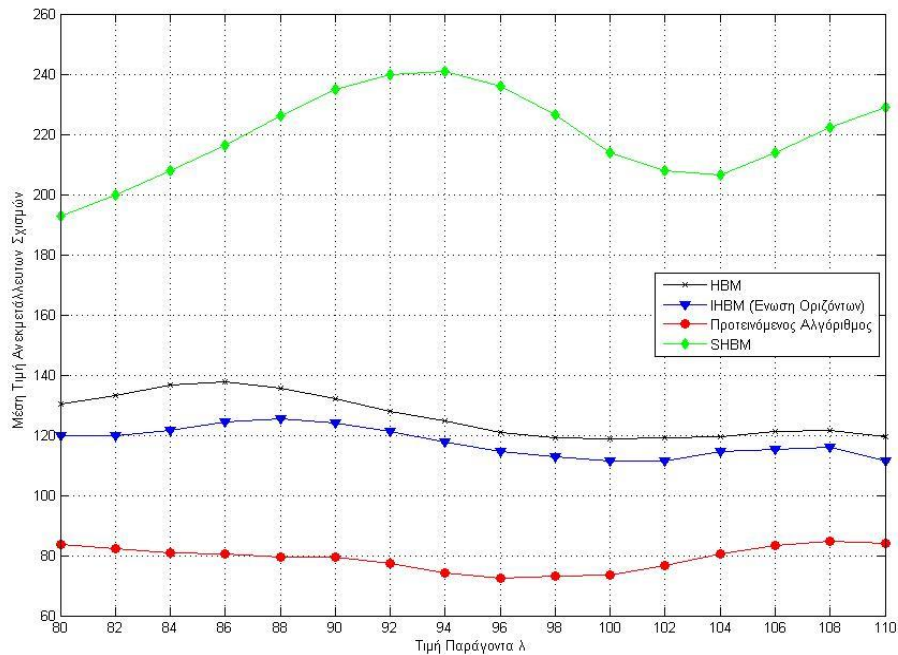
**Σχήμα 27:** 1ο Σενάριο: Μέση τιμή των σχισμών που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς ο αριθμός των MSs αυξάνεται

Το Σχήμα 27 σχετίζεται με το Σχήμα 26 καθότι είναι συνάρτηση των κινητών σταθμών που δεν εξυπηρετήθηκαν αφού παρουσιάζει τη μέση τιμή των σχισμών τους, που επίσης όπως είναι λογικό δεν εξυπηρετήθηκαν. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει τη καλύτερη απόδοση ενώ στο προηγούμενο Σχήμα 26, είχε λίγο χειρότερη απόδοση σε σχέση με τους HBM και IHBM από τους 16 κινητούς σταθμούς (MSs) και μετά. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ προστίθενται νέες αιτήσεις από τη διαίρεση που πραγματοποιεί, παρόλα αυτά ο αριθμός των σχισμών των αιτήσεων αυτών είναι μικρός με αποτέλεσμα και η μέση τιμή τους να είναι μικρότερη από τους άλλους δύο αλγορίθμους. Για τον SHBM ισχύει και εδώ ότι παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση.

#### 4.1.2. Δεύτερο Σενάριο

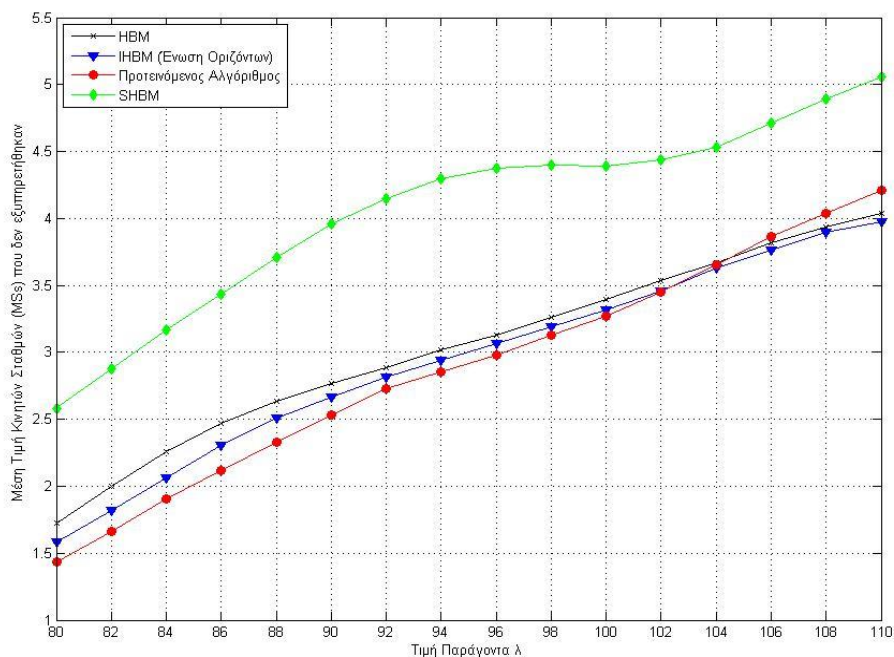
Το δεύτερο σενάριο προσομοιώνει τη «συμπεριφορά» των αλγορίθμων κατανομής πόρων κάτω από διαφορετικές συνθήκες κίνησης. Πιο συγκεκριμένα, ο άξονας  $\chi$  αντιπροσωπεύει τη τιμή του  $\lambda$  της κατανομής Poisson, η οποία καθορίζει τις σχισμές (slots) των αιτήσεων ανά πλαίσιο. Η παράμετρος  $\lambda$  παίρνει διαφορετικές τιμές, από 80 έως 100 (σχισμές), ενώ ο αριθμός των κινητών σταθμών είναι σταθερός και ίσος με 10. Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το δεύτερο σενάριο και περιλαμβάνουν τρία γραφήματα. Το πρώτο αφορά τη μέση τιμή των ανεκμετάλλεωτων

σχισμών (idle slots) καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα  $\lambda$ . Το δεύτερο αφορά τη μέση τιμή των κινητών σταθμών (MSs) που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα  $\lambda$  και το τρίτο αφορά τη μέση τιμή των σχισμών που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς και πάλι αυξάνεται η τιμή του παράγοντα  $\lambda$ .



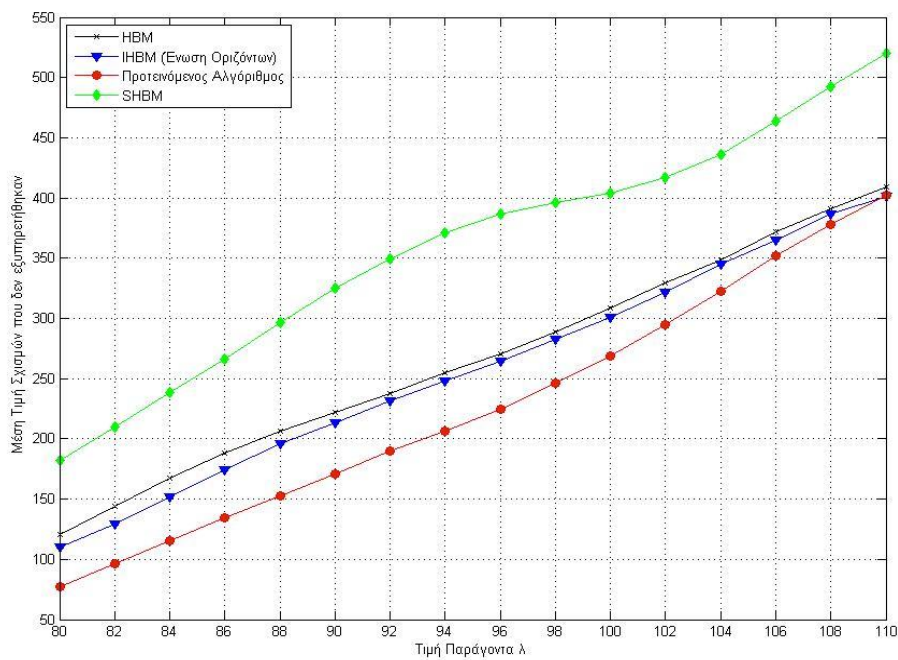
**Σχήμα 28:** 2ο Σενάριο: Μέση τιμή των ανεκμετάλλεωτων σχισμών (idle slots) καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα  $\lambda$

Παρατηρούμε στο Σχήμα 28 με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος (με τη διαίρεση των αιτήσεων – κόκκινο χρώμα) παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση με αρκετή διαφορά, αφήνοντας τις λιγότερες ανεκμετάλλεωτες σχισμές καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα  $\lambda$ . Αντίθετα, ο SHBM αλγόριθμος (πράσινο χρώμα) παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση με σχετικά μεγάλη διακύμανση. Οι άλλοι δύο αλγόριθμοι HBM και IHBM (μαύρο και μπλε χρώμα, αντίστοιχα) είναι και πάλι αρκετά κοντά σε απόδοση, αλλά ο IHBM παρουσιάζεται λιγάκι καλύτερος λόγω της ένωσης των οριζόντων.



**Σχήμα 29:** 2ο Σενάριο: Μέση τιμή των κινητών σταθμών (MSs) που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα λ

Στο Σχήμα 29, η απόδοση των αλγορίθμων HBM, IHBM και του προτεινόμενου είναι πολύ κοντά, με τον τελευταίο να είναι λίγο καλύτερος στην αρχή αλλά όσο αυξάνεται η τιμή του παράγοντα λ και προστίθενται νέες αιτήσεις από τις διαιρέσεις που κάνει, να χειροτερεύει λίγο η απόδοσή του σε σχέση με τους άλλους δύο. Ο SHBM και σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση έχοντας τους περισσότερους κινητούς σταθμούς που δεν εξυπηρετήθηκαν και τη μεγαλύτερη διακύμανση.



**Σχήμα 30:** 2ο Σενάριο: Μέση τιμή των σχισμών που δεν εξυπηρετήθηκαν καθώς αυξάνεται η τιμή του παράγοντα λ

Τέλος, το Σχήμα 30 σχετίζεται, με τη σειρά του, με το Σχήμα 29 καθότι είναι συνάρτηση των κινητών σταθμών που δεν εξυπηρετήθηκαν αφού παρουσιάζει τη μέση τιμή των σχισμών τους, που επίσης όπως είναι λογικό δεν εξυπηρετήθηκαν. Παρόλα αυτά, παρατηρούμε ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει τη καλύτερη απόδοση ενώ στο προηγούμενο Σχήμα 29, είχε λίγο χειρότερη απόδοση σε σχέση με τους HBM και IHBM από το  $\lambda=104$  και μετά. Αυτό συμβαίνει γιατί ενώ προστίθενται νέες αιτήσεις από τις διαιρέσεις που πραγματοποιεί, παρόλα αυτά ο αριθμός των σχισμών των αιτήσεων αυτών είναι μικρός με αποτέλεσμα και η μέση τιμή τους να είναι μικρότερη από τους άλλους δύο αλγορίθμους. Για τον SHBM ισχύει και εδώ ότι έχει τη χειρότερη απόδοση και τη μεγαλύτερη διακύμανση.



## Κεφάλαιο 5. Επισκόπηση - Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ολοκληρωμένη παρουσίαση του προτύπου IEEE 802.16 (WiMAX) καθώς και η παρουσίαση των γνωστότερων συστημάτων (αλγορίθμων) κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA. Επιπλέον, αναλύθηκε και παρουσιάστηκε ένα νέο βελτιωμένο σχήμα κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA για δίκτυα WiMAX.

Πιο συγκεκριμένα, στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάστηκε το θεωρητικό υπόβαθρο και πρακτικό πλαίσιο που είναι απαραίτητα για την κατανόηση της τεχνολογίας WiMAX. Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάστηκαν τα κύρια γνωρίσματα της τεχνολογίας WiMAX καθώς και τα χαρακτηριστικά του φυσικού επιπέδου και επιπέδου MAC του προτύπου αυτού. Στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν οι αλγόριθμοι κατανομής πόρων δύο διαστάσεων **OCSA**, **HBM**, **IHBM** και **SHBM**. Ο αλγόριθμος **OCSA** βασίζεται στη δημιουργία ορθογωνίων κατανομής μέσα στον OFDMA κάδο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δυνατά ζευγάρια διαστάσεων του ορθογωνίου κατανομής για κάθε συγκεκριμένη ριπή. Ο αλγόριθμος **HBM** τοποθετεί τις αιτήσεις στον OFDMA κάδο σαν ορθογώνια, αφήνοντας ανεκμετάλλευτο τον ελάχιστο δυνατό χώρο. Στη συνέχεια, δημιουργεί οριζόντες προκειμένου να τοποθετήσει στον κάδο όσες αιτήσεις δεν μπόρεσαν να κατανεμηθούν στο πρώτο βήμα. Ο αλγόριθμος **IHBM** αποτελεί μία βελτίωση της δεύτερης φάσης του αλγορίθμου **HBM**. Ο αλγόριθμος αυτός, λοιπόν, όταν διαπιστώσει ότι μία αίτηση δεν χωράει σε κανέναν οριζόντα του κάδου, ξεκινάει και συνενώνει τους οριζόντες έναν έναν προκειμένου να δημιουργήσει ένα νέο μεγαλύτερο οριζόντα, στον οποίο θα τοποθετηθεί η αίτηση που πριν δεν χωρούσε. Τέλος, ο αλγόριθμος **SHBM** τοποθετεί σε πρώτη φάση στο κάδο τη μεγαλύτερη αίτηση του χρονοπρογραμματιστή αφήνοντας ανεκμετάλλευτο τον ελάχιστο δυνατό χώρο. Στη συνέχεια, τοποθετεί τις επόμενες αιτήσεις με βάση το ύψος της πρώτης αίτησης ώστε να δημιουργήσει μία νέα βάση στον κάδο.

Επιπλέον, στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάστηκε ένα νέο σχήμα κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA για δίκτυα WiMAX, προκειμένου να αξιοποιήσουμε καλύτερα σε σχέση με τους προηγούμενους αλγορίθμους το διαθέσιμο χώρο στον OFDMA κάδο κατανομής αλλά και να εξυπηρετήσουμε περισσότερες αιτήσεις εισερχόμενης κίνησης. Ο **προτεινόμενος αλγόριθμος** στηρίζεται στον αλγόριθμο **IHBM** αλλά περιλαμβάνει μία βελτίωση. Η βελτίωση αυτή είναι ότι αν μία αίτηση μετά και τη συνένωση των οριζόντων εξακολουθεί να μην χωράει στον ενωμένο μεγαλύτερο οριζόντα, τότε ο αλγόριθμος προβαίνει στη διαίρεσή της και τοποθετεί το πρώτο κομμάτι της αίτησης στον ενωμένο οριζόντα. Το δεύτερο κομμάτι της αίτησης επιστρέφει σαν μία νέα αίτηση στο σετ του χρονοπρογραμματιστή και θα εξυπηρετηθεί στο επόμενο πλαίσιο. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των αλγορίθμων **HBM**, **IHBM**, **SHBM** και του **προτεινόμενου** και συγκρίθηκε η απόδοσή τους.

Παρατηρώντας, λοιπόν, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εύλογα καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος που προτείνεται στη παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει συνολικά τη καλύτερη απόδοση, άλλοτε σε μικρότερο βάθος και άλλοτε σε μεγαλύτερο. Πιο αναλυτικά, στο πρώτο σενάριο ο **προτεινόμενος αλγόριθμος** αφήνει

ανεκμετάλλευτες τις λιγότερες σχισμές από όλους τους υπόλοιπους αλγόριθμους. Όσον αφορά τους κινητούς σταθμούς που δεν εξυπηρετήθηκαν, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει σχεδόν παρόμοια απόδοση με τους αλγόριθμους **HBM** και **IHBM**, ενώ ο αλγόριθμος **SHBM** εμφανίζει και πάλι τη χειρότερη απόδοση από όλους τους υπόλοιπους. Επιπλέον, ο **προτεινόμενος αλγόριθμος** παρουσιάζει και πάλι τη καλύτερη απόδοση από όλους τους υπόλοιπους αλγόριθμους όσον αφορά τις σχισμές που δεν εξυπηρετήθηκαν. Στη συνέχεια, στο δεύτερο σενάριο οι διαφορές στην απόδοση των τεσσάρων αλγορίθμων είναι περισσότερο εμφανείς. Χαρακτηριστικά, ο **προτεινόμενος αλγόριθμος** παρουσιάζει τη καλύτερη απόδοση με σημαντική διαφορά (ειδικά απέναντι προς τον αλγόριθμο **SHBM**) όσον αφορά τις ανεκμετάλλευτες σχισμές που αφήνει. Σε σχέση με τους κινητούς σταθμούς που δεν εξυπηρετήθηκαν, ο **προτεινόμενος αλγόριθμος** βρίσκεται και πάλι πολύ κοντά σε απόδοση με τους αλγόριθμους **HBM** και **IHBM**, αλλά παρουσιάζεται και πάλι καλύτερος από όλους όσον αφορά τις σχισμές που δεν εξυπηρετήθηκαν.

Συνολικά, λοιπόν, ο **προτεινόμενος αλγόριθμος** εκμεταλλεύεται καλύτερα από όλους τους υπόλοιπους αλγόριθμους το διαθέσιμο εύρος ζώνης, εξυπηρετώντας περισσότερες αιτήσεις και αφήνοντας τις λιγότερες ανεκμετάλλευτες σχισμές. Οι αλγόριθμοι **HBM** και **IHBM** βρίσκονται πολύ κοντά σε απόδοση μεταξύ τους με τον τελευταίο να έχει ένα ελαφρύ προβάδισμα λόγω της ένωσης των οριζόντων. Τέλος, ο αλγόριθμος **SHBM** παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση μεταξύ των τεσσάρων αυτών αλγορίθμων με την διαφορά από τους υπόλοιπους να είναι ιδιαίτερα εμφανής στο δεύτερο σενάριο και ειδικά σε σχέση με τον **προτεινόμενο αλγόριθμο**.

Μελοντικές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσαν να είναι ο επιπλέον πειραματισμός με εναλλακτικούς αλγόριθμους κατανομής πόρων σε συστήματα OFDMA, καθώς και η εισαγωγή της υποστήριξης ποιότητας υπηρεσιών (QoS) στη διαδικασία της κατανομής πόρων.



## Αναφορές – Βιβλιογραφία

- [1] ITU. Telecommunications indicators update – 2004, <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/>
- [2] In-stat Report. Paxton. The broadband boom continues: Worldwide subscribers pass 200 million, Μάρτιος 2006
- [3] Fiona Vanier. World Broadband Statistics: Q4 2009, Μάρτιος 2009
- [4] Schroth. The evolution of WiMAX service providers and applications. Yankee Group Report, Σεπτέμβριος 2005
- [5] R. W. Chang. Synthesis of band-limited orthogonal signals for multichannel data transmission. Bell Systems Technical Journal, Δεκέμβριος 1966
- [6] J. L. Holsinger. Digital communication over fixed time-continuous channels with memory, with special application to telephone channels. PHD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1964
- [7] R. G. Gallager. Information Theory and Reliable Communications. Wiley, 1968. 33
- [8] S. Weinstein and P. Ebert. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform. IEEE Transactions on Communications, Οκτώβριος 1971.
- [9] L. J. Cimini. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. IEEE Transactions on Communications, Ιούλιος 1985.
- [10] IEEE. Standard 802.16-2004. Part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems, Οκτώβριος 2004
- [11] IEEE. Standard 802.16e-2005. Part 16: Air interface for fixed and mobile wireless broadband access systems – Amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in licensed band, Δεκέμβριος 2005
- [12] WiMAX Forum. Mobile WiMAX – Part I: A technical overview and performance evaluation. Συλλογή εργασιών, Μάρτιος 2006, [www.wimaxforum.org](http://www.wimaxforum.org)
- [13] WiMAX Forum. Mobile WiMAX – Part II: A comparative analysis. Συλλογή εργασιών, Απρίλιος 2006, [www.wimaxforum.org](http://www.wimaxforum.org)
- [14] WiMAX Forum. WiMAX Forum Mobile System Profile, 2006-2007

- [15] Goldsmith, A., and P. Varaiya. "Capacity of Fading Channels with Channel Side Information". IEEE Trans. on Information Theory. Vol. 43, No. 6, Nov. 1997, pp. 1986-1992
- [16] Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed. "Fundamentals of WiMAX", Φεβρουάριος 2007
- [17] Αθανάσιος Κανάτας, Φίλιππος Κωνσταντίνου, Γεώργιος Πάντος. "Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών", 2008
- [18] Zhang, Y., J. and Letaief, K. B., "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems". IEEE Transactions on Wireless Communications, Σεπτέμβριος 2004
- [19] Rhee. W., and Cioffi, J., M., "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation". In Proc. Of IEEE Vehicular Technology Conference, Μάιος 2000
- [20] Z. Shen, J. G. Andrews and B. L. Evans. "Optimal power allocation for multiuser OFDM". In Proc. of IEEE Globecom. San Francisco, Δεκέμβριος 2003
- [21] I. Wong, Z. Shen, B. Evans and J. Andrews. "A low complexity algorithm for proportional resource allocation in OFDMA systems". In Proc. of IEEE Signal Processing Workshop, Οκτώβριος 2004.
- [22] D. Tse. Multiuser diversity in wireless networks. In Stanford Wireless Communications Seminar, [www.stanford.edu/group/wcs/](http://www.stanford.edu/group/wcs/), Απρίλιος 2001
- [23] P. Viswanath, D. Tse, and R. Laroia. "Opportunistic beamforming using dumb antennas". IEEE Transactions on Information Theory, Ιούνιος 2002
- [24] Chakchai So-In, Raj Jain, Abdel-Karim Al Tamimi. "OCSA: An Algorithm for Burst Mapping in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks"
- [25] Panagiotis G. Sarigiannidis, Georgios I. Papadimitriou, Petros Nicopolitidis, Mohammad S. Obaidat, Andreas S. Pomportsis. "A Novel Adaptive Mapping Scheme for IEEE 802.16 Mobile Downlink Framing"
- [26] Panagiotis G. Sarigiannidis, Malamati D. Louta, Georgios I. Papadimitriou, Petros Nicopolitidis, Mohammad S. Obaidat, Andreas S. Pomportsis. "ADAMAS: An Efficient Adaptive Mapping Scheme for Downlink Sub-Frame in Mobile WiMAX Access Networks", 2010

## Συντομογραφίες

3DES	Triple Data Encryption Standard
AAS	Adaptive Antenna System
ACKCH	ACKnowledgment Channel
AES	Advanced Encryption Standard
AMC	Adaptive Modulation and Coding
ARQ	Automatic Repeat request
BE	Best Effort
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BRS	Broadband Radio Services
BS	Base Station
BW	Bandwidth
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CID	Connection Identifier
CMAC	Cipher-based Message Authentication Code
CPE	Customer Premise Equipment
CQICH	Channel Quality Indicator Channel
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSI	Channel State Information
DECT	Digital-Enhanced cordless telephony
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
EAP	Extensible Authentication Protocol
EIRP	Effective Isotropic Radiated Power
ErtPS	Extended real-time Packet Service
ETSI	European Telecommunication and Standards Institute
FBSS	Fast Base Station Switching
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex or Duplexing
FEC	Forward Error Correction
FFC	Federal Communications Commission
FFT	Fast Fourier Transform
FFTH	Fiber-to-the-Home
FIPS	Federal Information Processing Standard
FUSC	Full Usage of SubCarriers
FWA	Fixed Wireless Access
GMH	Generic Mac Header
H-ARQ	Hybrid Automatic Retransmission Request
HBM	Horizon Burst Mapping
HDTV	High Definition Television
HHO	Hard Handover
HIPERMAN	High-Performance Metropolitan Area Network
HMAC	Hashed Message Authentication Code
HUMAN	High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
IHBM	Improved Horizon Burst Mapping

IP	Internet Protocol
ISI	Intersymbol Interference
ISP	Internet Service Provider
ITU	International Telecommunications Union
LAN	Local Area Network
LDPC	Low Density Parity Check
LMDS	Local Multipoint Distribution Systems
LOS	Line-Of-Sight
MAC	Medium Access Control Layer
MAN	Metropolitan Area Network
MBS	Multicast Broadcast Service
MD5	Message-Digest 5 Algorithm
MDHO	Macro Diversity Handover
MDS	Multipoint Distribution Service
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
MPDU	MAC Protocol Data Unit
MS	Mobile Station
MSDU	MAC Service Data Unit
NLOS	Non-Line-of-sight
nrtPS	Non-real-time Polling Service
OCSA	One Column Striping with non-increasing Area first mapping
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PDU	Protocol Data Unit
PF	Proportional Fairness
PHY	Physical Layer
PKM	Privacy and Key Management
PRC	Proportional Rate Constraints
PUSC	Partial Usage of SubCarriers
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
RF	Radio Frequency
RSA	Rivest, Shamir, Adleman
rtPS	Real-time Polling Service
SC	Single Carrier
SDU	Service Data Unit
SFID	Service Flow Identifier
SHBM	Same Height Burst Mapping
SME	Small and Medium Enterprise
SNIR	Signal to Noise Plus Interference Ratio
SNR	Signal-to-noise Ratio
SOHO	Small Office / Home Office
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplex or Duplexing
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TUSC	Tile Usage of SubCarriers
UGS	Unsolicited Grant Service
UHF	Ultrahigh Frequency

UL	Uplink
U-NII	Unlicensed National Information Infrastructure
VDSL	Very High Data Rate Digital Subscriber Loop
VoIP	Voice over Internet Protocol
WCS	Wireless Communications Services
WiMAX	Worldwide Interoperability Microwave Access
WirelessMAN	Wireless Metropolitan Area Networks
WirelessHUMAN	Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks
WISP	Wireless Internet Service Provider
WLL	Wireless Local Loop

## Λεξικό

Κυριότεροι όροι:

Adaptive	Προσαρμοστικός
Adjacent	Παρακείμενος
Allocation	Κατανομή
Amplifier	Ενίσχυση
Antenna	Κεραία
Backhauling	Κόμβος Υποστήριξης
Bandwidth	Εύρος Ζώνης
Base Station (BS)	Σταθμός Βάσης
Beamforming	Διαμόρφωση Δέσμης Ραδιοσήματος
Bin	Κάδος
Bit Rate	Ρυθμός Μετάδοσης
Broadband	Ευρεία
Broadcast	Ευρεία Εκπομπή
Burst	Ριπή
Cable	Καλωδιακό Μόντεμ
Cell	Κυψέλη
Client	Πελάτης
Cluster	Σύμπλεγμα
Coherent	Συνεκτικός
Constant	Σταθερός
Constellation	Αστερισμός
Convergence	Σύγκλιση
Costcurve	Καμπύλη Κόστους
Demodulation	Αποδιαμόρφωση
Diversity	Διαφορισμός
Downlink	Εισερχόμενη Κίνηση
Efficiency	Αποδοτικότητα
Encryption	Κρυπτογράφηση
Estimation	Εκτίμηση
Fairness	Αμεροληψία
Frame	Πλαίσιο
Frequency	Συχνότητα
Handover	Μεταπομπή
Horizon	Ορίζοντας
Hot Spot	Σημείο Πρόσβασης
Hybrid	Υβρίδιο
Idle	Αδρανής
Interference	Παρεμβολή
Interleaving	Διαστρωμάτωση
Interoperability	Διαλειτουργικότητα
Internet Service Provider (ISP)	Εταιρία Παροχής Υπηρεσιών Διαδικτύου
Intersymbol	Διασυμβολική
Jitter	Μεταβολή Καθυστερήσης
Layer	Στρώμα
Legend	Επεξήγηση

Line-of-sight	Σύνδεση Οπτικής Επαφής
Mapper	Μηχανισμός Αντιστοίχισης
Mapping	Αντιστοίχιση
Mobile Station	Κινητός Σταθμός
Mode	Κατάσταση
Modulation	Διαμόρφωση
Multicast	Πολυεκπομπή
Multipath	Πολλαπλή Διαδρομή
Multiplexing	Πολυπλεξία
Nomadcity	Νομαδικότητα
Non line-of-sight	Σύνδεση Μη Οπτικής Επαφής
Payload	Ωφέλιμο Φορτίο
Preamble	Επικεφαλίδα
QoS	Ποιότητα Υπηρεσιών
Permutation	Αντιμετάθεση
Point-to-multipoint	Σημείο προς Πολλαπλά Σημεία
Point-to-point	Σημείο προς Σημείο
Polling	Σταθμοσκοπήση
Reciprocity	Ανταποδοτικότητα
Region	Πεδίο - Περιοχή
Regression	Οπισθοδρόμηση
Request	Αίτηση
Robust	Ενισχυμένος
Robustness	Ανθεκτικότητα
Scalable	Κλιμακούμενος
Scheduler	Χρονοπρογραμματιστής
Server	Εξυπηρετής
Service	Υπηρεσία
Sleep	Αναστολή Λειτουργίας
Slot	Σχισμή
SNR	Σηματοθρομβικός Λόγος
Spatial	Χωρικός
Standard	Πρωτόκολλο ή Πρότυπο
Stream	Ροή Δεδομένων
Sub-carrier	Υποφέρουσα
Sub-channel	Υπο-κανάλι
Sub-channelization	Υπο-διαυλοποίηση
Sub-frame	Υπο-πλαίσιο
Sub-layer	Υπο-επίπεδο
Suppression	Καταστολή
Tile	Τμήμα
Tone	Τόνος
Traffic	Κίνηση Δεδομένων
Unserved	Ανεκμετάλλευτος
Unsolicited	Αυτόκλητος
Uplink	Εξερχόμενη Κίνηση
Variable	Μεταβλητός
Wireless	Ασύρματος