



**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ Τ.Ε.Ι. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Μελέτη απόδοσης ασύρματων δικτύων  
WiMAX (IEEE 802.16) μέσω τεχνικών  
προσομοίωσης**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρήστος Σ. Κυριακόπουλος**  
**ΑΜ: 06/3030**

**Επιβλέπων: Δρ. Χατζημίσσιος Περικλής**  
**Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Πληροφορικής Α.Τ.Ε.Ι.Θ.**

**Θεσσαλονίκη, Μάιος 2011**

## Πρόλογος

Η παρούσα πτυχιακή εργασία δημιουργήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Πληροφορικής του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης. Η πτυχιακή εργασία έχει τίτλο « *Μελέτη απόδοσης ασύρματων δικτύων WiMAX (IEEE 802.16) μέσω τεχνικών προσομοίωσης*» και ο επιβλέπων καθηγητής ήταν ο Δρ. Περικλής Χατζημίσιος, Επίκουρος καθηγητής του Τμήματος Πληροφορικής του Α.Τ.Ε.Ι.Θ. και εκπονήθηκε σύμφωνα με κανονισμό πτυχιακών εργασιών του Τμήματος.

## Περίληψη

Ο κύριος σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός και η προσομοίωση ενός δικτύου βασισμένο στο πρωτόκολλο ασύρματης δικτύωσης WiMAX (IEEE 802.16) με τη χρήση του προσομοιωτή OPNET Modeler, καθώς και η μελέτη ως προς τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών υψηλής ποιότητας προς τους χρήστες του δικτύου.

Στο πρώτο μέρος της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζεται το πρωτόκολλο IEEE 802.16 (WiMAX), τα χαρακτηριστικά του, η δομή του, ο τρόπος λειτουργίας του καθώς και η εξέλιξη του με τη πάροδο του χρόνου. Επίσης, γίνεται αναφορά στην ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Services - QoS) η οποία υποστηρίζεται από το πρωτόκολλο και αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιεί το WiMAX.

Το δεύτερο μέρος της πτυχιακής εργασίας αποτελείται από το ερευνητικό κομμάτι της εργασίας όπου παρουσιάζεται το δίκτυο WiMAX που δημιουργήθηκε στο OPNET Modeler και γίνεται μία ανάλυση των αποτελεσμάτων καθώς και μία σύγκριση μεταξύ των διάφορων σεναρίων προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν. Τέλος, παρουσιάζονται κάποια γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη και ανάλυση των συγκεκριμένων σεναρίων προσομοίωσης.

## Abstract

The main scope of the current B.Sc. thesis is the designing and simulation of a network based to the wireless protocol IEEE 802.16 (WiMAX) by employing the OPNET Modeler simulator and the study of the network's ability to provide high quality services to the end users.

The first part of the thesis presents the IEEE 802.16 protocol, its characteristics, its structure, and operational characteristics as well as its evolution during time. Finally, a reference to the supported Quality of Services (QoS) is presented and the QoS methods that the protocol utilizes are analyzed.

The second part of the thesis presents the WiMAX network that was implemented by employing the OPNET Modeler simulator and the analysis of the results as a comparison between the different developed scenarios. Finally, the thesis presents various conclusions that were obtained from the performed study as well as from the analysis of the simulation scenarios.

## Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους αυτούς τους ανθρώπους που συνεισέφεραν με οποιοδήποτε τρόπο στην υλοποίηση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Πρώτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας Δρ. Περικλή Χατζημίσιο ο οποίος με βοήθησε καθοδηγώντας και λύνοντας μου διάφορες απορίες που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της πτυχιακής μου. Τέλος, θέλω να τον ευχαριστήσω για την συνεργασία και την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Θωμά Λάγκα για την βοήθεια και τη βιβλιογραφία που μου παρείχε κατά τη διάρκεια ανάπτυξης του ερευνητικού μέρους της πτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους ανθρώπους που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια τα εφόδια και τη στήριξη ώστε να φτάσω μέχρι εδώ οι οποίοι δεν είναι άλλοι από τους γονείς μου.

# Πίνακας περιεχομένων

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	II
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	III
ABSTRACT.....	IV
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	V
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	VI
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	IX
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	XI
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	1
1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	2
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΙΕΕΕ 802.16 (WIMAX).....</b>	<b>4</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	4
2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΥΠΟΥ ΙΕΕΕ 802.16 (WIMAX).....	4
2.3 ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ WIMAX.....	6
2.4 WIMAX ΡΗΥ (ΦΥΣΙΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ).....	8
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟ (MEDIUM ACCESS CONTROL - MAC) ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟΥ ΙΕΕΕ 802.16.....</b>	<b>11</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	11
3.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟ .....	11

<b>3.3</b>	<b>ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΠΡΟΣΒΑΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟ</b> .....	14
3.3.1	<i>Υποεπίπεδο σύγκλισης CS (Convergence sublayer)</i> .....	15
3.3.2	<i>Common Part Sublayer (CPS)</i> .....	16
3.3.3	<i>Υποεπίπεδο Ασφάλειας (Privacy sublayer)</i> .....	17
3.3.4	<i>MAC PDU</i> .....	18
3.3.4.1	Δημιουργία PDU και χρήση ARQ (Automatic Repeat Request) .....	20
3.3.5	<i>Υποεπίπεδο σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence (TC) Layer)</i> .....	21
3.4	<b>ΈΛΕΓΧΟΣ ΡΑΔΙΟΖΕΥΞΗΣ (RADIO LINK CONTROL - RLC)</b> .....	22
3.5	<b>ΔΕΣΜΕΥΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ (CHANNEL ACQUISITION)</b> .....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (QUALITY OF SERVICE - QOS) ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16 (WIMAX)</b> .....		26
4.1	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	26
4.2	<b>ΑΝΑΛΥΣΗ QoS</b> .....	26
4.3	<b>ΡΟΗ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (SERVICE FLOW)</b> .....	27
4.4	<b>ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ</b> .....	30
4.5	<b>ΚΛΑΣΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (SERVICE CLASSES)</b> .....	31
4.6	<b>ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΟΙ ΤΥΠΟΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ (QoS) ΑΠΟ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEEE 802.16</b> ...	33
4.7	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ</b> .....	35
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ WIMAX ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ ORNET MODELER</b> .....		36
5.1	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	36
5.2	<b>Ο ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ORNET MODELER</b> .....	37
5.3	<b>ΑΡΧΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ WIMAX</b> .....	38
5.3.1	<i>Αρχικό σενάριο προσομοίωσης</i> .....	39
5.3.1.1	<i>Δίκτυο προσομοίωσης</i> .....	39
5.3.1.2	<i>Εφαρμογές</i> .....	43
5.3.1.2	<i>Ρυθμίσεις προσομοίωσης</i> .....	53
5.3.2	<i>Αποτελέσματα προσομοίωσης</i> .....	55
5.3.3	<i>Συμπεράσματα προσομοίωσης αρχικού σεναρίου</i> .....	66
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ</b> .....		68

6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	68
6.2	2 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ: DATA RATES AND BUFFER SIZE.....	69
6.2.1	Αλλαγές στο δίκτυο.....	69
6.2.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων 2 <sup>ου</sup> σεναρίου και σύγκριση με το αρχικό σενάριο προσομοίωσης.....	70
6.2.3	Συμπεράσματα από την σύγκριση μεταξύ του αρχικού σεναρίου και του 2 <sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης.....	77
6.3	3 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ: QUALITY OF SERVICES .....	78
6.3.1	Αλλαγές στο δίκτυο.....	78
6.3.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων 3 <sup>ου</sup> σεναρίου και σύγκριση με το αρχικό σενάριο προσομοίωσης.....	79
6.3.3	Συμπεράσματα από την σύγκριση μεταξύ του αρχικού σεναρίου και του 3 <sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης.....	86
6.4	4 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ: OPTIMIZED SCENARIO.....	87
6.4.1	Αλλαγές στο δίκτυο.....	87
6.4.2	Παρουσίαση αποτελεσμάτων 4 <sup>ου</sup> σεναρίου .....	89
6.4.3	Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του 4 <sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης .....	95
6.5	5 <sup>ο</sup> ΚΑΙ 6 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ: ΜΕΤΡΗΣΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ VOICE ΣΤΑΘΜΩΝ.....	96
6.5.1	Αλλαγές στο δίκτυο.....	96
6.5.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	97
6.5.3	Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του 5 <sup>ου</sup> και 6 <sup>ου</sup> σεναρίου .....	103
6.6	7 <sup>ο</sup> ΣΕΝΑΡΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ: ΜΕΤΡΗΣΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΒΙΝΤΕΟ ΣΤΑΘΜΩΝ .....	104
6.6.1	Αλλαγές στο δίκτυο.....	104
6.6.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	104
6.6.3	Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του 7 <sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης .....	110
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ .....</b>		<b>112</b>
7.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ .....	112
7.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ.....	113
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>		<b>114</b>



## Λίστα εικόνων

Εικόνα 1: Λειτουργία του πρωτοκόλλου WiMAX.....	7
Εικόνα 2: Δίκτυο WiMAX.....	12
Εικόνα 3: Δομή επιπέδου πρόσβασης στο μέσο .....	15
Εικόνα 4: MAC PDU .....	19
Εικόνα 5: Κατανομή προφίλ εκπομπής WiMAX .....	23
Εικόνα 6: Μοντέλο Αντικειμένων .....	31
Εικόνα 7: Ornet Modeler V16.0 Logo .....	37
Εικόνα 8: Δίκτυο προσομοίωσης Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης .....	40
Εικόνα 9: Εφαρμογή HTTP .....	44
Εικόνα 10: Ρυθμίσεις εφαρμογής HTTP .....	44
Εικόνα 11: Ιδιότητες σελίδας HTTP.....	45
Εικόνα 12: Ιδιότητες εικόνας στη σελίδα HTTP .....	45
Εικόνα 13: Εφαρμογή FTP .....	46
Εικόνα 14: Ρυθμίσεις εφαρμογής FTP.....	46
Εικόνα 15: Εφαρμογή email .....	47
Εικόνα 16: Ρυθμίσεις εφαρμογής Email .....	47
Εικόνα 17: Εφαρμογή VoIP.....	48
Εικόνα 18: Ρυθμίσεις εφαρμογής VoIP .....	48
Εικόνα 19: Ρυθμίσεις εφαρμογής Video.....	49
Εικόνα 20: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης HTTP .....	50
Εικόνα 21: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης Email.....	50
Εικόνα 22: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης FTP .....	51
Εικόνα 23: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης Video .....	51
Εικόνα 24: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης VoIP.....	52
Εικόνα 25: Ρυθμίσεις προσομοίωσης σεναρίου.....	53
Εικόνα 26: Indoor/outdoor σταθμός εργασίας.....	54
Εικόνα 27: Χρόνος εκτέλεσης προσομοίωσης .....	55
Εικόνα 28: Εφαρμογή HTTP: Traffic received/sent.....	56
Εικόνα 29: Εφαρμογή HTTP: Χρόνος απόκρισης σελίδας .....	56
Εικόνα 30: Εφαρμογή Email: Traffic received/sent .....	57
Εικόνα 31: Εφαρμογή Email: Χρόνος απόκρισης Download/Upload.....	58
Εικόνα 32: Εφαρμογή FTP: Traffic received/sent .....	58
Εικόνα 33: Εφαρμογή FTP: Χρόνος απόκρισης Download/Upload .....	59
Εικόνα 34: Απόρριψη κίνησης σταθμού SS_1_1 .....	60
Εικόνα 35: Καθυστέρηση σταθμού SS_1_1 .....	60
Εικόνα 36: Εφαρμογή VoIP: Μέσος όρος από άκρο σε άκρο καθυστέρησης.....	61
Εικόνα 37: Εφαρμογή VoIP: Traffic received/sent .....	62
Εικόνα 38: Jitter εφαρμογής VoIP .....	63
Εικόνα 39: Εφαρμογή Video: Traffic received/sent .....	64
Εικόνα 40: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	65
Εικόνα 41: Υποδίκτυο WiMAX: Load/throughput και καθυστέρηση .....	65
Εικόνα 42: Ρυθμίσεις κλάσης υπηρεσιών Bronze .....	69
Εικόνα 43: Μέγεθος Buffer .....	70
Εικόνα 44: Εφαρμογή HTTP: Traffic received/sent.....	71
Εικόνα 45: Απόκριση σελίδας εφαρμογής HTTP.....	71
Εικόνα 46: Εφαρμογή Email: Traffic received/sent .....	72
Εικόνα 47: Εφαρμογή Email: Χρόνος απόκρισης Download/Upload.....	72

Εικόνα 48: Εφαρμογή FTP: Traffic received/sent .....	73
Εικόνα 49: Εφαρμογή FTP: Χρόνος απόκρισης Download/Upload .....	74
Εικόνα 50: Εφαρμογή VoIP: Traffic received/sent .....	74
Εικόνα 51: Εφαρμογή VoIP: Μέσος όρος από άκρο σε άκρο καθυστέρησης.....	75
Εικόνα 52: Εφαρμογή Video: Traffic received/sent .....	76
Εικόνα 53: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	76
Εικόνα 54: Εφαρμογή HTTP: Traffic received/sent.....	79
Εικόνα 55: Χρόνος απόκρισης σελίδας HTTP .....	80
Εικόνα 56: Εφαρμογή Email: Traffic received/sent .....	81
Εικόνα 57: Εφαρμογή Email: Χρόνος απόκρισης Download/Upload.....	81
Εικόνα 58: Εφαρμογή FTP: Traffic received/sent .....	82
Εικόνα 59: Εφαρμογή FTP: Χρόνος απόκρισης Download/Upload .....	83
Εικόνα 60: Εφαρμογή VoIP: Traffic received/sent .....	83
Εικόνα 61: Μέσος όρος από άκρο σε άκρο καθυστέρησης εφαρμογής VoIP.....	84
Εικόνα 62: Εφαρμογή VoIP: Jitter.....	85
Εικόνα 63: Εφαρμογή Video: Traffic received/sent .....	85
Εικόνα 64: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	86
Εικόνα 65: Φόρτος / ληφθείσα κίνηση Download σταθμού SS_1_3 .....	89
Εικόνα 66: Φόρτος / ληφθείσα κίνηση Upload σταθμού SS_1_3 .....	90
Εικόνα 67: Απόρριψη κίνησης Download/Upload σταθμού SS_1_3.....	90
Εικόνα 68: Καθυστέρηση Download/Upload σταθμού SS_1_3 .....	91
Εικόνα 69: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent .....	92
Εικόνα 70: Εφαρμογή VoIP: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	92
Εικόνα 71: Εφαρμογή VoIP: Jitter.....	93
Εικόνα 72: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent.....	94
Εικόνα 73: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	94
Εικόνα 74: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent .....	97
Εικόνα 75: Εφαρμογή VoIP: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	98
Εικόνα 76: Εφαρμογή VoIP: Jitter.....	98
Εικόνα 77: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent.....	99
Εικόνα 78: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	99
Εικόνα 79: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent .....	100
Εικόνα 80: Εφαρμογή VoIP: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	101
Εικόνα 81: Εφαρμογή VoIP: Jitter.....	101
Εικόνα 82: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent.....	102
Εικόνα 83: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	102
Εικόνα 84: Υποδίκτυο WiMAX: Load/throughput .....	105
Εικόνα 85: Υποδίκτυο WiMAX: Καθυστέρηση.....	106
Εικόνα 86: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent.....	106
Εικόνα 87: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση.....	107
Εικόνα 88: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent .....	108
Εικόνα 89: Εφαρμογή Voice: Καθυστέρηση & Jitter.....	108
Εικόνα 90: Download/Upload Load/throughput σταθμού SS_1_1 .....	109
Εικόνα 91: Υποδίκτυο WiMAX μέσος όρος καθυστέρησης.....	110

## Λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Ρυθμίσεις σταθμών εργασίας αρχικού σεναρίου προσομοίωσης.....	42
Πίνακας 2: Ρυθμίσεις σταθμών Βάσης αρχικού σεναρίου προσομοίωσης.....	43
Πίνακας 3: Ρυθμίσεις σταθμών εργασίας 3 <sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης.....	78
Πίνακας 4: Ρυθμίσεις σταθμών εργασίας 4 <sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης.....	88

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

## 1.1 Εισαγωγή <sup>(6)</sup>

Η ασύρματη τεχνολογία επικοινωνιών έχει γίνει η πιο συναρπαστική περιοχή ανάπτυξης στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της δικτύωσης ηλεκτρονικών υπολογιστών σήμερα. Η ταχεία ανάπτυξη της χρήσης της κινητής τηλεφωνίας, της χρήσης διάφορων υπηρεσιών μέσω δορυφόρου και τελευταία το ασύρματο Internet και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα δημιουργούν τεράστιες αλλαγές στον τομέα των τηλεπικοινωνιών και της δικτύωσης γενικότερα. Η μείωση του κόστους, η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση υπηρεσιών υψηλής ποιότητας και η κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών κάνει τη χρήση των ασύρματων τεχνολογιών επιτακτική. Το πρότυπο IEEE 802.16 ή αλλιώς WiMAX είναι μία τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης η οποία καλύπτει όλες τις παραπάνω ανάγκες και κυρίως παρέχει κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών περιοχών επιτυγχάνοντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης.

## 1.2 Σκοπός της πτυχιακής εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει τίτλο «*Μελέτη απόδοσης ασύρματων δικτύων WiMAX (IEEE 802.16) μέσω τεχνικών προσομοίωσης*» και ο κύριος σκοπός της είναι η μελέτη της απόδοσης δικτύων που χρησιμοποιούν την τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης WiMAX με τη χρήση του προγράμματος προσομοίωσης δικτύων "OPNET Modeler V16.0" το οποίο διαθέτει το Τμήμα Πληροφορικής του Α.Τ.Ε.Ι.Θ.

## 1.3 Δομή της πτυχιακής εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία παρέχει τόσο θεωρητική όσο και ερευνητική γνώση πάνω στη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης WiMAX και στη βήμα-προς-βήμα ανάπτυξη ενός δικτύου της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Αρχικά αναλύεται το πρότυπο IEEE 802.16 (WiMAX) θεωρητικά δηλαδή παρουσιάζεται η δομή του προτύπου, ο τρόπος λειτουργίας του και η εξέλιξη του στο χρόνο. Στο δεύτερο μέρος της πτυχιακής εργασίας παρουσιάζεται το ερευνητικό κομμάτι της εργασίας που ως σκοπό έχει τη δημιουργία και τη σύγκριση δικτύων WiMAX που δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προσομοιωτή " OPNET Modeler V16.0 ". Η δομή της πτυχιακής εργασίας έχει ως εξής:

### ➤ **Θεωρητικό μέρος**

- **1<sup>ο</sup> κεφάλαιο:** Εισαγωγή
  - Εισαγωγή και παρουσίαση του σκοπού και της δομής της πτυχιακής εργασίας
- **2<sup>ο</sup> κεφάλαιο:** Το πρότυπο IEEE 802.16 WiMAX
  - Παρουσίαση και ανάλυση του προτύπου IEEE 802.16 WiMAX
- **3<sup>ο</sup> κεφάλαιο:** Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control (MAC)) του πρωτοκόλλου IEEE 802.16
  - Παρουσίαση και ανάλυση του επιπέδου πρόσβασης στο μέσο του προτύπου IEEE 802.16
- **4<sup>ο</sup> κεφάλαιο:** Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Services (QoS)) στο πρότυπο IEEE 802.16
  - Παρουσίαση και ανάλυση των τεχνικών QoS που χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.16 WiMAX

### ➤ **Ερευνητικό μέρος**

- **5<sup>ο</sup> κεφάλαιο:** Προσομοίωση δικτύου WIMAX με τη χρήση του προσομοιωτή Opnet Modeler

- Παρουσίαση του δικτύου προσομοίωσης που δημιουργήθηκε και ανάλυση των αποτελεσμάτων του αρχικού σεναρίου
  - **6° κεφάλαιο:** Εναλλακτικά σενάρια προσομοίωσης
    - Παρουσίαση και σύγκριση των διάφορων εναλλακτικών σεναρίων προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν
  - **7° κεφάλαιο:** Συμπεράσματα - μελλοντική μελέτη
    - Παρουσίαση συμπερασμάτων μετά την προσομοίωση των σεναρίων και αναφορά σε μελλοντική μελέτη που θα μπορούσε να γίνει για την περαιτέρω ανάπτυξη της πτυχιακής εργασίας
- **8° κεφάλαιο:** Βιβλιογραφία

# **Κεφάλαιο 2 : Το πρότυπο IEEE 802.16 (WiMAX)**

## **2.1 Εισαγωγή**

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία εισαγωγή και ανάλυση του πρωτοκόλλου IEEE 802.16 (WiMAX), των λειτουργιών του και της εξέλιξης του με την πάροδο του χρόνου. Επιπλέον, παρουσιάζεται το φυσικό επίπεδο λειτουργίας του πρωτοκόλλου και αναλύονται κάποιες από τις βασικές λειτουργίες του.

## **2.2 Επισκόπηση του Προτύπου IEEE 802.16 (WiMAX) <sup>(1) (2)</sup>**

Η IEEE καθιέρωσε την ομάδα εργασίας για το 802.16 το 1999 ώστε να ετοιμάσει επίσημες προδιαγραφές για την παγκόσμια διάδοση των ασύρματων ευρυζωνικών μητροπολιτικών δικτύων, τα οποία ονομάζονται επισήμως Wireless MAN. Η ομάδα εργασίας 802.16, η οποία είναι ένα κομμάτι της IEEE 802 LAN / MAN επιτροπής προτυποποίησης, είναι υπεύθυνη για τον καθορισμό των προδιαγραφών της οικογένεια προτύπων IEEE 802.16, αλλά χωρίς να δοκιμάζουν τη λειτουργικότητα τους οι ίδιοι. Έτσι, ένας άλλος φορέας δημιουργήθηκε τον Απρίλιο του 2001 ο οποίος ονομάζεται WiMAX Forum. Το ακρώνυμο WiMAX επεκτείνεται στο " Worldwide Interoperability for Microwave Access". Το WiMAX Forum έχει ως αποστολή να προωθήσει και να πιστοποιήσει τη συμβατότητα και τη διαλειτουργικότητα των ασύρματων ευρυζωνικών προϊόντων με βάση την οικογένεια προτύπων IEEE 802.16. .

Το 2003 η IEEE υιοθέτησε το πρότυπο 802.16, γνωστό και σαν WiMAX, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για ασύρματη πρόσβαση με σταθερούς ρυθμούς ευρείας ζώνης. Όπως συμβαίνει με τα πρότυπα της σειράς 802 για ασύρματα

τοπικά δίκτυα LAN, έτσι και το IEEE 802.16 καθορίζει μια οικογένεια προτύπων με επιλογές για συγκεκριμένες ρυθμίσεις.

Το πρότυπο αυτό σχεδιάστηκε για διάδοση δεδομένων τύπου LOS (Line Of Sight) ώστε να λειτουργεί σε μια ευρεία μπάντα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από 10 έως 66 GHz ενώ υποστηρίζει ταχύτητες μετάδοσης έως και 70Mbps. Οι αποστάσεις που μπορεί να καλυφθούν ξεπερνούν τα 50 χιλιόμετρα σε συνθήκες οπτικής επαφής (LOS). Αρχικά λόγω του εύρους ζώνης συχνοτήτων που χρησιμοποιούσε το πρωτόκολλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο όταν υπάρχει οπτική επαφή πομπού και δέκτη (δηλαδή οπτική επαφή του σταθμού βάσης με τους σταθμούς εργασίας). Στη συνέχεια το πρότυπο IEEE 802.16a επέτρεπται τη χρήση της NLOS (Non Line Of Sight) διάδοσης συχνοτήτων όπου χρησιμοποιείται και η μπάντα συχνοτήτων 2 έως 11GHz εκτός από τη χρήση της μπάντας συχνοτήτων από 10 έως 66 GHz. Το WiMAX κυρίως σχεδιάστηκε ώστε να καλύπτει κυρίως point to multipoint συνδέσεις χωρίς ωστόσο να αποκλείεται και η χρήση του για point to point συνδέσεις. Η διαμόρφωση η οποία χρησιμοποιείται ονομάζεται OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Καθώς η πολυπλοκότητα των εφαρμογών που μεταδίδονται μέσω ενός ασύρματου δικτύου ολοένα και αυξάνει, η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) πάνω από τέτοια δίκτυα γίνεται ένας πολύ καθοριστικός παράγοντας για την ποιότητα της επικοινωνίας. Για παράδειγμα, η μετάδοση φωνής σε πραγματικό χρόνο απαιτεί από το δίκτυο συνθήκες πολύ χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης. Για αυτό το λόγο, προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για ποιότητα υπηρεσιών ορίστηκε το πρότυπο IEEE 802.16d.

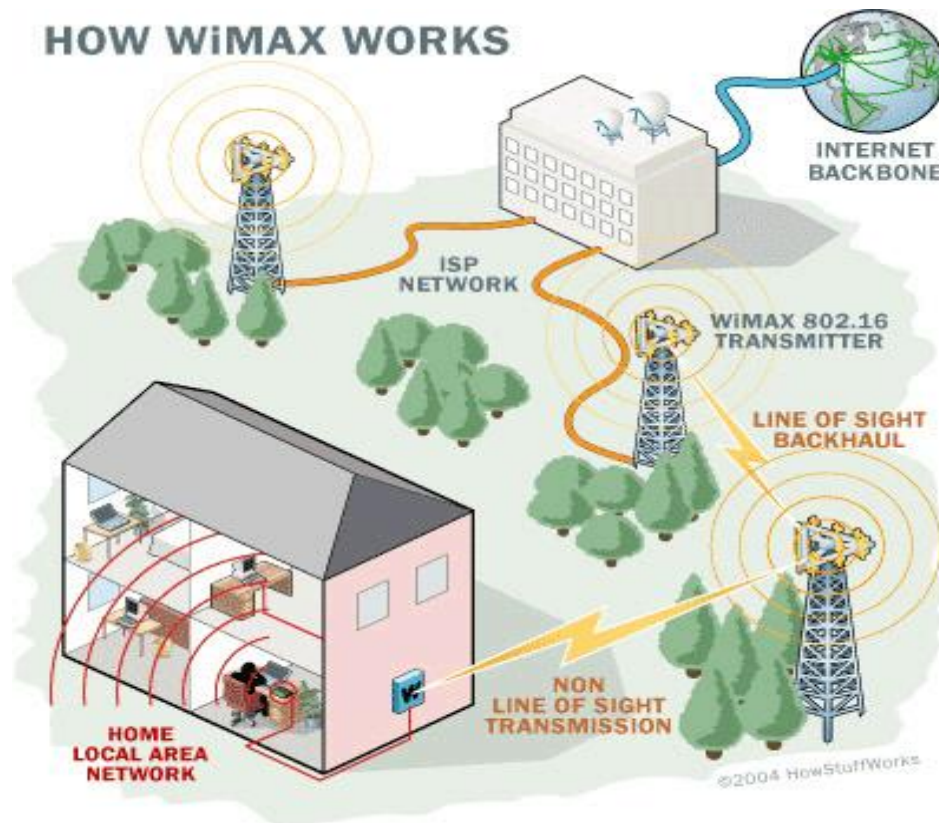
Η ένωση των προτύπων IEEE 802.16 a, c και d όρισε το πρότυπο IEEE 802.16-2004 το οποίο περιγράφει τη συνολική λειτουργικότητα των επιμέρους προτύπων που προαναφέρθηκαν για συχνότητες λειτουργίας από 2 έως 66 GHz. Το πρότυπο IEEE 802.16-2004 ορίζει την επικοινωνία χρηστών οι οποίοι βρίσκονται μέσα σε ένα κελί το οποίο καλύπτεται από ένα σταθμό βάσης. Όταν κάποιος χρήστης κινηθεί σε περιοχή που βρίσκεται εκτός περιοχής κάλυψης του σταθμού βάσης η σύνδεση χάνεται.



Το πρότυπο IEEE 802.16 εισάγει και περιγράφει την έννοια της κινητικότητας των χρηστών από ένα σταθμό βάσης σε ένα άλλο. Στο πρότυπο αυτό ορίζεται ότι ένας κινητός σταθμός εργασίας μπορεί να συνεχίσει να εξυπηρετείται από το δίκτυο ακόμα και αν κινείται με ταχύτητες οι οποίες προσεγγίζουν τα 120 Km/h. Ωστόσο η παραπάνω τιμή είναι καθαρά ενδεικτική, καθώς μέχρι τη στιγμή αυτή δεν υπάρχει κάποιο διαθέσιμο προϊόν στην αγορά συμβατό με το IEEE 802.16e (IEEE 802.16-2005) πρότυπο που να πιστοποιεί την συγκεκριμένη τιμή.

## **2.3 Εγκατάσταση και λειτουργία δικτύου WiMAX**

Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται ένα δίκτυο WiMAX είναι αρκετά απλός. Αρχικά, περιλαμβάνει την εγκατάσταση των σταθμών βάσης, δηλαδή τις λεγόμενες κεραιές, οι οποίες αναλαμβάνουν τη διανομή του σήματος σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή. Στη συνέχεια ο χρήστης του δικτύου εγκαθιστά στο χώρο του τον απαραίτητο εξοπλισμό, ο οποίος μπορεί να είναι είτε ένας απλός υπολογιστής με υποστήριξη WiMAX, είτε ένα WiMAX router (δρομολογητής) αν η σύνδεση πρόκειται να μοιραστεί σε περισσότερους από έναν υπολογιστές στον ίδιο χώρο ή η συσκευή που χρησιμοποιεί δεν υποστηρίζει το πρωτόκολλο WiMAX. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μία μορφή δικτύωσης WiMAX καθώς και το δίκτυο κορμού.



Εικόνα 1: Λειτουργία του πρωτοκόλλου WiMAX (31)

Ο χρόνος που θα χρειάζεται ένας σταθμός εργασίας για να συνδεθεί για πρώτη φορά σε ένα δίκτυο WiMAX εκτιμάται πως δεν θα ξεπερνά τα 2 λεπτά, δεδομένου ότι τα βήματα της σύνδεσης είναι πολύ απλά και συνοψίζονται ως εξής:

- Ο χρήστης ενεργοποιεί την ασύρματη σύνδεση WiMAX στον ηλεκτρονικό υπολογιστή του ή οποιαδήποτε άλλη δικτυακή συσκευή WiMAX διαθέτει.
- Το διαθέσιμο δίκτυο εντοπίζεται και αναφέρεται ως εντός εμβέλειας.
- Ο χρήστης πληκτρολογεί ένα κλειδί εισόδου για λόγους ασφάλειας, το οποίο του έχει γνωστοποιηθεί από πριν. Ενώ μπορεί να γίνει και αυθεντικοποίηση του σταθμού εργασίας ώστε να πιστοποιηθεί η ταυτότητα του και το αν έχει δικαίωμα πρόσβασης στο δίκτυο.
- Η σύνδεση ολοκληρώνεται με επιτυχία και ο χρήστης είναι έτοιμος να χρησιμοποιήσει το δίκτυο WiMAX και της υπηρεσίες που παρέχονται από αυτό.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διαδικασία θα ακολουθηθεί μόνο την πρώτη φορά που θα συνδεθεί ο σταθμός εργασίας στο δίκτυο WiMAX. Από τη στιγμή που οι απαραίτητες ρυθμίσεις (όνομα δικτύου, κλειδί πρόσβασης) αποθηκευτούν στη συσκευή του χρήστη, τις επόμενες φορές η σύνδεση θα πραγματοποιείται σε κλάσματα του δευτερολέπτου.

## 2.4 WiMAX PHY (Φυσικό επίπεδο) (1) (5)

Ένα 10-66GHz κύμα συχνότητας είναι μία ακτίνα, η οποία θεωρητικά μπορεί να διανύσει πολλά χιλιόμετρα μέσω της διάδοσης σήματος LOS. Οι σχεδιαστές θεώρησαν ότι η διαμόρφωση μονής μεταφοράς φέροντος ήταν μια επαρκής επιλογή για το φυσικό επίπεδο του προτύπου IEEE 802.16, η οποία ονομάζεται WirelessMAN-SC (Single Carrier) μεταφορά. Το WirelessMAN-SC μπορεί να υποστηρίξει τη μέθοδο διαμόρφωσης FDD (Frequency Division Duplex) και τη μέθοδο TDD (Time Division Duplex). Ωστόσο, η λειτουργία στη μπάντα συχνοτήτων 2-11GHz απαιτεί αλλαγές στις προδιαγραφές του φυσικού επιπέδου για τη υποστήριξη NLOS μετάδοσης. Κυρίως τρεις νέες προδιαγραφές εισήχθησαν στο φυσικό επίπεδο για την κάλυψη των απαιτήσεων, οι οποίες είναι:

- Μονού φέροντος φυσικό επίπεδο (Single-Carrier PHY)
- 256-point FFT OFDM PHY
- 2048-point FFT OFDMA PHY

Το φυσικό επίπεδο μονού φέροντος, που ορίζεται ως WirelessMAN-SCa, βασίζεται στο WirelessMAN-SC. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες διαφορές, όπως η διαμόρφωση στοιχείων που επιτρέπουν την βελτίωση της εξισορρόπησης, καθώς και την εκτίμηση των επιδόσεων του καναλιού πάνω από μεταδόσεις NLOS, επεκτάσιμα κανάλια εξάπλωσης καθυστέρησης, τις ρυθμίσεις παραμέτρων, και MAC / PHY μηνύματα που θα διευκολύνουν την υλοποίηση προαιρετικών προσαρμοστικών συστημάτων κεραιών (Adaptive Antenna Systems - AAS).

Η δεύτερη και τρίτη προδιαγραφή του φυσικού επιπέδου χρησιμοποιούν OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) διαμόρφωση η οποία είναι μια πολυκαναλική τεχνική μετάδοσης, κατάλληλη για υψηλής ταχύτητας NLOS μετάδοση. Η διαμόρφωση OFDM χρησιμοποιεί 256 RF sub-carriers για τη μετάδοση πολλών διαφορετικών σημάτων ταυτόχρονα. Τα γειτονικά sub-carriers επιτρέπεται να επικαλύπτονται, αλλά πρέπει να είναι ορθογώνια μεταξύ τους ώστε να αποτρέπονται η παρεμβολές μεταξύ τους (inter-carrier interference (ICI)). Η βασική διαφορά μεταξύ WirelessMAN-SCx και OFDM είναι ότι η διαμόρφωση OFDM είναι πιο ανθεκτική στο multipath effect. Η διαμόρφωση OFDM έχει υψηλότερη αποδοτικότητα εύρους ζώνης δεδομένου ότι επιτρέπει σε γειτονικά sub-carriers να επικαλύπτονται. Έτσι, η διαμόρφωση OFDM διαμορφώνει το σήμα ώστε να επιτρέπει ταχύτητα μετάδοσης 72 Mbps, σε εύρος ζώνης καναλιού των 20 MHz, η οποία παρέχει μια φασματική απόδοση του 3,6 bps / Hz.

Η διαμόρφωση OFDMA είναι ένα 2048 sub-carrier OFDM σχήμα. Η διαφορά μεταξύ της διαμόρφωσης OFDM και OFDMA είναι ότι η δεύτερη οργανώνει τους πόρους για το χρόνο (π.χ. τα σύμβολα) και τη συχνότητα (π.χ. τα sub-carriers) σε υποκανάλια, για κατανομή στους δέκτες, η οποία επιτρέπει πολλαπλή πρόσβαση. Έτσι, η OFDMA λειτουργεί πάνω από δύο διαστάσεις, το χρόνο και τη συχνότητα. Υπάρχουν δύο τύποι μεταθέσεων sub-carrier για subchannelization πολυμορφία και συνέχεια.

Η ποικιλία μεταθέσεων δημιουργεί sub-carriers ψευδοτυχαία για την δημιουργία ενός υποκαναλιού. Οι συνεχόμενες μεταθέσεις ομαδοποιούν ένα μπλοκ από συνεχόμενα sub-carriers για τη δημιουργία ενός υποκαναλιού. Το OFDM PHY είναι ίδιο μεταξύ του IEEE 802.16 και του ETSI HiperMAN γιατί, για παράδειγμα, η διαμόρφωση OFDM απαιτεί ασθενέστερη συχνότητα συγχρονισμού και πιο γρήγορο FFT (Fast Fourier Transform) υπολογισμό. Κατά συνέπεια, το WiMAX Forum επικεντρώνεται σε 256-carrier OFDM PHY σε όλα τα προφίλ του.

Κάποιος μπορεί να αναρωτηθεί γιατί δεν γίνεται χρήση CDMA (Code division multiple access) ως μορφή σηματοδότησης. Αλλά αυτή η τεχνική χρειάζεται bandwidth κατά πολύ μεγαλύτερο από το throughput που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα δίκτυο ώστε να διατηρήσει ένα όφελος κατά την επεξεργασία ικανό να υπερισχύσει των παρεμβολών. Εξάλλου οι τεχνικές OFDM και OFDMA

υποστηρίζουν μετάδοση NLOS επιτυγχάνοντας μέγιστη χρήση του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων.

# **Κεφάλαιο 3: Επίπεδο ελέγχου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control - MAC) του πρωτοκόλλου IEEE 802.16** (1) (2) (3)

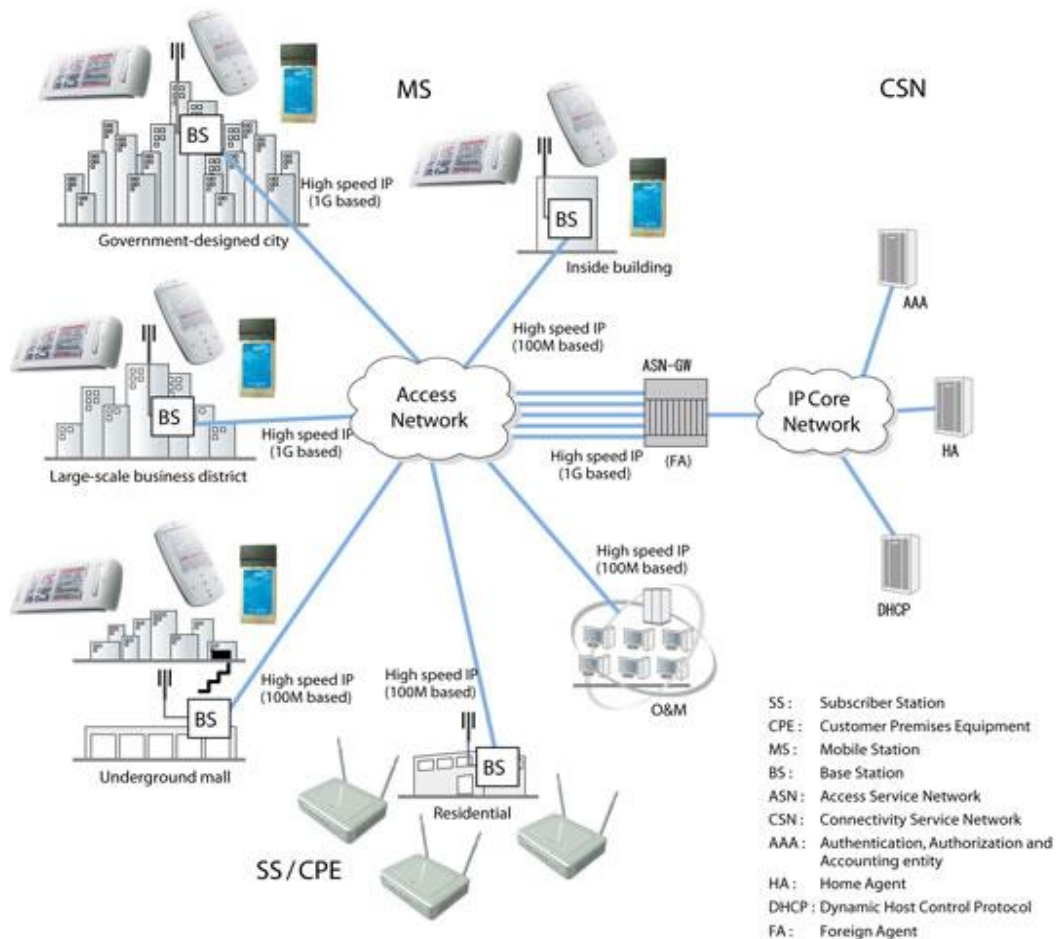
## **3.1 Εισαγωγή**

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η δομή του επιπέδου πρόσβασης στο μέσο (Medium Access Control (MAC)) για το πρωτόκολλο IEEE 802.16 και γίνεται μία ανάλυση όσο αναφορά στα υποεπίπεδα που το αποτελούν. Επίσης, αναλύεται η δομή του frame που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο καθώς και ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται οι νέοι σταθμοί στο δίκτυο.

## **3.2 Ανάλυση του επιπέδου πρόσβασης στο μέσο**

Το IEEE 802.16 MAC χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο για τον οποίο ο σταθμός "συναγωνίζεται" μία μόνο φορά (με την αρχική σύνδεση του στο δίκτυο). Από εκεί και έπειτα έχει καθοριστεί ο τρόπος σύνδεσης του από το σταθμό Βάσης. Ο χρόνος σύνδεσης με τον καιρό μπορεί να ποικίλει, είτε να μεγαλώνει είτε να μικραίνει, ωστόσο η σύνδεση θα πραγματοποιείται. Ο αλγόριθμος του πρωτοκόλλου IEEE 802.16 είναι αρκετά σταθερός ακόμα και όταν το δίκτυο είναι υπερφορτωμένο και ο αριθμός των συνδεδεμένων συνδρομητών είναι πολύ μεγάλος. επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη μίας ευρυζωνικής σύνδεσης και μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να είναι και πιο αποτελεσματικός από μία καλωδιακή σύνδεση. Ο αλγόριθμος επίσης επιτρέπει στον σταθμό βάσης να ελέγχει την ποιότητα της υπηρεσίας κατανέμοντας το χρόνο που χρειάζεται να διαθέσει για τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο.

Το επίπεδο MAC του WiMAX σχεδιάστηκε κυρίως για την επικοινωνία point-to-multipoint δηλαδή για επικοινωνία από ένα σημείο σε πολλά σημεία ή καλύτερα ενός σταθμού βάσης με πολλούς σταθμούς εργασίας.



Εικόνα 2: Δίκτυο WiMAX (32)

Όπως φαίνεται και στη παραπάνω εικόνα, ένας σταθμός βάσης WIMAX λειτουργεί με μία κεραία η οποία χωρίζεται σε πολλούς τομείς ώστε να μπορεί να διασυνδέει πολλά σημεία πρόσβασης ταυτόχρονα. Μέσα σε κάθε τομέα όλοι οι σταθμοί εργασίας λαμβάνουν την εκπομπή ενός πακέτου από το σταθμό βάσης αλλά το αποδέχονται μόνο όταν προορίζεται γι' αυτούς.

Το επίπεδο MAC έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να προσφέρει πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης για το downlink όσο και για το uplink. Κάθε κανάλι επικοινωνίας μπορεί να υποστηρίξει την ύπαρξη εκατοντάδων σταθμών εργασίας. Μέσω της

υποστήριξης του πρωτοκόλλου IP οι υπηρεσίες που παρέχονται σε αυτούς τους χρήστες ποικίλουν όπως πρόσβαση στο διαδίκτυο, FTP, email, VoIP και υπηρεσίες βίντεο. Επίσης, παρέχει ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών ανάλογο με το κλασικό ασύγχρονο τρόπο μεταφοράς (ATM) των διάφορων υπηρεσιών, καθώς και νεότερες τεχνικές, όπως η τεχνική GFR (Guaranteed Frame Rate).

Αναλυτικά το MAC υποστηρίζει:

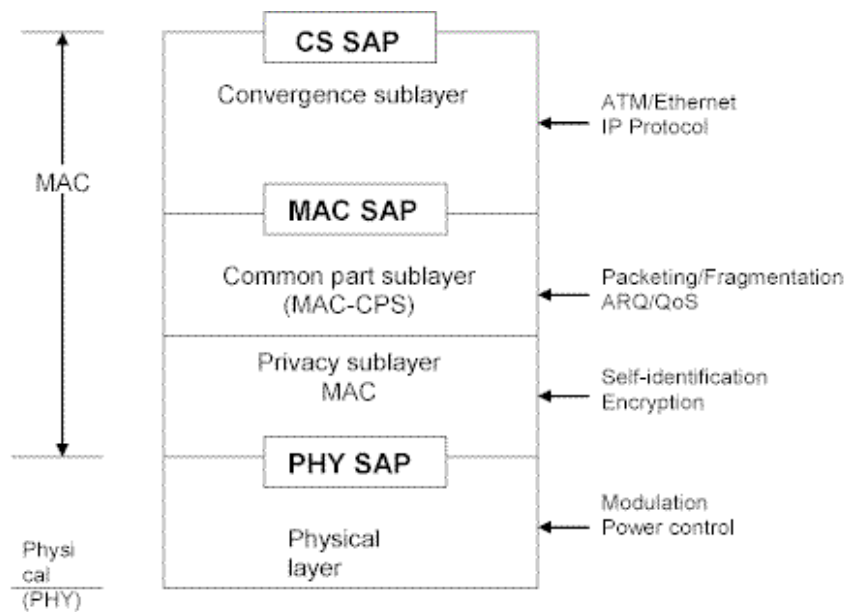
- TDD και FDD διαμόρφωση στο φυσικό επίπεδο
- Προσφέρει πρόσβαση στο δίκτυο
- Διεύθυνση του ασύρματου περιβάλλοντος
  - π.χ. πολύ αποδοτική χρήση του ραδιοφάσματος
- Ευρυζωνικές υπηρεσίες
  - Πολύ υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης στο downlink και στο uplink
  - Ethernet, IPv4, IPv6, ATM etc.
  - Ένα εύρος απαιτήσεων ποιότητας υπηρεσιών (QoS)
- Δυνατότητα του διαμοιρασμού ενός τερματικού σταθμού
  - Ο σταθμός βάσης μπορεί να είναι υπερφορτωμένος
- Ασφάλεια
- Μηχανισμό ανεξαρτησίας από τη χρήση διαφορετικών πρωτοκόλλων
  - ATM, IP, Ethernet etc.



### 3.3 Δομή του επιπέδου πρόσβασης στο μέσο

Το επίπεδο MAC πρέπει να είναι αρκετά ευέλικτο ώστε να μπορεί να υποστηρίξει διάφορους τύπους υπηρεσιών, γι' αυτό το λόγο το επίπεδο MAC του IEEE 802.16 είναι χωρισμένο σε διάφορα υποεπίπεδα ώστε να μπορεί να μεταφέρει κάθε είδους κίνηση αποτελεσματικά. Μέσα από χαρακτηριστικά όπως payload header suppression, packing, και fragmentation τα υποεπίπεδα του MAC λειτουργούν μαζί ώστε να μεταφέρουν τα δεδομένα με τρόπο ποιο αποτελεσματικό ακόμα και από το πραγματικό μηχανισμό μεταφοράς. Επίσης θέματα που αφορούν την αποτελεσματικότητα της μετάδοσης επιλύονται μέσω της διεπαφής του επιπέδου MAC με το φυσικό επίπεδο. Για παράδειγμα, σχήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που αναφέρονται στο ένα προφίλ μετάδοσης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται για κάθε σταθμό εργασίας (Subscriber Station - SS) για κάθε μετάδοση. Το MAC μπορεί να κάνει χρήση του εύρους ζώνης αποτελεσματικά για κάθε προφίλ μετάδοσης κάτω από ευνοϊκές συνθήκες διαθεσιμότητας ενός καναλιού μετάδοσης, αλλά μπορεί να στραφεί σε πιο αξιόπιστες, αν και λιγότερο αποδοτικές εναλλακτικές λύσεις όπως απαιτείται για την υποστήριξη της απαιτούμενης 99,999% διαθεσιμότητα του καναλιού. Μαζί με το θεμελιώδες καθήκον της κατανομής του εύρους ζώνης και τη μεταφορά δεδομένων, το MAC περιλαμβάνει ένα υποεπίπεδο ασφάλειας το οποίο προσφέρει αυθεντικοποίηση των σταθμών και κρυπτογράφηση των δεδομένων ώστε τα δεδομένα να μεταδίδονται με ασφάλεια στο προορισμό τους ώστε να μην κλαπούν από τρίτους. Το επίπεδο MAC επίσης ενσωματώνει ένα μηχανισμό αίτησης επαναμετάδοσης (ARQ) και υποστήριξη δικτύων βρόχου (mesh network) αντίθετα από την υποστήριξη μόνο δικτύων point to multipoint. Το επίπεδο πρόσβασης στο μέσο χωρίζεται σε τρία υποεπίπεδα:

- Υποεπίπεδο σύγκλισης CS (Convergence sublayer)
- Common part sublayer (CPS)
- Υποεπίπεδο ασφάλειας (Privacy sublayer)



Εικόνα 3: Δομή επιπέδου πρόσβασης στο μέσο (2)

### 3.3.1 Υποεπίπεδο σύγκλισης CS (Convergence sublayer )

Το πρότυπο IEEE 802.16 καθορίζει γενικά δύο συγκεκριμένα υποεπίπεδα σύγκλισης για τον έλεγχο των συνδέσεων προς και από το επίπεδο MAC του πρωτοκόλλου. Το υποεπίπεδο σύγκλισης ATM το οποίο ορίζεται για τις υπηρεσίες ATM, καθώς και το υποεπίπεδο σύγκλισης πακέτων το οποίο ορίζεται για υπηρεσίες ελέγχου της μετάδοσης πακέτων, και υποστηρίζει πρωτόκολλα όπως τα το IPv4, IPv6, Ethernet, και εικονικής περιοχής δικτύου (VLAN).

Ο πρωταρχικός σκοπός του υποεπιπέδου σύγκλισης είναι η αντιστοίχιση μονάδων δεδομένων (service data units (SDUs)) με τη σωστή διασύνδεση MAC, διαφύλαξη ή ενεργοποίηση της χρήση QoS, και τέλος είναι υπεύθυνο για την κατανομή του εύρους ζώνης. Οι μονάδες δεδομένων (SDUs) είναι οι μονάδες δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ δύο γειτονικών επιπέδων ενός

πρωτοκόλλου για παράδειγμα του επιπέδου MAC με το φυσικό επίπεδο του πρωτοκόλλου IEEE 802.16. Δηλαδή είναι οι μονάδες δεδομένων που λαμβάνονται προς τα κάτω από το προηγούμενο υψηλότερο επίπεδο και οι μονάδες δεδομένων που αποστέλλονται με ανοδική κατεύθυνση στο αμέσως ανώτερο επίπεδο του μοντέλου αναφοράς του OSI. Ο έλεγχος παίρνει διάφορες μορφές, ανάλογα με το είδος της υπηρεσίας που χρησιμοποιείται. Εκτός από αυτές τις βασικές λειτουργίες, τα υποεπίπεδα σύγκλισης εκτελούν και προηγμένες λειτουργίες, όπως συμπίεση και ανασυγκρότηση κεφαλίδας των πακέτων που μεταδίδονται με σκοπό την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της ασύρματης σύνδεσης.

### 3.3.2 Common Part Sublayer (CPS)

Γενικά το επίπεδο MAC του IEEE 802.16 έχει σχεδιαστεί για την χρήση της αρχιτεκτονικής point-to-multipoint με ένα σταθμό βάσης (BS) ο οποίος μπορεί να διαχειρίζεται-συνδέεται με πολλά ανεξάρτητα δίκτυα WiMAX ταυτόχρονα. Στο downlink χρησιμοποιείται η διαμόρφωση TDM για τα δεδομένα που μεταδίδονται προς τους σταθμούς εργασίας του δικτύου. Ενώ στο uplink τα δεδομένα μεταδίδονται με τη χρήση της διαμόρφωσης TDMA. Το επίπεδο MAC του IEEE 802.16 είναι προσανατολισμένο στη σύνδεση (connection oriented). Όλες οι υπηρεσίες συμπεριλαμβανομένων των εγγενών χωρίς σύνδεση υπηρεσιών αντιστοιχίζονται σε μια σύνδεση. Αυτό παρέχει ένα μηχανισμό για την υποβολή αιτημάτων εκχώρησης εύρους ζώνης, συνδυάζοντας QoS και παραμέτρους κίνησης, μεταφορά και δρομολόγηση των δεδομένων στο κατάλληλο υποεπίπεδο σύγκλισης, καθώς και όλες τις άλλες ενέργειες που συνδέονται με τους κανόνες της υπηρεσίας αυτής. Οι συνδέσεις έχουν αναφορά με τη χρήση ενός 16-bit αναγνωριστικού σύνδεσης και μπορούν να απαιτούν συνεχή διαθεσιμότητα του εύρους ζώνης ή το εύρος ζώνης σε πρώτη ζήτηση. Σε κάθε σταθμό εργασίας αντιστοιχεί μία 48-bit MAC διεύθυνση που χρησιμεύει ως κυρία μέθοδο αναγνώρισης, διότι οι κύριες διευθύνσεις που χρησιμοποιούνται κατά τη

λειτουργία είναι τα 16-bit αναγνωριστικά σύνδεσης (CID). Μετά την επιτυχή σύνδεση ενός σταθμού εργασίας στο δίκτυο, ο σταθμός βάσης αποδίδει τρεις συνδέσεις διαχείρισης για κάθε κατεύθυνση στο σταθμό, οι οποίες αντανακλούν τις τρεις διαφορετικές απαιτήσεις QoS που χρησιμοποιούνται από τα διάφορα επίπεδα διαχείρισης. Το πρώτο από αυτά είναι η βασική σύνδεση, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των μικρών, εντός συγκεκριμένου χρόνου διευθύνσεων MAC και των RLC (Radio Link Control) μηνυμάτων. Η κύρια σύνδεση διαχείρισης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μεγαλύτερων, πιο ανεκτικών σε καθυστέρηση μηνυμάτων, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται για την αυθεντικοποίηση ενός χρήστη και των διάφορων ρυθμίσεων της σύνδεσης. Η δευτερεύουσα σύνδεση διαχείρισης χρησιμοποιείται για τη μεταφορά μηνυμάτων διαχείρισης όπως μηνύματα DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol), TFTP (Trivial File Transfer Protocol) και μηνυμάτων SNMP (Simple Network Management Protocol). Επίσης το MAC δεσμεύει συνδέσεις για την εξυπηρέτηση διαφορετικών σκοπών εκτός των καθορισμένων που προαναφέρθηκαν. Μια σύνδεση είναι δεσμευμένη για την αρχική πρόσβαση στο δίκτυο, μία είναι για την μετάδοση μηνυμάτων broadcast στο downlink καθώς και για της ανάγκες σηματοδότησης των μεταδόσεων broadcast των σταθμών εργασίας. Τέλος πρόσθετες συνδέσεις δεσμεύονται για τη μετάδοση μηνυμάτων multicast εκτός από broadcast.

### **3.3.3 Υποεπίπεδο Ασφάλειας (Privacy sublayer )**

Το υποεπίπεδο ασφάλειας ενσωματώνει στο πρωτόκολλο IEEE 802.16 μεθόδους κρυπτογράφησης των δεδομένων και αυθεντικοποίησης των σταθμών ώστε να παρέχεται η μέγιστη δυνατή ασφάλεια των δεδομένων που μεταδίδονται σε ένα ασύρματο δίκτυο όπως είναι το δίκτυο WiMAX.

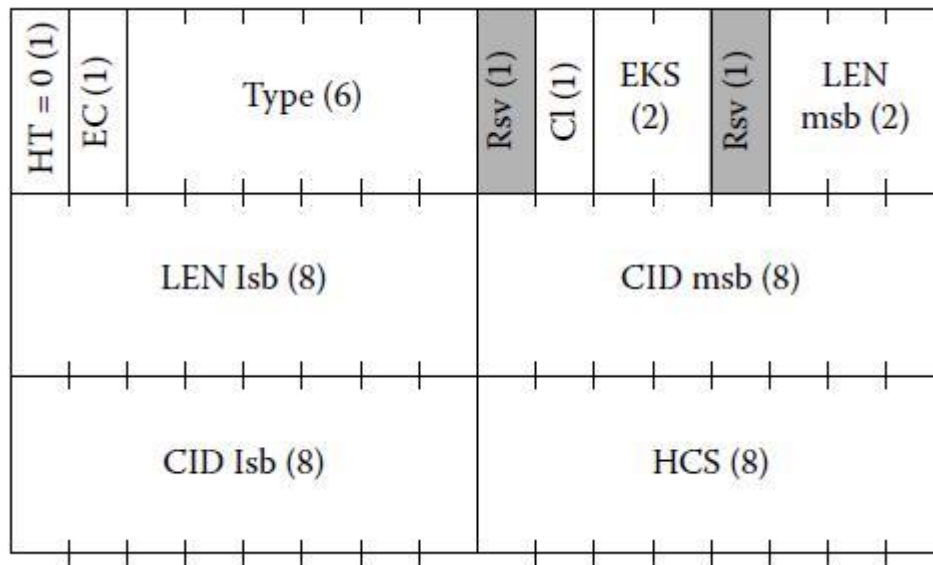
Το υποεπίπεδο αυτό χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο ενθυλάκωσης για την κρυπτογράφηση δεδομένων που μεταδίδονται στο δίκτυο και ένα πρωτόκολλο διαχείρισης κλειδιών PKM (Privacy Key Management) το οποίο είναι υπεύθυνο

για την αυθεντικοποίηση των σταθμών σε ένα δίκτυο WiMAX. Το πρωτόκολλο αυτό προσφέρει ένα σύνολο μεθόδων κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης το οποίο καθορίζει για το πρότυπο IEEE 802.16 τριών ειδών συσχετισμούς ασφάλειας. Ο αρχικός συσχετισμός ασφάλειας όπου χρησιμοποιείται για την συσχέτιση ενός σταθμού εργασίας με το δίκτυο. Ο στατικός συσχετισμός ο οποίος παρέχεται από το σταθμό βάσης του δικτύου και τέλος ο δυναμικός συσχετισμός όπου χρησιμοποιείται ανάλογα όταν δηλαδή δημιουργούνται ή τερματίζονται ροές δεδομένων στο δίκτυο.

### 3.3.4 MAC PDU

Το MAC PDU καθορίζει τη μορφή ενός πακέτου το οποίο πρόκειται να μεταδοθεί μέσω ενός δικτύου το οποίο χρησιμοποιεί το πρότυπο IEEE 802.16. Αποτελείται από μία σταθερού μήκους κεφαλίδα, ένα ωφέλιμο φορτίο μεταβλητού μήκους, και από ένα προαιρετικό έλεγχο κυκλικού πλεονασμού (CRC).

Για το πρότυπο IEEE 802.16 ορίζονται δύο μορφές κεφαλίδας: Η γενική κεφαλίδα και η κεφαλίδα αίτησης εύρους ζώνης (bandwidth). Εκτός από τα PDUs εύρους ζώνης, τα οποία δεν περιέχουν ωφέλιμο φορτίο (δεδομένα), υπάρχουν και τα PDUs τα οποία περιέχουν είτε μηνύματα διαχείρισης MAC ή δεδομένα τα οποία αφορούν το υποεπίπεδο σύγκλισης του MAC. Οι μορφή του MAC PDU του πρωτοκόλλου WiMAX παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4: MAC PDU (1)

Επίσης υπάρχουν τριών ειδών υποκεφαλίδες:

- Grant management subheader
  - Η οποία χρησιμοποιείτε από ένα σταθμό εργασίας για τη μεταφορά της ανάγκης για bandwidth στο σταθμό βάσης
- Υποκεφαλίδα κατακερματισμού (Fragmentation subheader)
  - Η οποία υποδηλώνει αν υπάρχει κατακερματισμός ενός πακέτου δεδομένων δηλαδή αν ένα πακέτο έχει διασπαστεί σε περισσότερα και μικρότερα πακέτα ώστε να μεταδοθεί
- Packing subheader
  - Αφορά την συνένωση πολλών πακέτων δεδομένων σε ένα PDU. Οι υποκεφαλίδες grand management και κατακερματισμού μπορεί να συμπεριληφθούν αμέσως εάν υποδεικνύεται από το τύπο του πεδίου. Η υποκεφαλίδα πακεταρίσματος μπορεί επίσης να συμπεριληφθεί σε κάθε SDU ένα υποδεικνύεται από το τύπο του πεδίου.

Το WiMAX εκμεταλλεύεται την ενσωμάτωση των διαδικασιών πακεταρίσματος (packing) και κατακερματισμού (Fragmentation) με τη διαδικασία κατανομής εύρους ζώνης (bandwidth) για τη μεγιστοποίηση της ευελιξίας, της

αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας αυτών των δύο. Ο κατακερματισμός είναι η διαδικασία κατά την οποία ένα MAC SDU χωρίζεται σε ένα ή περισσότερα MAC SDUs. Πακετάρισμα είναι η διαδικασία κατά την οποία τα πολλαπλά MAC SDUs συσκευάζονται σε ένα ενιαίο MAC PDU. Είτε ένας σταθμός βάσης (BS) για μια σύνδεση DL ή ένας σταθμός εργασίας για μια σύνδεση UL μπορεί να κινήσει τις δύο διεργασίες. Το WiMAX επιτρέπει την ταυτόχρονη χρήση του κατακερματισμού και του πακεταρίσματος για την αποτελεσματικότερη χρήση του εύρους ζώνης του δικτύου.

### **3.3.4.1 Δημιουργία PDU και χρήση ARQ (Automatic Repeat Request)**

ARQ είναι ένα μπλοκ από διακριτές μονάδες δεδομένων που μεταφέρονται μέσω μίας σύνδεσης η οποία χρησιμοποιεί ARQs. Μια διεργασία ARQ είναι υπεύθυνη για την αναμετάδοση μπλοκ από MAC SDUs (γνωστά και ως ARQ μπλοκ) τα οποία έχουν χαθεί (δηλαδή δεν έχουν φτάσει ποτέ στο προορισμό τους) ή έχουν αλλοιωθεί (δηλαδή υπάρχουν σφάλματα κατά τη μετάδοσή τους τα οποία δεν μπορούν να διορθωθούν από το παραλήπτη οπότε απαιτείται η επαναμετάδοση αυτών των πακέτων δεδομένων). Το επίπεδο MAC του WiMAX χρησιμοποιεί ένα απλό παράθυρο συμφόρησης όπου ο αποστολέας μπορεί να στείλει ένα ορισμένο αριθμό πακέτων πριν λάβει επιβεβαίωση από τον παραλήπτη (acknowledgment). Ο παραλήπτης στέλνει ένα θετικό acknowledgment για τα μπλοκ πακέτων τα οποία μεταδόθηκαν σωστά ή αρνητικό acknowledgment για τα μπλοκ πακέτων τα οποία δεν μεταδόθηκαν σωστά. Ο αποστολέας ξαναστέλνει τα πακέτα τα οποία δεν επιβεβαιώθηκαν ή ο παραλήπτης ζήτησε ξανά και στη συνέχεια εφόσον ένα μπλοκ επιβεβαιωθεί ότι έφτασε σωστά στο παραλήπτη "σέρνει" το παράθυρο συμφόρησης στο επόμενο μπλοκ πακέτων.

Κάθε σύνδεση από ένα σταθμό εργασίας με ένα σταθμό βάσης εκχωρείται σε μία κατηγορία υπηρεσιών (service class), ως μέρος της δημιουργίας της σύνδεσης.

Όλα τα πακέτα κατηγοριοποιούνται στο υποεπίπεδο σύγκλισης και με αυτό τον τρόπο μεταδίδονται μέσω της κατάλληλης σύνδεσης ανάλογα με το τι απαιτήσεις υπάρχουν από την εφαρμογή.

### **3.3.5 Υποεπίπεδο σύγκλισης μετάδοσης (Transmission Convergence (TC) Layer)**

Μεταξύ του φυσικού επιπέδου (PHY) και του MAC επιπέδου του WiMAX υπάρχει ένα άλλο υποεπίπεδο το υποεπίπεδο σύγκλισης μετάδοσης το οποίο μετατρέπει τα μεταβλητού μήκους MAC PDUs σε σταθερού μήκους (fixed-length (FEC)) μπλοκ δεδομένων. Το υποεπίπεδο σύγκλισης μετάδοσης χρησιμοποιεί ένα PDU το οποίο μπορεί να χωρέσει σταθερού μήκους μπλοκ δεδομένων το οποίο γεμίζει. Αρχίζει με ένα δείκτη ο οποίος δείχνει που αρχίζει η κεφαλίδα του επόμενου MAC PDU μέσα στο μπλοκ σταθερού μήκους. Τέλος το υποεπίπεδο σύγκλισης μετάδοσης επιτρέπει επανασυγχρονισμό στο επόμενο MAC PDU στην περίπτωση που το προηγούμενο μπλοκ FEC είχε ανακτήσιμα λάθη.



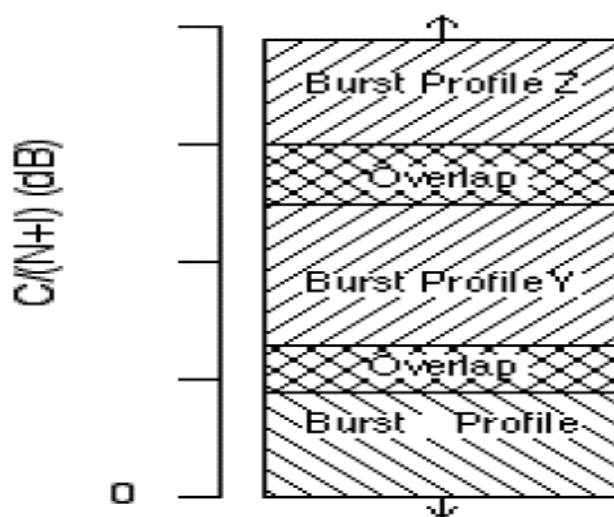
## 3.4 Έλεγχος Ραδιοζεύξης (Radio Link Control - RLC))

Η εξελιγμένη τεχνολογία του φυσικού επιπέδου (PHY) του WiMAX απαιτεί ένα ανάλογο εξελιγμένο σύστημα ελέγχου της ραδιοζεύξης (Radio Link Control (RLC)). Ειδικότερα η δυνατότητα του φυσικού επιπέδου να μεταβαίνει ανά πασα στιγμή από ένα burst profile σε ένα άλλο, πρέπει να υποστηρίζεται απόλυτα από το RLC. Έτσι το RLC εκτός από τις παραδοσιακές λειτουργίες ελέγχου της ισχύος και του φάσματος του σήματος θα πρέπει να μπορεί να διαχειρίζεται με την ίδια ευελιξία και την παραπάνω δυνατότητα του φυσικού επιπέδου.

Ο έλεγχος της ραδιοζεύξης ξεκινάει αρχικά με την περιοδική εκπομπή από το σταθμό βάσης μηνυμάτων broadcast με πληροφορίες για τα burst profile που έχουν επιλεγεί για το uplink και το downlink. Το κάθε burst profile που χρησιμοποιείται σε κάθε κανάλι έχει επιλεγεί με βάση κάποιους παράγοντες όπως ο βαθμός βροχόπτωσης στη περιοχή και οι δυνατότητες του εξοπλισμού των σταθμών εργασίας που είναι διαθέσιμοι. Το κάθε burst profile για το downlink έχει μια ετικέτα Downlink Interval Usage Code (DIUC), κατά αντιστοιχία τα burst profiles για το uplink φέρουν μια ετικέτα Uplink Interval Usage Code (UIUC). Κατά την είσοδο ενός νέου σταθμού εργασίας στο δίκτυο, ο σταθμός αυτός εκτελεί προσωρινή εξισορρόπηση ισχύος και φάσματος για να στείλει μηνύματα αίτησης φάσματος (Ranging Request (RNG-REQ)) στον σταθμό βάσης που τον εξυπηρετεί. Οι απαντήσεις από τον σταθμό βάσης γίνονται με αντίστοιχα μηνύματα φάσματος (Ranging Response (RNG-RSP)) τα οποία παρέχουν πληροφορίες στον σταθμό εργασίας για τις αλλαγές που πρέπει να πραγματοποιήσει στον χρονοισμό του και στην στάθμη της ισχύς που εκπέμπει.

Για τις συνεχιζόμενες αλλαγές στην ισχύ ή στο φάσμα του σήματος ο σταθμός βάσης πληροφορεί, όποτε το κρίνει σκόπιμο, τον σταθμό εργασίας με ανάλογα μηνύματα (RNG-RSP) για τις κατάλληλες αλλαγές στις οποίες πρέπει να προβεί στην ισχύ εκπομπής του και τον χρονοισμό του ρολογιού του. Κατά την αποστολή των αρχικών μηνυμάτων αίτησης εύρους ζώνης ο σταθμός εργασίας μπορεί να ζητήσει επιπλέον να εξυπηρετηθεί στο downlink μέσω συγκεκριμένου burst

profile, εκπέμποντας την προτίμηση του σε DIUC στο σταθμό βάσης. Η επιλογή αυτή δεν είναι τυχαία αλλά απορρέει από μετρήσεις της ποιότητας του σήματος που λαμβάνετε στο downlink. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται από τον σταθμό εργασίας πριν και κατά τη διάρκεια αποστολής των αρχικών αιτήσεων για εύρος ζώνης. Ο σταθμός βάσης στην απάντηση του δεν είναι απαραίτητο να συμφωνήσει, μπορεί να δεχθεί ή να απορρίψει την επιλογή του σταθμού εργασίας και να υποδείξει άλλο burst profile. Ο σταθμός βάσης με παρόμοιο τρόπο αντιλαμβάνεται την ποιότητα του σήματος που δέχεται από τους σταθμούς εργασίας στο uplink. Έτσι δίνει εντολή στον σταθμό εργασίας να χρησιμοποιήσει κάποιο συγκεκριμένο uplink burst profile UIUC στα μηνύματα UL-MAP που στέλνει στον σταθμό εργασίας.



Εικόνα 5: Κατανομή προφίλ εκπομπής WiMAX (2)

Στην παραπάνω εικόνα (εικόνα 5) φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται τα προφίλ εκπομπής ανάλογα με το λόγο του σήματος προς το άθροισμα του θορύβου και των παρεμβολών. Όταν ο λόγος αυτός βρίσκεται σε επίπεδο που επικαλύπτονται (overlap) δυο διαδοχικά προφίλ δεν υφίσταται αλλαγή. Αλλαγές προφίλ προς τα πάνω γίνονται όταν ο λόγος αυτός φτάσει στο άνω όριο της περιοχής επικάλυψης. Αντιστρόφως γίνονται οι μεταβολές όταν ο λόγος  $C/(N+1)$  ελαττώνεται.

Μετά τον αρχικό καθορισμό των burst profiles που θα χρησιμοποιηθούν για το uplink και το downlink μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού εργασίας, το

RLC συνεχίζει να παρακολουθεί και να ελέγχει τα burst profiles κατά τη λειτουργία τους. Τυχόν ακραίες καιρικές συνθήκες που μπορεί να υπάρχουν στη περιοχή του δικτύου θα ωθήσουν τον σταθμό εργασίας να ζητήσει κάποιο πιο ισχυρό burst profile, έτσι ώστε να διατηρήσει την υπάρχουσα ποιότητα στην επικοινωνία που έχει με το δίκτυο. Αντίστοιχα, σε ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, που επιτρέπουν στη σύνδεση να έχει μικρές απώλειες και χαμηλό επίπεδο θορύβου, ο σταθμός εργασίας τότε έχει τη δυνατότητα να λειτουργήσει προσωρινά χρησιμοποιώντας ένα πιο αποδοτικό burst profile δίχως να υπάρχει κίνδυνος για τη ποιότητα της επικοινωνίας. Το RLC συνεχίζει να προσαρμόζει το παρόν UL και DL burst profile του σταθμού εργασίας, προσπαθώντας διαρκώς να πετύχει μια ισορροπία μεταξύ αποδοτικότητας και στιβαρότητας στον τρόπο επικοινωνίας των δύο. Επειδή ο σταθμός βάσης ελέγχει και παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο την ποιότητα του σήματος στο uplink, το πρωτόκολλο που είναι υπεύθυνο για τις αλλαγές των burst profile ενός σταθμού εργασίας γίνεται πολύ απλό. Ο σταθμός βάσης καθορίζει μερικώς το UIUC του burst profile κάθε φορά που ανανεώνει την κατανομή του φάσματος του σταθμού εργασίας κατά την αποστολή ενός frame. Με τον τρόπο αυτό εξαλείφεται η ανάγκη επιβεβαίωσης των αλλαγών, καθώς ο σταθμός εργασίας θα λαμβάνει πάντα το UIUC και την κατανομή του φάσματος ή δεν θα λαμβάνει κανένα από τα δύο. Έτσι δεν υπάρχει πιθανότητα να μην ταιριάζουν τα UL burst profile μεταξύ τους.

Στο downlink ο σταθμός εργασίας είναι εκείνος που παρακολουθεί την ποιότητα του σήματος λήψης, έτσι γνωρίζει πότε το burst profile του downlink θα πρέπει να αλλάξει. Όμως ο σταθμός βάσης είναι εκείνος που θα ελέγξει και θα αποφασίσει την αλλαγή των burst profile. Η μέθοδος που είναι προτιμότερη για την διεργασία αυτή είναι να σταλεί από τον σταθμό εργασίας ένα μήνυμα downlink burst profile change request (DBPC-REQ). Ο σταθμός βάσης ανταποκρίνεται με ένα (DBPC-RSP) μήνυμα, με το οποίο αποδέχεται ή απορρίπτει την αλλαγή την οποία έχει ζητήσει ο σταθμός εργασίας.

Λόγω της πιθανής απώλειας των μηνυμάτων αλλαγής burst profile που ενδέχεται να συμβεί από τειχών σφάλματα κατά την μετάδοση των μηνυμάτων, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την αλλαγή των burst profiles πρέπει να είναι προσεκτικά δομημένα. Η σειρά των ενεργειών που απαιτούνται να γίνουν για τις αλλαγές προφίλ, είναι διαφορετική όταν μεταβαίνουμε σε ένα πιο στιβαρό

προφίλ από τη σειρά που ακολουθείτε για τη μετάβαση σε ένα λιγότερο στιβαρό προφίλ.

### 3.5 Δέσμευση καναλιού (Channel Acquisition)

Το επίπεδο MAC του WiMAX περιλαμβάνει μία διαδικασία αρχικοποίησης ώστε να αποφεύγετε η ανάγκη για χειροκίνητη ρύθμιση. Ο σταθμός εργασίας από την αρχή της εγκατάστασης του «σκανάρει» τις συχνότητες του για να βρει ένα λειτουργήσιμο κανάλι επικοινωνίας. Μπορεί να ρυθμιστεί έτσι ώστε να συνδέεται μόνο με ένα συγκεκριμένο σταθμό βάσης, αναφερόμενος σε ένα προρυθμισμένο BSID το οποίο γίνεται broadcast από το κάθε ένα σταθμό βάσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη όταν ο σταθμός εργασίας βρίσκεται σε ένα σημείο όπου υπάρχουν περισσότεροι από ένα σταθμοί βάσης. Όταν αποφασίσει σε ποιο κανάλι η ζεύγος καναλιών θέλει να ξεκινήσει να επικοινωνεί, ο σταθμός εργασίας προσπαθεί να συγχρονίσει στη ταχύτητα του downlink μέσω των περιοδικών frame που μεταδίδονται (frame preambles). Όταν το φυσικό επίπεδο συγχρονίσει ο σταθμός εργασίας ψάχνει για περιοδικά DCD και UCD μηνύματα τα οποία επιτρέπουν στο σταθμό να δει την διαμόρφωση και το FEC που χρησιμοποιείτε στο δίκτυο.

Μετά την σύνδεση του σταθμού εργασίας στο δίκτυο, ο σταθμός εργασίας παίρνει μία διεύθυνση IP συνήθως από κάποιο DHCP και καθορίζει την ώρα και την ημερομηνία μέσω του Internet Time Protocol. Ο DHCP server προσφέρει επίσης την διεύθυνση του TFTP server μέσω του οποίου ο σταθμός εργασίας μπορεί να ζητήσει ένα αρχείο ρυθμίσεων. Αυτό το αρχείο παρέχει μία διεπαφή για την παροχή πληροφοριών για τις ρυθμίσεις που πρέπει να χρησιμοποιήσει ο σταθμός.

# **Κεφάλαιο 4: Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) για το πρότυπο IEEE 802.16 (WiMAX) (2) (4)**

## **4.1 Εισαγωγή**

Συχνά υπάρχει η αντίληψη πως κάθε μορφή πληροφορίας και κάθε πρωτόκολλο επικοινωνίας μπορεί να λειτουργήσει σε ένα ασύρματο δίκτυο. Η δικτύωση είναι αρκετά δύσκολη ακόμα και σε ένα προβλέψιμο και διαχειρίσιμο ενσύρματο δίκτυο. Όταν γίνεται αναφορά σε ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Services (QoS)) εννοεί μία διαδικασία-τεχνική η οποία βοηθάει στη μείωση της καθυστέρησης και του jitter άρα και στη μείωση των πακέτων τα οποία απορρίπτονται. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται αυτές οι διαδικασίες-τεχνικές που χρησιμοποιούνται από το πρότυπο IEEE 802.16.

## **4.2 Ανάλυση QoS**

Η ποιότητα υπηρεσίας προσδιορίζει διάφορες κατηγορίες:

- Σχεδιασμός Service Flow QoS.
- Εφαρμογή Δυναμικής Υπηρεσίας.
- Μοντέλο Ενεργοποίησης δύο φάσεων.

Για παροχή ποιότητας υπηρεσιών (QoS) απαιτούνται τα παρακάτω:

- Μια συνάρτηση διαμόρφωσης και πιστοποίησης για την προ-διαμόρφωση των σταθμών εργασίας οι οποίοι βασίζονται σε QoS ροή υπηρεσίας (service flow) και των παραμέτρων κίνησης.
- Μια συνάρτηση σήματος για την δυναμική επαλήθευση των QoS-enabled ροών υπηρεσιών και των παραμέτρων κίνησης.
- Εκμετάλλευση του σχεδιασμού MAC και των παραμέτρων κίνησης QoS για τις ανερχόμενες ροές υπηρεσιών.
- Εκμετάλλευση των παραμέτρων κίνησης QoS για τις κατερχόμενες ροές υπηρεσιών.
- Ομαδοποίηση των ιδιοτήτων των ροών υπηρεσιών σε επώνυμες κλάσεις υπηρεσιών (service classes), ώστε οι υπάρξεις του άνω επιπέδου και οι εξωτερικές εφαρμογές να μπορούν να απαιτούν ροές υπηρεσιών με τις επιθυμητές παραμέτρους QoS με έναν συμφωνημένο ενιαίο τρόπο.

### 4.3 Ροή υπηρεσιών (Service Flow)

Μία ροή υπηρεσιών γενικά είναι μια υπηρεσία μετάδοσης MAC που παρέχει μετάδοση μίας κατεύθυνσης πακέτων, είτε μετάδοση ανερχόμενων πακέτων είτε μετάδοση κατερχόμενων πακέτων. Μία ροή υπηρεσίας χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών, όπως η καθυστέρηση, το jitter και τη διασφάλιση για throughput (throughput assurances). Επίσης περιλαμβάνει χαρακτηριστικά όπως διαμόρφωση και κωδικοποίηση του σήματος, το σύστημα μετάδοσης, το μέγεθος των buffers και το μέγεθος των πακέτων SDU. Για να είναι ίδιες οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται μεταξύ ενός σταθμού εργασίας και του σταθμού βάσης, αυτές οι ιδιότητες περιλαμβάνουν λεπτομέρειες για το πώς ένας σταθμός εργασίας ζητάει κατανομή ανερχόμενου εύρους ζώνης (UL bandwidth allocations) και πώς θα ανταποκριθεί ο σταθμός βάσης σε αυτή την αίτηση.

Κάθε ροή υπηρεσιών χαρακτηρίζεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- **Αναγνωριστικό ροής υπηρεσιών (Service Flow ID (SFID)):** Ένα μοναδικό αναγνωριστικό (ID) ανατίθεται σε κάθε ροή υπηρεσιών το οποίο αποτελεί την ταυτότητα του μέσα στο δίκτυο. Η ροή υπηρεσιών περιέχει τουλάχιστον ένα SFID για κάθε κατεύθυνση επικοινωνίας (Download και Upload).
- **Αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection ID (CID)):** Καθορίζει ένα αναγνωριστικό σύνδεσης το οποίο προσδιορίζει ένα αναγνωριστικό ροής υπηρεσιών (SFID) όταν η σύνδεση έχει μία καθορισμένη ή ενεργή ροή υπηρεσιών.
- **Προκαθορισμένες παράμετροι ποιότητας υπηρεσιών (ProvisionedQoSParamSet):** Ένα σετ παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών το οποίο καθορίζεται από έννοιες οι οποίες δεν αφορούν το πρότυπο IEEE 802.16 και καθορίζεται από το σύστημα διαχείρισης του δικτύου.
- **Δεδομένες παράμετροι ποιότητας υπηρεσιών (AdmittedQoSParamSet):** Προσδιορίζει το σύνολο των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών μίας ροής δεδομένων για την οποία υπάρχουν δεσμευμένοι πόροι του δικτύου. Ο κύριος πόρος που μπορεί να κρατηθεί είναι το εύρος ζώνης, αλλά αυτό επίσης περιέχει και κάθε άλλο χρονικά βασισμένο πόρο και πόρο μνήμης που απαιτείται για την ενεργοποίηση μίας ροής.
- **Ενεργές παράμετροι ποιότητας υπηρεσιών (ActiveQoSParamSet):** Ένα σύνολο παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών που προσδιορίζουν τις υπηρεσίες που παρέχονται σε μία ροή δεδομένων. Μόνο μία ενεργή ροή δεδομένων μπορεί να προωθήσει πακέτα.
- **Μονάδα εξουσιοδότησης (Authorization Module):** Μια λογική συνάρτηση που αποδέχεται ή απορρίπτει κάθε αλλαγή στις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσιών και τους ταξινομητές (Classifiers) που συσχετίζονται με μία ροή υπηρεσιών. Δηλαδή, προσδιορίζει ένα "φάκελο" που περιορίζει τις πιθανές τιμές των δεδομένων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών

(AdmittesQosParamSet) και των ενεργών παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών ActiveQosParamSet.

Κάθε ροή υπηρεσιών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε έναν από τους τρεις παρακάτω τύπους ροών υπηρεσιών (Types of Service Flows):

- **Προβλεπόμενο (Provisioned):** Αυτός ο τύπος ροής υπηρεσιών είναι γνωστός μέσω της τροφοδοσίας από, για παράδειγμα, το σύστημα διαχείρισης δικτύου. Τα σύνολα AdmittesQosParamSet και ActiveQosParamSet είναι κενά (null).
- **Αναγνωρισμένο (Admitted):** Αυτός ο τύπος έχει δεσμευμένους πόρους από το σταθμό βάσης για το AdmittedQoSParamSet του, αλλά δεν είναι ενεργές. Κάποιος άλλος μηχανισμός έχει καθοριστεί ή έχει σηματοδοτηθεί ως δεδομένη ροή υπηρεσιών.
- **Ενεργό (Active):** Αυτή η ροή υπηρεσιών έχει δεσμευμένους πόρους από το σταθμό βάσης για το ActiveQoSParamSet του. Το ActiveQoSParamSet του είναι μη κενό (non-null).

Οι ροές υπηρεσιών μπορούν να δημιουργηθούν είτε με τροφοδοσία από, για παράδειγμα, το σύστημα διαχείρισης δικτύου, είτε δυναμικά. Επίσης, έχουν οριστεί πρωτόκολλα για την τροποποίηση και την διαγραφή των ροών δεδομένων. Επομένως οι ροές δεδομένων μπορούν να δημιουργηθούν, να τροποποιηθούν και να διαγραφούν μέσω μηνυμάτων διαχείρισης.



Υπάρχουν τριών ειδών μηνύματα διαχείρισης τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

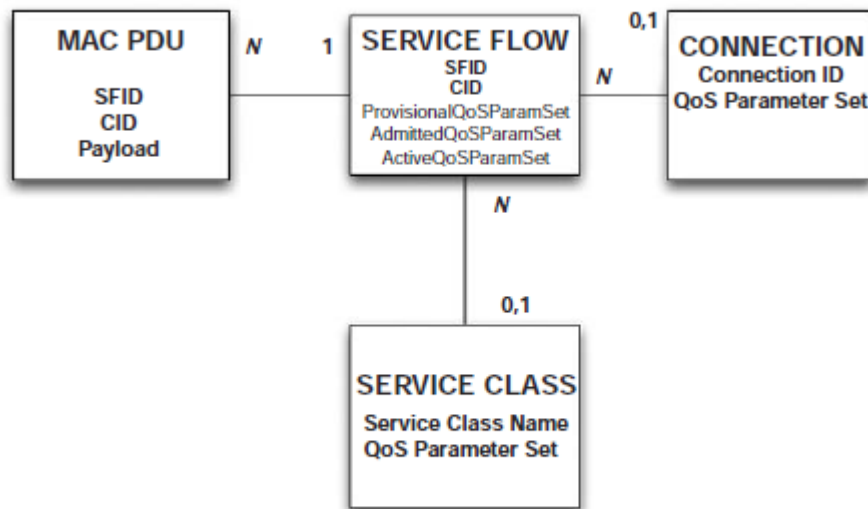
- **Δυναμική εκχώρηση υπηρεσίας (Dynamic Service Addition (DSA)):**  
Αυτό το μήνυμα διαχείρισης χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μίας νέας ροής υπηρεσιών.
- **Δυναμική τροποποίηση υπηρεσίας (Dynamic Service Change (DSC)):** Αυτό το μήνυμα διαχείρισης χρησιμοποιείται για την τροποποίηση μίας υπάρχουσας ροής υπηρεσιών.
- **Δυναμική διαγραφή υπηρεσίας (Dynamic Service Deletion (DSD)):**  
Αυτό το μήνυμα διαχείρισης χρησιμοποιείται για τη διαγραφή μίας υπάρχουσας ροής δεδομένων.

## 4.4 Μοντέλο αντικειμένων

Κάθε αντικείμενο έχει ένα συγκεκριμένο αριθμό χαρακτηριστικών, το χαρακτηριστικό που αποτελεί και την ταυτότητα του αντικειμένου είναι υπογραμμισμένο. Τα προαιρετικά χαρακτηριστικά βρίσκονται μέσα σε παρενθέσεις. Η σχέση μεταξύ των αντικειμένων σημειώνεται στο τέλος κάθε γραμμής συσχέτισης. Για παράδειγμα, μία ροή υπηρεσιών μπορεί να συσχετιστεί με 0 έως  $n$  PDU's, ενώ το PDU μπορεί να συσχετιστεί με ακριβώς μία ροή υπηρεσιών. Η ροή υπηρεσιών είναι η κεντρική ιδέα του επιπέδου MAC του πρωτοκόλλου WiMAX. Έχει ένα μοναδικό 32-bit αναγνωριστικό SFID. Οι ροές υπηρεσιών μπορεί να έχουν είτε ανερχόμενη είτε κατερχόμενη κατεύθυνση. Μία αναγνωρισμένη ή ενεργή ροή δεδομένων παρακολουθείται μέσω ενός 16-bit αναγνωριστικού CID.

Μία CS διεργασία στέλνει δεδομένα στο MAC SAP για μετάδοση στη διασύνδεση MAC. Τα δεδομένα που μεταδίδονται μέσω του MAC SAP περιέχουν και το αναγνωριστικό CID το οποίο καθορίζει τη σύνδεση μέσω της οποίας θα

μεταδοθούν τα δεδομένα. Η ροή δεδομένων για την σύνδεση ελέγχεται από το MAC μέσω του αναγνωριστικού CID.



Εικόνα 6: Μοντέλο Αντικειμένων (2)

Η κλάση υπηρεσιών είναι ένα προαιρετικό αντικείμενο και ορίζεται έτσι ώστε να έχει ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών. Οι παράμετροι της ποιότητας των υπηρεσιών μίας ροής δεδομένων μπορούν να περιέχουν μία αναφορά σε μία κλάση υπηρεσιών ως μακροεντολή η οποία επιλέγει όλες της παραμέτρους της κλάσης υπηρεσιών. Το σεντ παραμέτρων της ποιότητας υπηρεσιών μπορεί να επεκτείνει ή να επικαλύπτει το σεντ παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών της κλάσης υπηρεσιών, τα οποία υπόκεινται προς έγκριση από τον σταθμό βάσης.

## 4.5 Κλάσης υπηρεσιών (Service classes)

Οι κλάσεις υπηρεσιών εξυπηρετούν δύο σκοπούς:

- Πρώτον, επιτρέπουν στους διαχειριστές να μεταφέρουν τη δημιουργία των ροών δεδομένων από τον εξυπηρετητή (server) στο σταθμό βάσης. Οι

διαχειριστές καθορίζουν στον κάθε σταθμό εργασίας το όνομα της κλάσης υπηρεσιών που θα χρησιμοποιούν της οποίας κλάσης υπάρχει ολόκληρη η υλοποίηση στον σταθμό βάσης. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές να τροποποιήσουν την υλοποίηση μίας κλάσης υπηρεσιών σε τοπικό επίπεδο χωρίς να χρειάζεται να αλλάξουν τίποτα στους σταθμούς εργασίας.

- Δεύτερον, επιτρέπουν στα πρωτόκολλα των ανώτερων επιπέδων να δημιουργήσουν μία ροή υπηρεσιών χρησιμοποιώντας το όνομα της κλάσης υπηρεσιών. Για παράδειγμα, το τηλεφωνικό σήμα μπορεί να οδηγήσει το σταθμό εργασίας να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε από τις διαθέσιμες ροές υπηρεσιών από τη κλάση "G.771".

Κάθε ροή υπηρεσιών μπορεί να έχει το δικό της σετ παραμέτρων ποιότητας υπηρεσιών καθορισμένο με οποιοδήποτε από τους τρεις παρακάτω τρόπους:

- Με σαφή συνυπολογισμό όλων των παραμέτρων κίνησης.
- Μέσω έμμεσης αναφοράς σε ένα σετ παραμέτρων κίνησης, καθορίζοντας ένα όνομα κλάσης υπηρεσιών.
- Με το καθορισμό ενός ονόματος μίας κλάσης υπηρεσιών μαζί με τροποποιημένες παραμέτρους.

## 4.6 Υποστηριζόμενοι τύποι ποιότητας υπηρεσιών (QoS) από το πρότυπο IEEE 802.16

Το πρότυπο IEEE 802.16 υποστηρίζει τέσσερις τύπους ποιότητας υπηρεσιών ώστε να εξυπηρετήσει όλες τις δυνατές μορφές κίνησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα δίκτυο. Όπως είναι τα δεδομένα, η φωνή, το βίντεο κτλ. Οι τέσσερις τύποι ποιότητας υπηρεσιών αναλύονται παρακάτω:

- **Unsolicited grand service (UGS):** Σχεδιάστηκε για την υποστήριξη πραγματικού χρόνου ροών υπηρεσιών οι οποίες παράγουν καθορισμένου μεγέθους πακέτα, όπως το VoIP, σε περιοδική βάση. Η παροχή καθορισμένου μεγέθους πακέτων δεδομένων περιοδικά εξαλείφει το overhead και τη καθυστέρηση που συνδέεται με της αιτήσεις για εύρος ζώνης. Στο UGS δεν υπάρχει ανταγωνισμός για το ποιος σταθμός θα μεταδώσει πρώτος. Ο σταθμός βάσης θα παρέχει data grand burst IE's στο σταθμό εργασίας σε περιοδική βάση μεγέθους όσο ο μέγιστος υποστηριζόμενος ρυθμός κίνησης (Maximum Sustained Traffic Rate) της ροής υπηρεσιών. Το μέγεθος αυτών των παραχωρήσεων θα πρέπει να επαρκεί ώστε να χωρέσουν τα πακέτα σταθερού μήκους που συσχετίζονται με τη ροή υπηρεσιών, αλλά και τα επιπλέον δεδομένα του επιπέδου MAC (MAC overhead). Για την σωστή λειτουργία αυτής της υπηρεσίας, η πολιτική αίτησης-μετάδοσης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε ο σταθμός εργασίας να εμποδίζει την χρήση της κάθε πιθανότητας αιτήσεων ανταγωνισμού για αυτή τη σύνδεση. Οι υπηρεσίες IE's είναι η μέγιστη υποστηριζόμενη κίνηση (Maximum Sustained Traffic Rate), η ελάχιστη δεσμευμένη κίνηση (Minimum Reserved Traffic Rate), μέγιστη καθυστέρηση (Maximum Latency), ανεκτός θόρυβος (Tolerated Jitter) και η πολιτική αίτησης μετάδοσης (Request-Transmission Policy).
- **Real-time polling service (rtPS):** Σχεδιάστηκε για την υποστήριξη πραγματικού χρόνου ροών υπηρεσιών οι οποίες παράγουν μεταβλητού

μεγέθους πακέτα, όπως το MPEG βίντεο, σε περιοδική βάση. Προσφέρει δυνατότητες περιοδικών αιτήσεων πραγματικού χρόνου, οι οποίες ικανοποιούν τις ανάγκες ροής σε πραγματικό χρόνο και επιτρέπουν στο σταθμό εργασίας να προσδιορίσει το μέγεθος της επιθυμητής εκχώρησης ροής που χρειάζεται κάθε φορά να του εκχωρηθεί από το σταθμό βάσης. Αυτή η υπηρεσία απαιτεί μεγαλύτερη λίστα αιτήσεων από το UGS, αλλά υποστηρίζει εκχωρήσεις μεταβλητού μεγέθους για την ευνοϊκότερη επάρκεια μετάδοσης δεδομένων. Τέλος, οι σταθμοί εργασίας δεν μπορούν να ανταγωνιστούν μεταξύ τους για το ποιος θα μεταδώσει πρώτος ή να χρησιμοποιήσουν riggback αιτήσεις.

- **Non real-time polling services (nrtPS):** Σχεδιάστηκε ώστε να υποστηρίζει μη πραγματικού χρόνου ροές οι οποίες απαιτούν εκχωρήσεις δεδομένων μεταβλητού μεγέθους, όπως οι μεταδόσεις μεγάλων αρχείων, όπως το πρωτόκολλο FTP, σε σταθερή βάση. Η υπηρεσία αυτή προσφέρει unicast ευκαιρίες αίτησης (roll) σε περιοδική βάση αλλά χρησιμοποιώντας μεγαλύτερα διαστήματα κενών από το rtPS ώστε να διασφαλίσει ότι οι σταθμοί εργασίας έχουν την ευκαιρία να ζητήσουν ροή ακόμη και κατά τη συμφόρηση του δικτύου. Επιπλέον, επιτρέπει τη χρήση ανταγωνισμού μεταξύ των σταθμών εργασίας για το ποιος θα μεταδώσει και ευκαιρίες riggback αιτήσεων.
- **Best Effort (BE):** Η υπηρεσία Best Effort παρέχει δίκαιες και αποτελεσματικές υπηρεσίες για best effort κυκλοφορία. Αυτό επιτυγχάνεται επιτρέποντας στους σταθμούς εργασίας να ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το ποιος θα μεταδώσει πρώτος. Αν ένας σταθμός εργασίας καταφέρει να αποκτήσει πρόσβαση στο μέσο μετάδοσης, μεταδίδει το αίτημα για bandwidth στο σταθμό βάσης ο οποίος ανταποκρίνεται εκχωρώντας το απαιτούμενο bandwidth σε frames στο σταθμό εργασίας.

## 4.7 Συμπέρασμα

Οι πάροχοι υπηρεσιών οι οποίοι εξετάζουν μια λύση WiMAX θα πρέπει να ενθαρρύνονται από τα πολλά μέτρα, τόσο κληρονομικά όσο και WiMAX ειδικά, που εστιάζουν σε θέματα QoS. Καθώς η μετάδοση γίνεται μέσω του αέρα, είναι σημαντικό ποιος μηχανισμός QoS θα χρησιμοποιηθεί και η επιλογή πρέπει να γίνει με πολύ προσοχή.. Τα μοντέλα αντικειμένων και η δυναμική εκχώρηση ροών υπηρεσιών σε συνδυασμό με τις παραμέτρους QoS διασφαλίζουν καλή ποιότητας υπηρεσίας (QoS) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο WiMAX.

# **Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση δικτύου WiMAX με τη χρήση του προσομοιωτή Ornet Modeler**

## **5.1 Εισαγωγή**

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε μία αναφορά στη δομή και τη χρησιμότητα του πρωτοκόλλου IEEE 802.16 και παρουσιάστηκαν αναλυτικά οι λειτουργίες του. Στο κεφάλαιο αυτό μετά από τη μελέτη και υλοποίηση διάφορων σεναρίων προσομοίωσης με τη χρήση του προσομοιωτή Ornet Modeler επιλέχθηκε να γίνει μία μελέτη που θα προσομοιώνει ένα ασύρματο δίκτυο WiMAX το οποίο θα βρίσκεται στο Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης. Το δίκτυο αυτό θα περιλαμβάνει όλες τις υπηρεσίες που θα μπορούσαν να παρέχονται στο χώρο ενός ακαδημαϊκού ιδρύματος όπως είναι η πρόσβαση σε διδακτικό υλικό, πρόσβαση στην ιστοσελίδα της κάθε σχολής, ηλεκτρονική γραμματεία, ηλεκτρονικό ταχυδρομείο, βίντεο και τηλεφωνία. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία γενική αναφορά και ανάλυση του προσομοιωτή Ornet Modeler. Επίσης παρουσιάζεται και αναλύεται το αρχικό σενάριο προσομοίωσης που υλοποιήθηκε καθώς και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το συγκεκριμένο δίκτυο.

## 5.2 Ο προσομοιωτής Opnet Modeler



Εικόνα 7: Opnet Modeler V16.0 Logo

Το Opnet Modeler είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης δικτύων μέσω του οποίου μπορούν να προσομοιωθούν όλων των ειδών δίκτυα είτε αυτά είναι τοπικά δίκτυα είτε μητροπολιτικά είτε δίκτυα ευρείας περιοχής είτε αυτά είναι ενσύρματα ή ασύρματα. Επίσης, παρέχει κάθε χρησιμοποιούμενη τεχνολογία τόσο σε επίπεδο πρωτοκόλλων όσο και σε επίπεδο δικτυακού εξοπλισμού. Επιπλέον, διαθέτει μία πλήρη γκάμα δικτυακού εξοπλισμού που κυκλοφορεί σήμερα στο εμπόριο. Ο χρήστης του προγράμματος έχει τη δυνατότητα πλήρους παραμετροποίησης των χαρακτηριστικών κάθε αντικειμένου που χρησιμοποιείτε μέσω του γραφικού περιβάλλοντος (Graphical User Interface - GUI) που προσφέρει ο προσομοιωτής Opnet Modeler. Με τον όρο αντικείμενο αναφέρεται κάθε δομικό στοιχείο του δικτύου τόσο σε επίπεδο τεχνολογίας, όσο και σε επίπεδο λογισμικού. Επίσης, διαθέτει μία ευρεία γκάμα από δικτυακές συσκευές οι οποίες διατίθενται στο εμπόριο. Το πρόγραμμα επιτρέπει την παραμετροποίηση του κώδικα του κάθε αντικειμένου του δικτύου ο οποίος κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα C δίνοντας έτσι ακόμα περισσότερες δυνατότητες πλήρους παραμετροποίησης των αντικειμένων του δικτύου.

Τέλος, η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης είναι η 16.0 η οποία διαθέτει και ξεχωριστά ασύρματη σουίτα η οποία περιλαμβάνει το μοντέλο WiMAX που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα πτυχιακή εργασία.



## 5.3 Αρχικό σενάριο προσομοίωσης δικτύου WiMAX

Όλες οι προσομοιώσεις έγιναν με την βοήθεια του Opnet Modeler v16.0 το οποίο βρίσκεται εγκατεστημένο σε ένα υπολογιστή του Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης στο τμήμα πληροφορικής. Ο υπολογιστής αυτός διατίθεται από το Ερευνητικό Εργαστήριο Συστημάτων Υπολογιστών, Ασφάλειας και Δικτύων (Σ.Υ.Α.Δ.). Ο υπολογιστής αυτός έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Intel Pentium 4 στα 3.00 GHz
- 1 GB Ram
- Windows XP Professional με Service pack 3

Μετά από μελέτη πολλών σεναρίων με θέμα τα ασύρματα δίκτυα WiMAX επιλέχθηκε να γίνει μία μελέτη που θα αφορά την εγκατάσταση ενός ασύρματου δικτύου WiMAX στο χώρο του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από πέντε εξυπηρετητές (servers) και τρεις δρομολογητές (routers) που θα εξυπηρετούν τις απαιτήσεις των χρηστών των πέντε υποδικτύων WiMAX. Μέσω του ασύρματου δικτύου WiMAX θα συνδέονται όλοι οι χρήστες το οποίο δίκτυο θα τους προσφέρει όλες τις δυνατότητες και υπηρεσίες που θα χρειάζονται σε ένα ακαδημαϊκό χώρο όπως είναι ο χώρος ενός πανεπιστημίου. Οι λόγοι που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο Πανεπιστήμιο είναι γιατί διαθέτει μια μεγάλη γκάμα διαφορετικών απαιτήσεων, μεγάλο αριθμό χρηστών και μια πληθώρα υπηρεσιών που προσφέρει το δίκτυο του, συγκριτικά πολύ μεγαλύτερες από άλλα εκπαιδευτικά ιδρύματα της Θεσσαλονίκης όπως το ΑΤΕΙΘ. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως οι απαιτήσεις των χρηστών σε δικτυακούς πόρους του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν στα σενάρια προσομοίωσης που δημιουργήθηκαν είναι φανταστικές γιατί δεν ήταν εφικτό να γίνει μία μελέτη για την συλλογή πραγματικών στοιχείων όσον αφορά τις απαιτήσεις των χρηστών από το δίκτυο του Αριστοτελείου πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

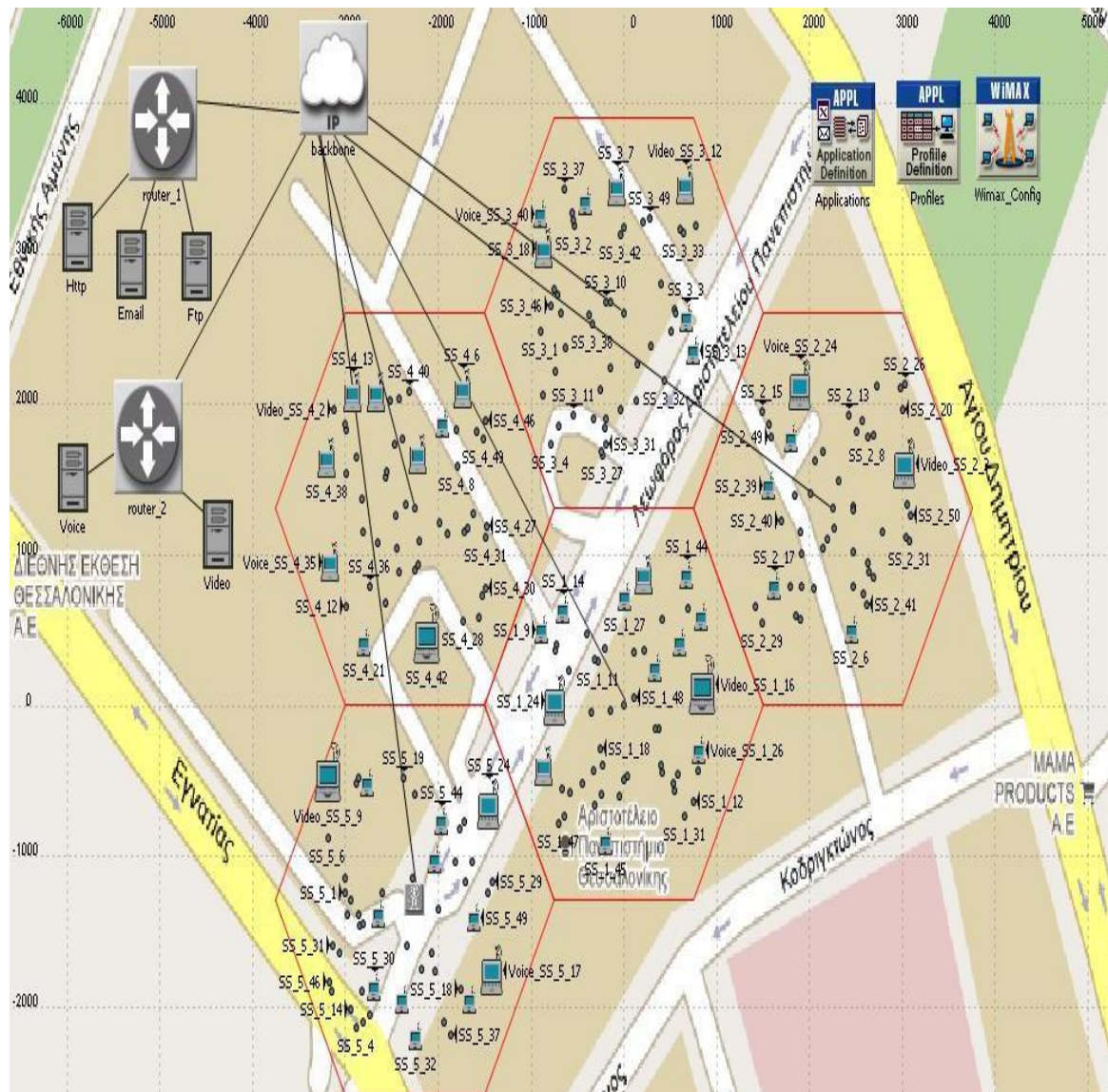
Μετά από τη μελέτη που έγινε το δίκτυο χωρίστηκε σε δύο μέρη στο δίκτυο κορμού (backbone) στο οποίο βρίσκονται όλοι οι εξυπηρετητές (servers) του δικτύου και στο ασύρματο δίκτυο WiMAX τα δύο δίκτυα συνδέονται με την βοήθεια τριών δρομολογητών. Οι υπηρεσίες που θα προσφέρει το δίκτυο είναι η περιήγηση στο διαδίκτυο, χρήση ενός FTP server από τον οποίο οι χρήστες θα μπορούν να ανεβάσουν ή να κατεβάσουν υλικό το οποίο θα αφορά τις ακαδημαϊκές δραστηριότητες τους στο χώρο ενός πανεπιστημίου, πρόσβαση σε λογαριασμό ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, επίσης θα προσφέρει τη δυνατότητα παρακολούθησης βιντεοσκοπημένων διαλέξεων μαθημάτων, παρουσιάσεων ή ημερίδων που έχουν προηγουμένως βιντεοσκοπηθεί στο χώρο του πανεπιστημίου ή από διάφορα άλλα ακαδημαϊκά ιδρύματα της Ελλάδας και του εξωτερικού. Τέλος παρέχεται η δυνατότητα πραγματοποίησης τηλεφωνικών συνδιαλέξεων με τη χρήση της τεχνολογίας Voice IP (VoIP).

### **5.3.1 Αρχικό σενάριο προσομοίωσης**

Παρακάτω γίνεται μία αναλυτική παρουσίαση του αρχικού σεναρίου που δημιουργήθηκε. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται το δίκτυο που δημιουργήθηκε και αναλυτικά οι ρυθμίσεις του όσο αναφορά τους εξυπηρετητές, τους σταθμούς εργασίας, τους σταθμούς βάσης αλλά και των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο και τις ρυθμίσεις της προσομοίωσης που δίνονται από το Ornet.

#### **5.3.1.1 Δίκτυο προσομοίωσης**

Εδώ γίνεται μία πρώτη παρουσίαση τη μορφής του δικτύου που δημιουργήθηκε και του τύπου των συνδέσεων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και των ρυθμίσεων των σταθμών του δικτύου. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η μορφή του δικτύου που δημιουργήθηκε ώστε να εξυπηρετεί τους χρήστες του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 8: Δίκτυο προσομοίωσης Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Η δομή του δικτύου αυτού παραμένει ίδια σε όλα τα σενάρια για να είναι δυνατή η σύγκριση των σεναρίων. Το δίκτυο αποτελείται από το δίκτυο κορμού το οποίο έχει υλοποιηθεί με τη χρήση οπτικών ινών και περιλαμβάνει πέντε εξυπηρετητές (servers) οι οποίοι συνδέονται με το δίκτυο WiMAX με την βοήθεια τριών δρομολογητών. Στο δίκτυο υπάρχει ένας HTTP server στον οποίο βρίσκονται οι ιστοσελίδες των χρηστών όσο και οι ιστοσελίδες του κάθε ιδρύματος, ένας FTP server στον οποίο υπάρχει αποθηκευμένο υλικό το οποίο προσφέρεται για κατέβαση από τους χρήστες του δικτύου και στον οποίο όλοι οι χρήστες

μπορούν να ανεβάσουν υλικό. Επίσης, υπάρχει ένας mail server ο οποίος δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, ένας VoIP server μέσω του οποίου παρέχεται η δυνατότητα τηλεφωνικών συνδιαλέξεων και τέλος ο video server ο οποίος παρέχει την δυνατότητα της αναπαραγωγής βίντεο (video on demand) από τους χρήστες του δικτύου. Εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι λόγω της φύσης της παρούσης πτυχιακής εργασίας η οποία αφορά τα ασύρματα δίκτυα WiMAX δεν δόθηκε περαιτέρω βαρύτητα στην παραμετροποίηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου κορμού και των servers δηλαδή το δίκτυο κορμού είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει το συγκεκριμένο φόρτο χωρίς προβλήματα. Ο καθένας από τους πέντε εξυπηρετητές χρησιμοποιεί από μία εφαρμογή σύμφωνα με την ιδιότητα τους στο δίκτυο.

Το δεύτερο κομμάτι του δικτύου είναι το κομμάτι του ασύρματου δικτύου WiMAX το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο IEEE 802.16e από τη στοίβα πρωτοκόλλων του WiMAX και χωρίζεται σε πέντε υποδίκτυα όπου στο καθένα υπάρχουν πενήντα σταθμοί εργασίας όπου από αυτούς σύμφωνα με το αρχικό σενάριο οι 48 σταθμοί κάνουν χρήση των υπηρεσιών HTTP, email και FTP και υπάρχει και ένας σταθμός εργασίας που κάνει χρήση της υπηρεσίας τηλεφωνίας (Voip) και ένας σταθμός που χρησιμοποιεί την υπηρεσία βίντεο και τέλος κάθε υποδίκτυο WiMAX διαθέτει και ένα σταθμό βάσης ο οποίος εξυπηρετεί όλους τους σταθμούς εργασίας και συνδέεται ενσύρματα με το δίκτυο κορμού με τη χρήση οπτικών ινών. Τα πέντε υποδίκτυα WiMAX είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους δηλαδή έχουν τον ίδιο ακριβώς αριθμό σταθμών και χρησιμοποιούν τις ίδιες ακριβώς υπηρεσίες. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικοί πίνακες με τις ρυθμίσεις των σταθμών του δικτύου.

Πίνακας 1: Ρυθμίσεις σταθμών εργασίας αρχικού σεναρίου προσομοίωσης

Τύπος Σταθμού	Αριθμός Σταθμών	Service Class Name	Quality Of Service	Μέγεθος Buffer	Εφαρμογή
Σταθμός Εργασίας	48	Bronze	Best Effort	64 Kb	HTTP Email FTP
Σταθμός Εργασίας	1	Bronze	Best Effort	64 Kb	Voip
Σταθμός Εργασίας	1	Bronze	Best Effort	64 Kb	Video

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις για το σύνολο των σταθμών εργασίας ενός υποδικτύου WiMAX αλλά ισχύουν και για τα υπόλοιπα υποδίκτυα γιατί όπως προαναφέρθηκε τα υποδίκτυα WiMAX είναι ίδια μεταξύ τους. Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα όλοι οι σταθμοί εργασίας είναι ίδιοι ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους δηλαδή χρησιμοποιούν την κλάση Bronze και Best Effort quality of service ενώ χρησιμοποιούν 64 KB μέγεθος buffer αλλά διαφέρουν ως προς τον τύπο της εφαρμογής (Application) που εκτελούν ο καθένας τους. Οι σταθμοί χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες αυτές είναι:

- 48 Σταθμοί οι οποίοι χρησιμοποιούν τις εφαρμογές HTTP, e-mail και FTP
- 1 Σταθμός ο οποίος χρησιμοποιεί την εφαρμογή Voice
- 1 Σταθμός ο οποίος χρησιμοποιεί την εφαρμογή βίντεο

Πίνακας 2: Ρυθμίσεις σταθμών Βάσης αρχικού σεναρίου προσομοίωσης

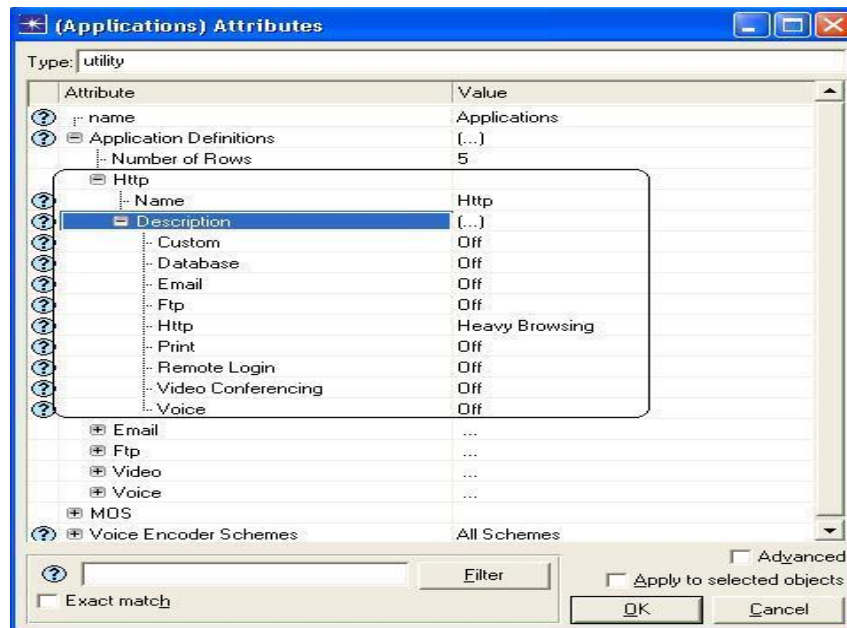
Τύπος Σταθμού	Μέγιστος αριθμός σταθμών εργασίας	Service Class Name	Quality Of Service	Αριθμός κεραιών Μετάδοσης και αποστολής
Σταθμός βάσης	100	Bronze	Best Effort	1

Όπως έχει προαναφερθεί οι 5 συνολικά σταθμοί βάσεις είναι ίδιοι μεταξύ τους και όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα μπορούν να υποστηρίξουν μέχρι 100 σταθμούς εργασίας ο καθένας, επίσης υποστηρίζουν μόνο την κλάση bronze και κάνουν χρήση του Quality of Service Best Effort. Τέλος, διαθέτουν μία κεραία για την αποστολή δεδομένων και μία για τη λήψη δεδομένων. Παρακάτω με την βοήθεια εικόνων μέσα από το περιβάλλον που προσφέρει το Ornet παρουσιάζονται αναλυτικά οι ρυθμίσεις που έγιναν στις υπηρεσίες που προσφέρονται από το κάθε εξυπηρετητή.

### 5.3.1.2 Εφαρμογές

Παρακάτω έχουμε μία ανάλυση των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο καθώς και του τρόπου με τον οποίο εκτελούνται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.





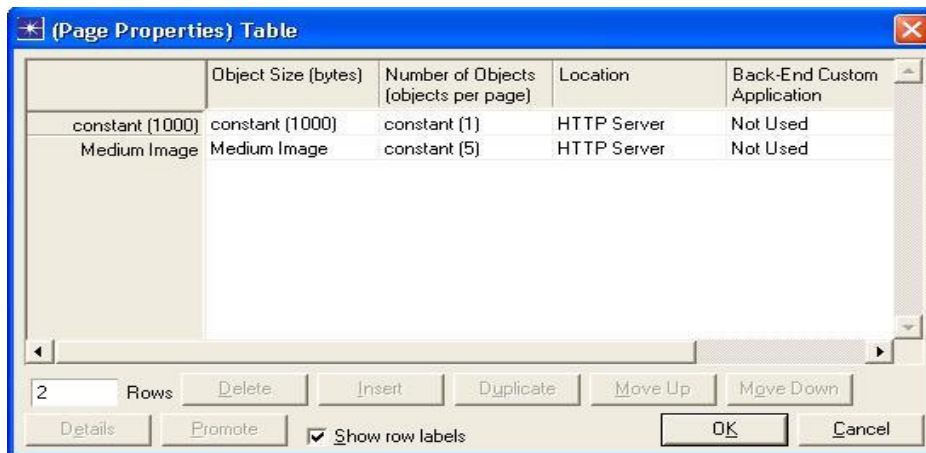
**Εικόνα 9: Εφαρμογή HTTP**

Ο HTTP server έχει ρυθμιστεί ώστε να χρησιμοποιεί μία εφαρμογή περιήγησης στον ιστό η οποία εφαρμογή έχει ρυθμιστεί για βαριάς μορφής περιήγηση δηλαδή οι χρήστες του δικτύου ζητούν συνεχώς νέες ιστοσελίδες οι οποίες είναι μεγάλες σε όγκο δεδομένων. Στις παρακάτω δύο εικόνες παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες της εφαρμογής.

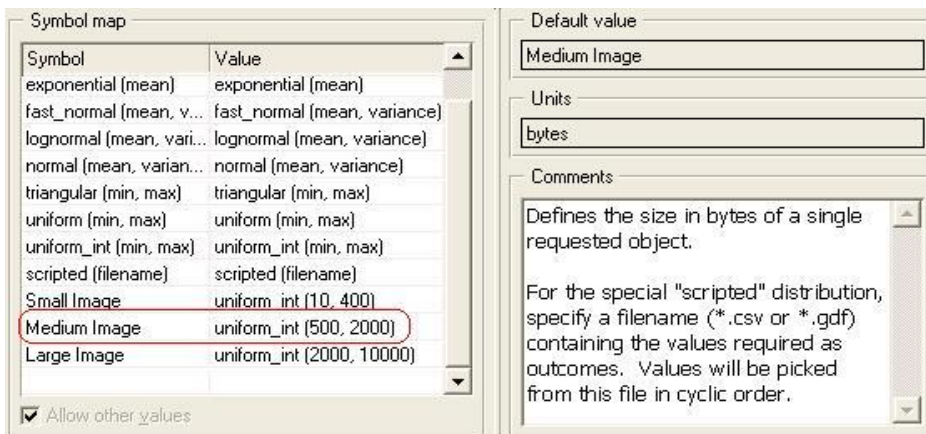
Attribute	Value
HTTP Specification	HTTP 1.1
Page Interarrival Time (seconds)	exponential (60)
Page Properties	(...)
Server Selection	(...)
RSVP Parameters	None
Type of Service	Best Effort (0)

**Εικόνα 10: Ρυθμίσεις εφαρμογής HTTP**

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται πως η εφαρμογή HTTP χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο HTTP 1.1, ενώ η συχνότητα με την οποία κάθε χρήστης ζητάει μία καινούργια ιστοσελίδα είναι 60 δευτερόλεπτα και τέλος η εφαρμογή έχει ρυθμιστεί να χρησιμοποιεί το Quality of Service Best Effort.



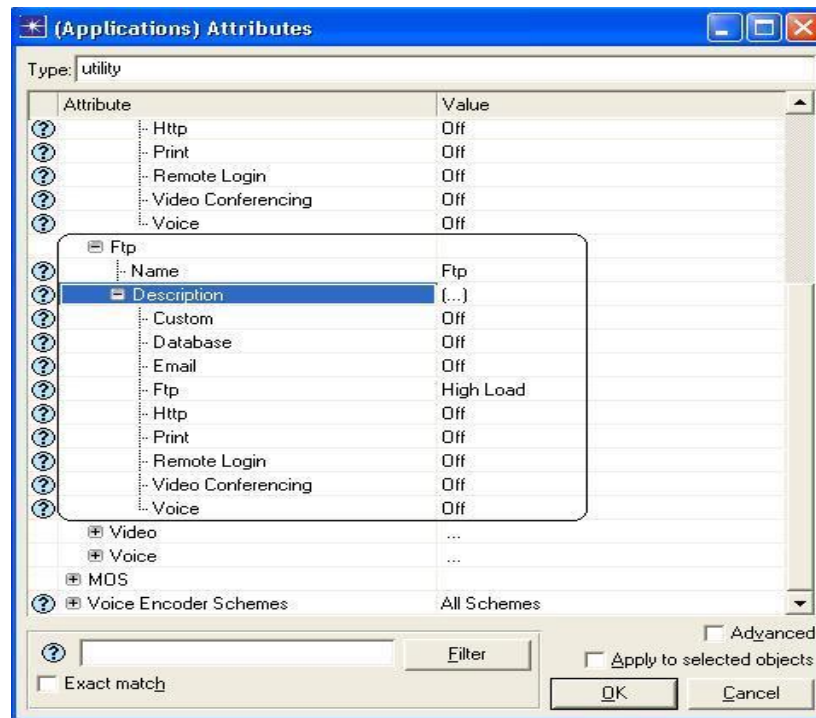
Εικόνα 11: Ιδιότητες σελίδας HTTP



Εικόνα 12: Ιδιότητες εικόνας στη σελίδα HTTP

Στις δύο παραπάνω εικόνες φαίνονται οι ρυθμίσεις για την ιστοσελίδα που χρησιμοποιεί η εφαρμογή HTTP. Η ιστοσελίδα είναι μεγέθους 1 MB περίπου ενώ περιέχει και πέντε εικόνες μεσαίου μεγέθους από 500 bytes έως 2000 bytes η κάθε μία.





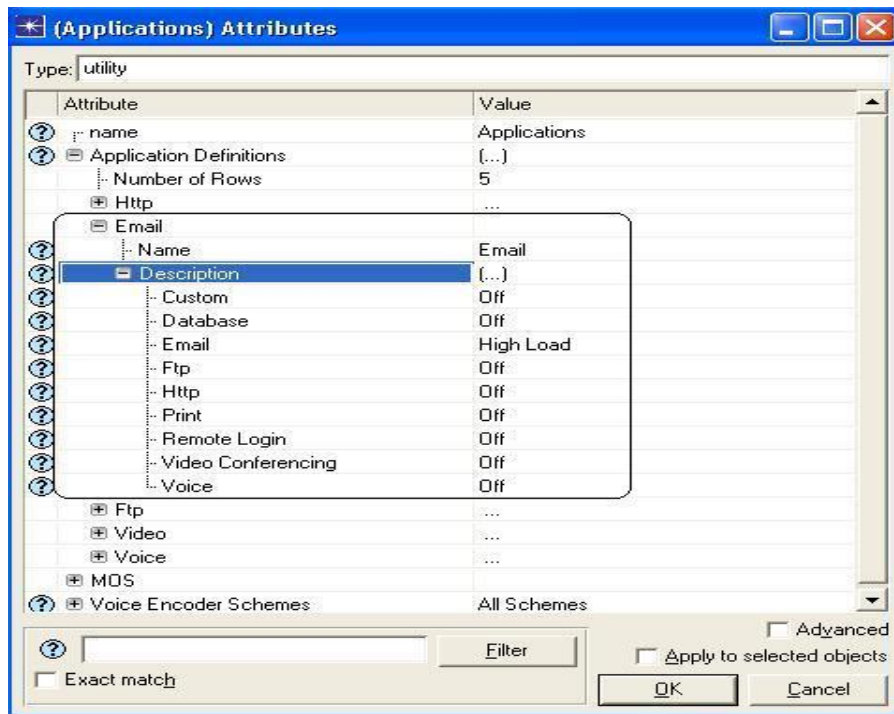
Εικόνα 13: Εφαρμογή FTP

Η εφαρμογή FTP χρησιμοποιείτε στον εξυπηρετητή FTP και παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να ανεβάζουν και να κατεβάζουν αρχεία μέσω της χρήσης του πρωτοκόλλου FTP. Η εφαρμογή έχει ρυθμιστεί ώστε να παράγει μεγάλο φόρτο στο δίκτυο και τα χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται παρακάτω.

Attribute	Value
Command Mix (Get/Total)	50%
Inter-Request Time (seconds)	exponential (360)
File Size (bytes)	constant (50000)
Symbolic Server Name	FTP Server
Type of Service	Best Effort (0)
RSVP Parameters	None
Back-End Custom Application	Not Used

Εικόνα 14: Ρυθμίσεις εφαρμογής FTP

Σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα οι εντολές get του πρωτοκόλλου FTP είναι στο 50% επί των συνολικών εντολών, επίσης το αρχείο που κατεβάζουν οι χρήστες έχει μέγεθος 50000 bytes, ο χρόνος που μπορεί να διαρκέσει μία μετάδοση αρχείου πριν ξεκινήσει μία άλλη είναι 6 λεπτά και τέλος η εφαρμογή έχει ρυθμιστεί να χρησιμοποιεί Best effort.



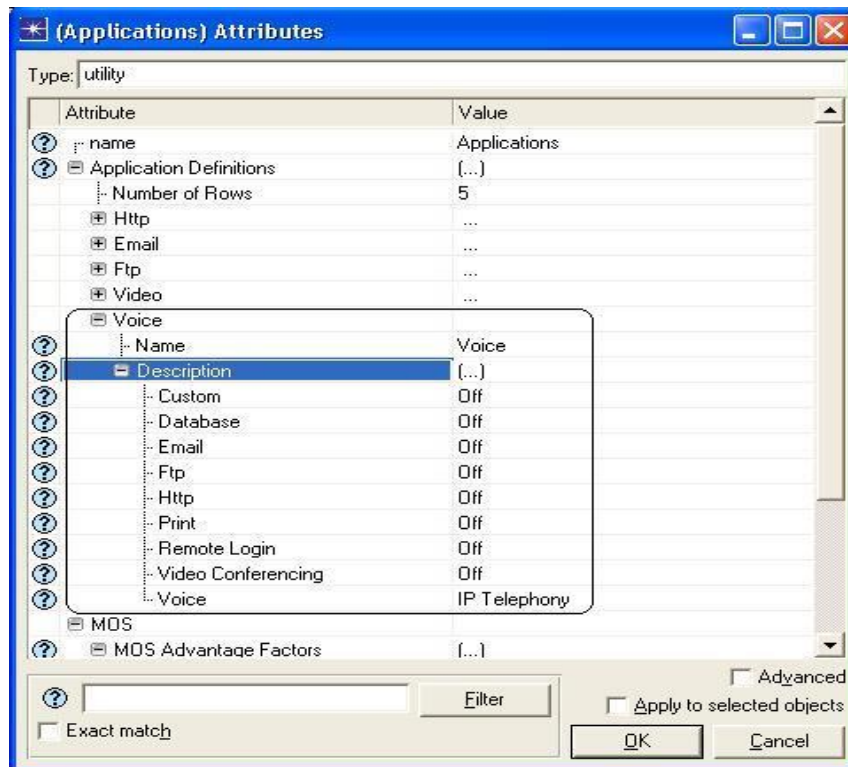
Εικόνα 15: Εφαρμογή email

Η εφαρμογή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου χρησιμοποιείτε από τον εξυπηρετητή email και παρέχει τη δυνατότητα ανταλλαγής μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Και αυτή η εφαρμογή έχει ρυθμιστεί ώστε να παράγει μεγάλο φόρτο και παρουσιάζεται αναλυτικά παρακάτω.

Attribute	Value
Send Interarrival Time (seconds)	exponential (360)
Send Group Size	constant (3)
Receive Interarrival Time (seconds)	exponential (360)
Receive Group Size	constant (3)
E-Mail Size (bytes)	constant (2000)
Symbolic Server Name	Email Server
Type of Service	Best Effort (0)
RSVP Parameters	None
Back-End Custom Application	Not Used

Εικόνα 16: Ρυθμίσεις εφαρμογής Email

Σύμφωνα με την εικόνα 16 κάθε email έχει ρυθμιστεί αρχικά να στέλνεται η να λαμβάνεται ανά 6 λεπτά, κάθε email έχει μέγεθος 2000 bytes ενώ μπορούν να σταλούν και να ληφθούν 3 email που βρίσκονται στην ουρά κάθε φορά και τέλος η εφαρμογή κάνει χρήση best effort.



Εικόνα 17: Εφαρμογή VoIP

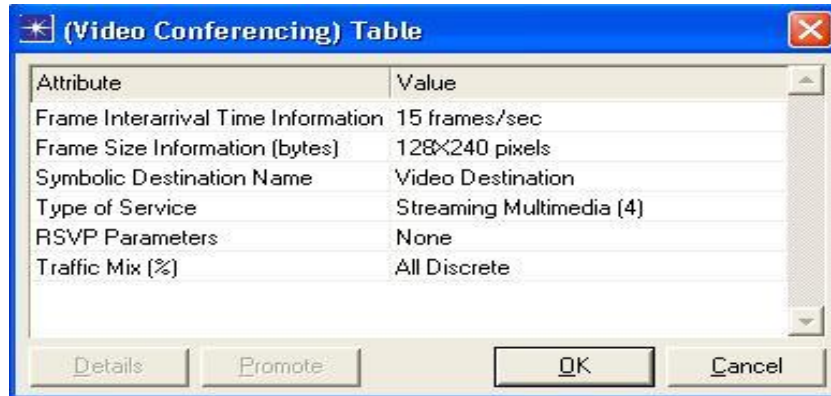
Η εφαρμογή φωνής έχει ρυθμιστεί να χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Voice over IP το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα πραγματοποίησης τηλεφωνικών κλήσεων μέσω του πρωτοκόλλου IP. Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιείται μέσω του voice εξυπηρετητή ο οποίος λειτουργεί ως ένας κόμβος επικοινωνίας μεταξύ δύο χρηστών. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής.

Attribute	Value
Silence Length (seconds)	default
Talk Spurt Length (seconds)	default
Symbolic Destination Name	Voice Destination
Encoder Scheme	G.729 A
Voice Frames per Packet	1
Type of Service	Interactive Voice (6)
RSVP Parameters	None
Traffic Mix (%)	All Discrete
Signaling	None
Compression Delay (seconds)	0.02
Decompression Delay (seconds)	0.02
Conversation Environment	(...)

Εικόνα 18: Ρυθμίσεις εφαρμογής VoIP

Η εφαρμογή φωνής όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα χρησιμοποιεί τον σχήμα κωδικοποίησης G.729A, ενώ κάθε πακέτο δεδομένων που μεταδίδεται

περιέχει ένα frame φωνής. Η καθυστέρηση συμπίεσης και αποσυμπίεσης έχει ρυθμιστεί στα 0,02 δευτερόλεπτα και τέλος η εφαρμογή έχει ως τύπο υπηρεσίας interactive voice ώστε να μπορεί να μεταδοθεί αργότερα αν χρειαστεί με τη χρήση κατάλληλου Quality of Service για τη μετάδοση δεδομένων φωνής.

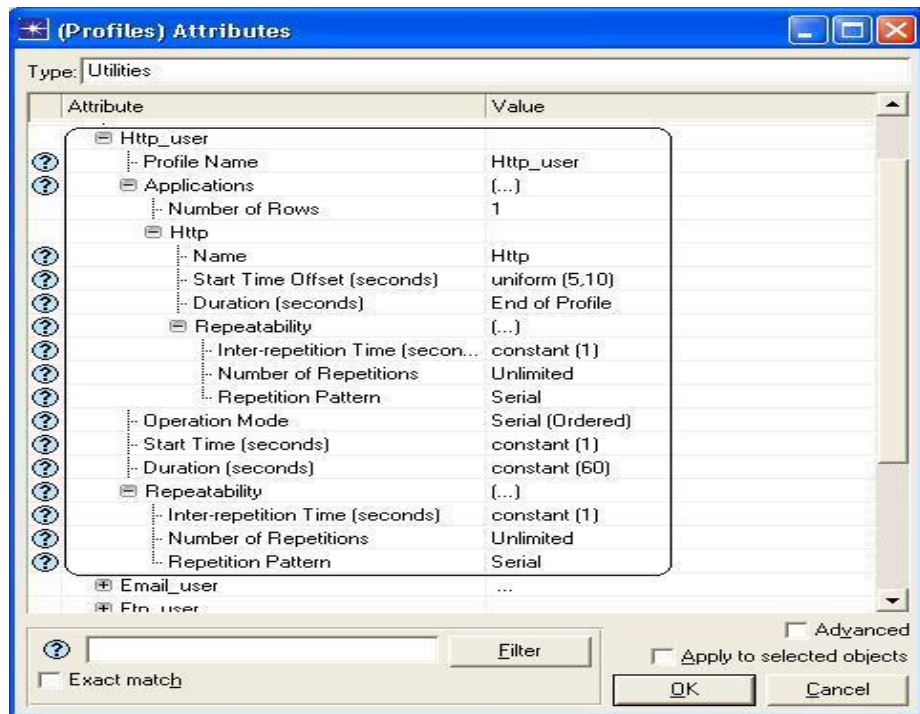


Εικόνα 19: Ρυθμίσεις εφαρμογής Video

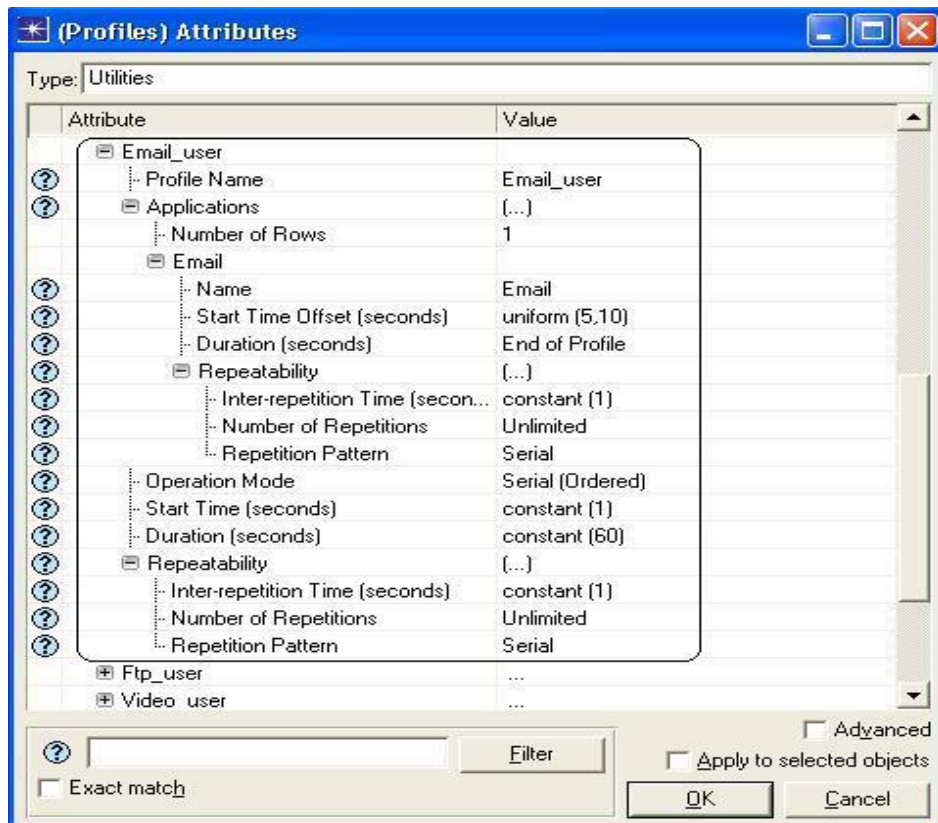
Την εφαρμογή βίντεο τη χρησιμοποιεί ο εξυπηρετητής video και παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες του δικτύου να δουν βίντεο τα οποία είναι αποθηκευμένα στον εξυπηρετητή. Τα χαρακτηριστικά του βίντεο όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα είναι η μετάδοση 15 frame ανά δευτερόλεπτο με μέγεθος 128X240 pixel για το κάθε ένα από αυτά και τέλος η εφαρμογή έχει ως τύπο υπηρεσίας streaming multimedia ώστε να μπορέσει αργότερα να μεταδοθεί αν χρειαστεί με τη χρήση κατάλληλου τύπου Quality of Service.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως οι ρυθμίσεις των εφαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν έμειναν οι ίδιες ώστε να μπορούν να βγουν ποιο ασφαλή και ενδεικτικά συμπεράσματα για την απόδοση του δικτύου μετά από κάποια αλλαγή στις ρυθμίσεις του ίδιου του δικτύου.

Κάθε μία από τις παραπάνω εφαρμογές “τρέχει” για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μετά την έναρξη της προσομοίωσης και επαναλαμβάνεται η εκτέλεση της εφαρμογής όσες φορές χρειαστεί ανάλογα με το χρόνο που θα διαρκέσει η προσομοίωση. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις εκτέλεσης όλων των εφαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο προσομοίωσης.

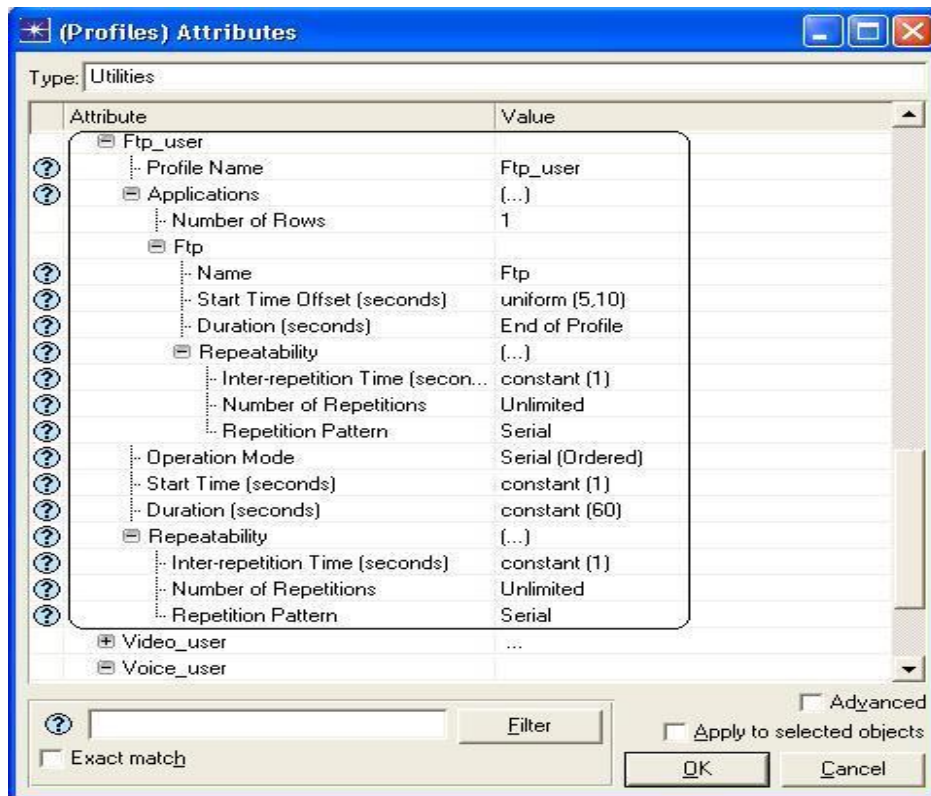


Εικόνα 20: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης HTTP

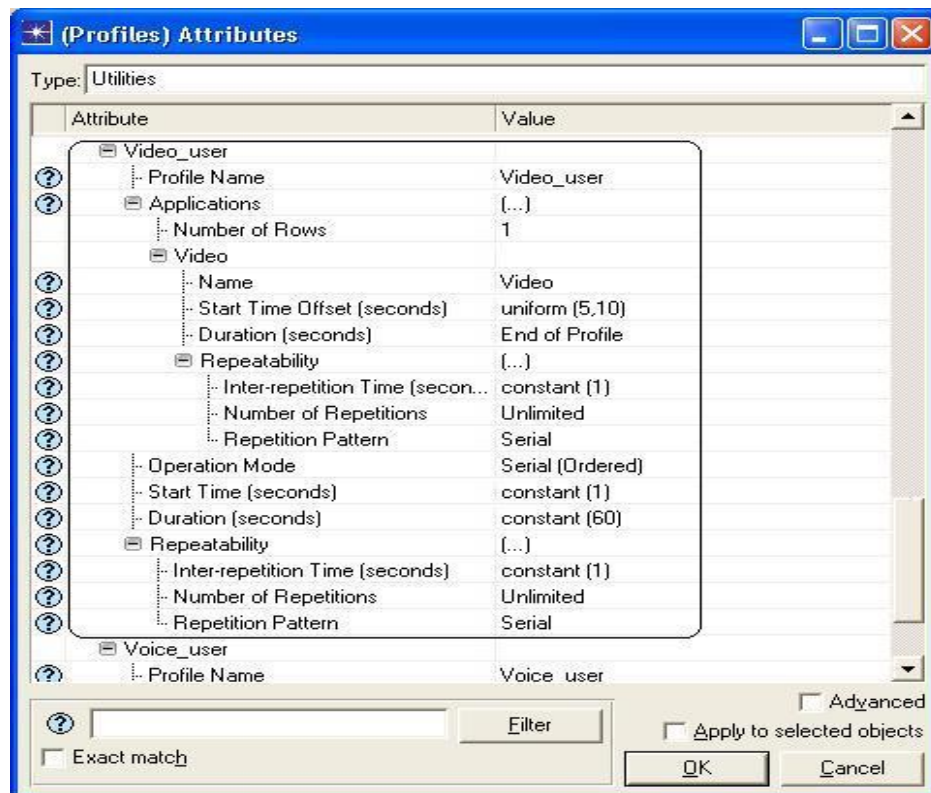


Εικόνα 21: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης Email

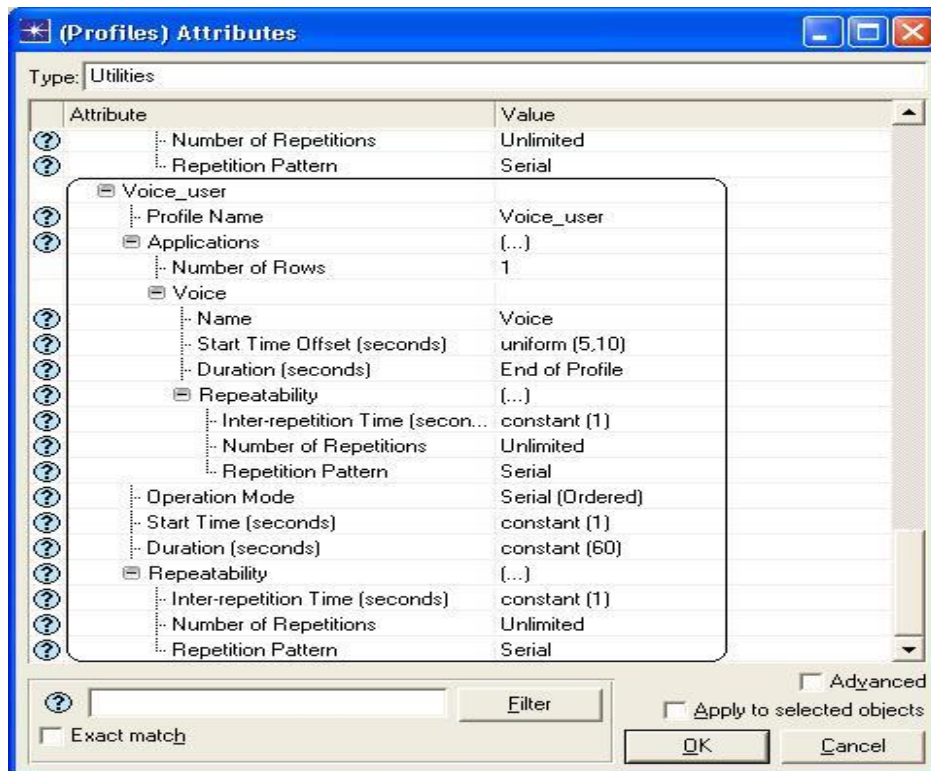




Εικόνα 22: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης FTP



Εικόνα 23: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης Video

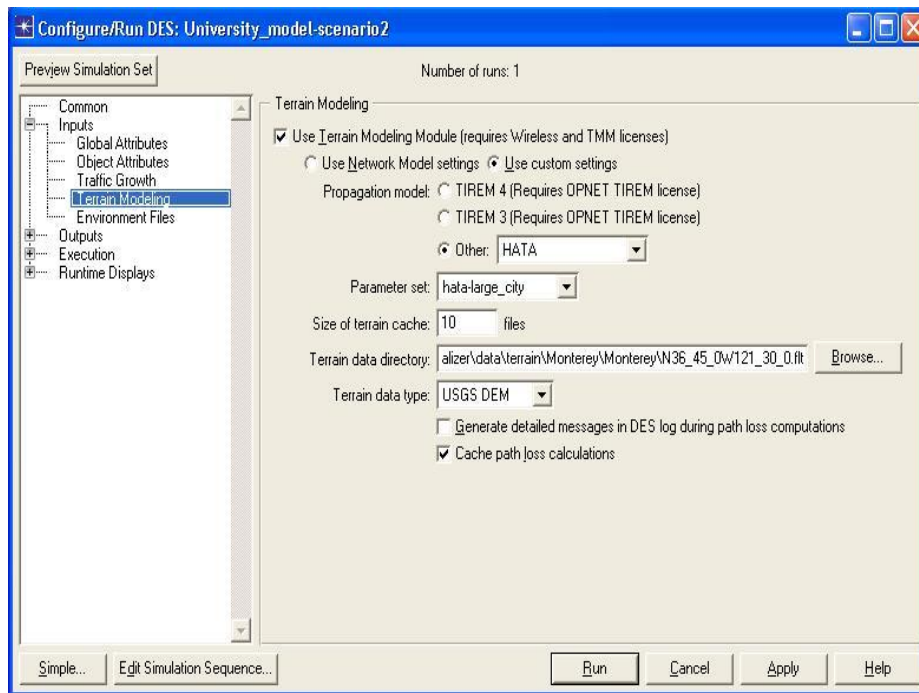


Εικόνα 24: Ρυθμίσεις προφίλ χρήσης VoIP

Απ' ότι φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες στις οποίες παρουσιάζονται οι ρυθμίσεις για την κάθε εφαρμογή που χρησιμοποιείται στο δίκτυο, όλες οι εφαρμογές έχουν τις ίδιες ρυθμίσεις εκτέλεσης. Οι ρυθμίσεις αυτές χρησιμοποιούνται κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης για κάθε εφαρμογή ξεχωριστά. Κάθε εφαρμογή ξεκινάει μεταξύ πέντε και δέκα δευτερολέπτων μετά την έναρξη της προσομοίωσης ενώ η διάρκεια του κάθε κύκλου εκτέλεσης της εφαρμογής μπορεί να διαρκέσει μέχρι εξήντα δευτερόλεπτα μέγιστο. Μόλις τελειώσει η εκτέλεση ενός κύκλου της εφαρμογής αυτή επαναλαμβάνεται σειριακά μετά από ένα δευτερόλεπτο με μέγιστο χρόνο εκτέλεσης ξανά στα εξήντα δευτερόλεπτα. Τέλος, κάθε εφαρμογή μπορεί να επαναλαμβάνεται απεριόριστες φορές κατά τη διάρκεια μίας προσομοίωσης.

### 5.3.1.2 Ρυθμίσεις προσομοίωσης

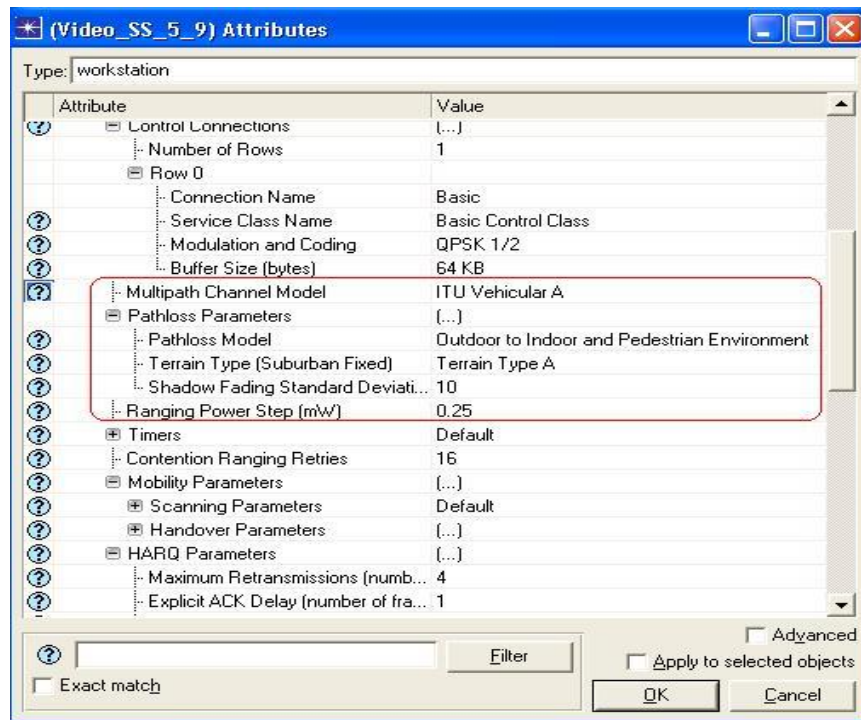
Παρακάτω παρουσιάζονται οι τελικές ρυθμίσεις που ενεργοποιήθηκαν στο Ornet πριν ξεκινήσει η εκτέλεση της προσομοίωσης του αρχικού σεναρίου.



Εικόνα 25: Ρυθμίσεις προσομοίωσης σεναρίου

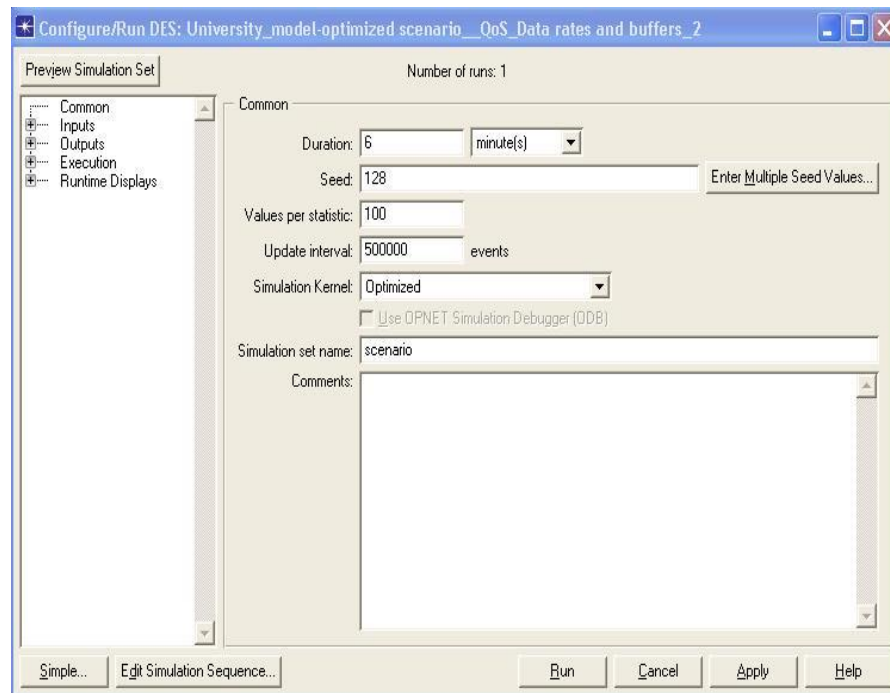
Μέσω του Ornet δίνεται η δυνατότητα να λάβουμε υπόψη τη μορφοποίηση του εδάφους στο οποίο βρίσκεται το δίκτυο όπως είναι το μέγεθος των κτιρίων και η απόσταση από τη θάλασσα. Στην περίπτωση του δικτύου που χρησιμοποιήθηκε ο χώρος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης περιλαμβάνει μεγάλα κτήρια επομένως θεωρήθηκε πως το καταλληλότερο μοντέλο είναι αυτό της μεγάλης πόλης (hata-large\_city).





Εικόνα 26: Indoor/outdoor σταθμός εργασίας

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα μπορούμε να ρυθίσουμε και το αν ένας σταθμός εργασίας θα βρίσκεται εντός ή εκτός κάποιου κτιρίου. Αλλά μετά από προσομοιώσεις που έγιναν με χρήση της συγκεκριμένης ρύθμισης για το δίκτυο δεν παρουσιάστηκε κάποια διαφορά στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταξύ των σταθμών που βρίσκονται μέσα σε ένα κτίριο ή αυτών που βρίσκονται εκτός αυτό συμβαίνει επειδή οι σταθμοί βάσης βρίσκονται σε απόσταση που επιτρέπει σε όλους τους σταθμούς ανεξάρτητα από τη θέση τους μέσα στο δίκτυο να λαμβάνουν και να στέλνουν με τη βέλτιστη ταχύτητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς παρεμβολές.

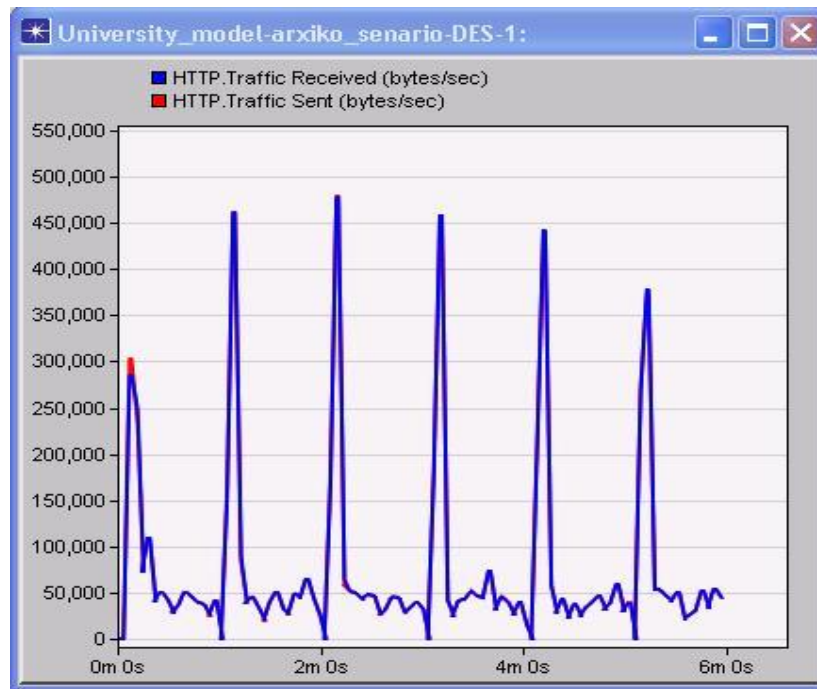


Εικόνα 27: Χρόνος εκτέλεσης προσομοίωσης

Τέλος, η προσομοίωση διαρκεί 6 λεπτά ενώ ο πυρήνας της προσομοίωσης έχει ρυθμιστεί στη βέλτιστη λειτουργία (optimized).

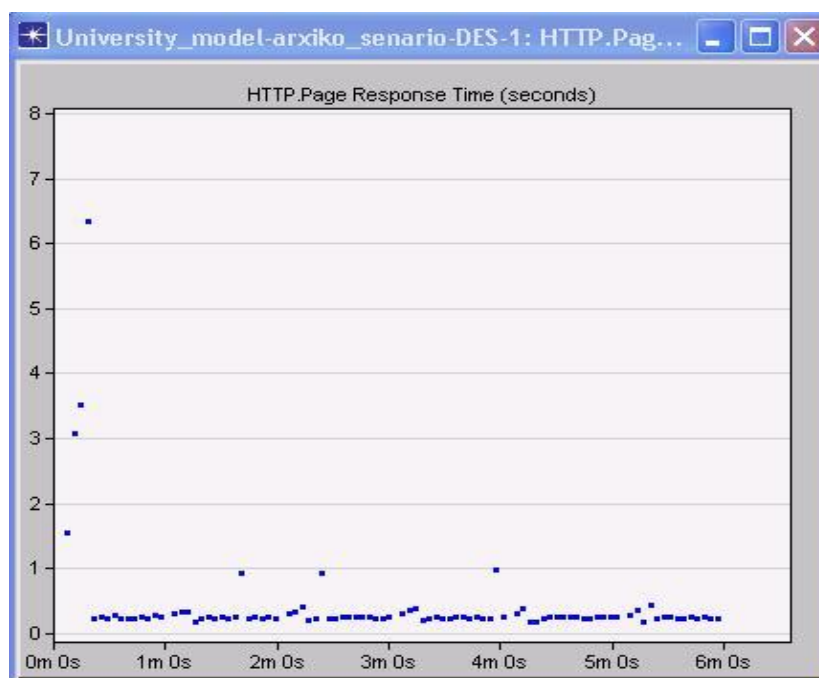
### 5.3.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μετά το τέλος της εκτέλεσης της προσομοίωσης παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα του αρχικού σεναρίου του δικτύου που δημιουργήθηκε. Στην αρχή των διαγραμμάτων παρατηρείται μία ανωμαλία στην απόδοση του δικτύου αυτό κυρίως οφείλεται στο ότι το δίκτυο δεν έχει σταθεροποιηθεί ακόμα δηλαδή δεν έχουν δημιουργηθεί ακόμα όλοι οι πίνακες δρομολόγησης.



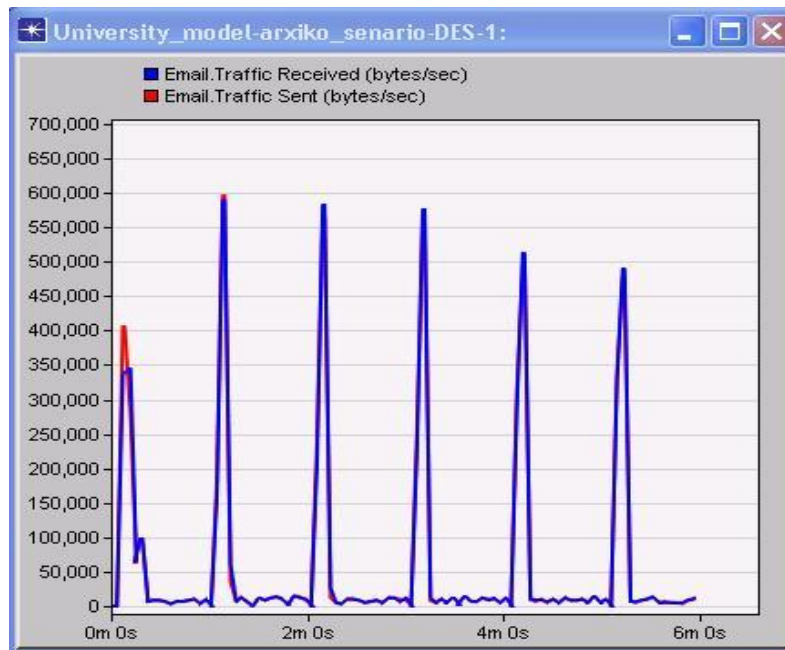
Εικόνα 28: Εφαρμογή HTTP: Traffic received/sent

Το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας παρουσιάζει για την εφαρμογή HTTP του αρχικού σεναρίου που χρησιμοποιήθηκε το ποσοστό των δεδομένων που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν αρχικά. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτές οι τιμές ταυτίζονται απόλυτα μεταξύ τους άρα η απώλεια σε δεδομένα είναι μηδενική για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.



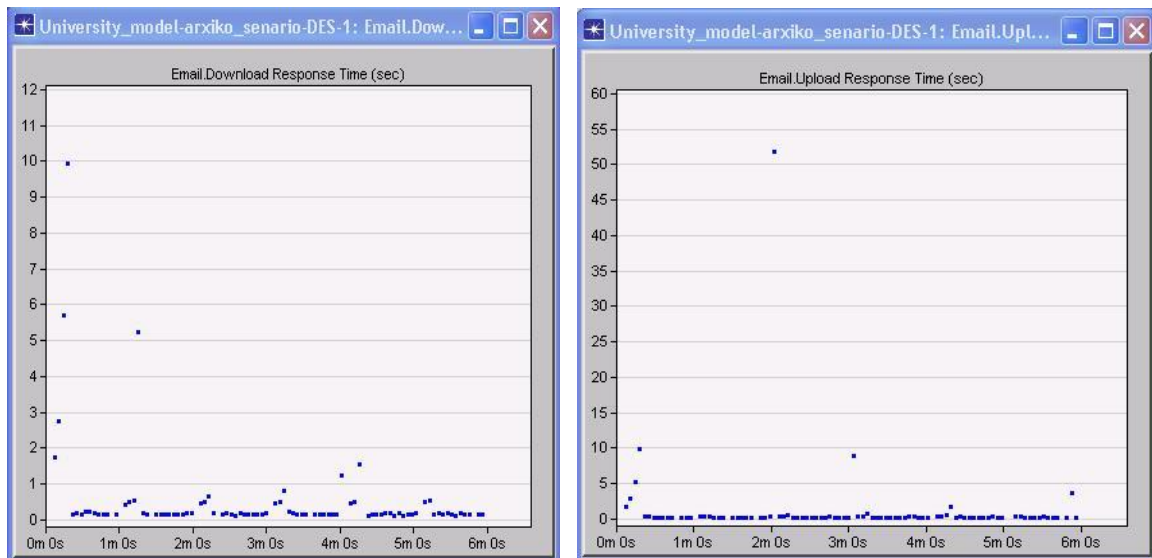
Εικόνα 29: Εφαρμογή HTTP: Χρόνος απόκρισης σελίδας

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 29) παρουσιάζεται η διάρκεια σε δευτερόλεπτα που μεσολαβεί μέχρι να απαντήσει ο εξυπηρετητής σε ένα HTTP request. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμά ο χρόνος αυτός κυμαίνεται περίπου από 0,2 δευτερόλεπτα έως 1 δευτερόλεπτο χρόνος ο οποίος είναι πολύ ικανοποιητικώς για την εφαρμογή HTTP.



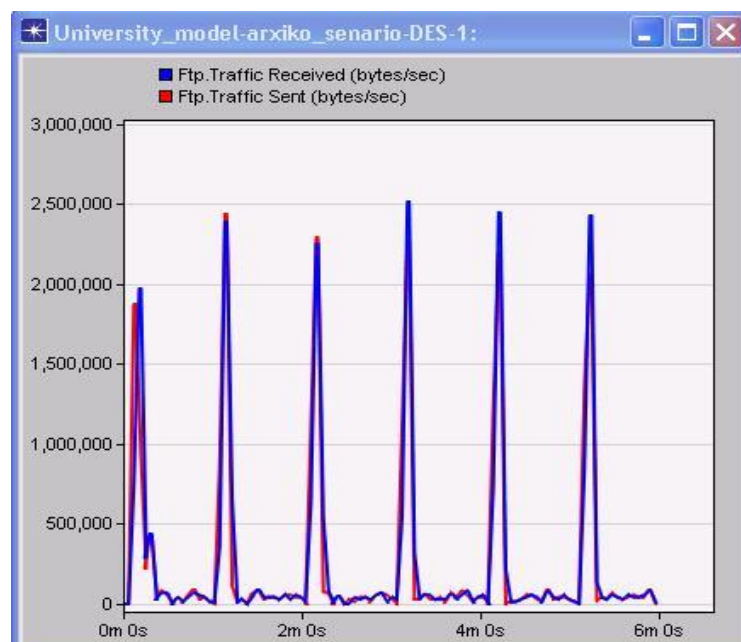
Εικόνα 30: Εφαρμογή Email: Traffic received/sent

Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το ποσοστό των δεδομένων που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν αρχικά για την εφαρμογή του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Και εδώ οι τιμές ταυτίζονται απόλυτα άρα η απώλεια των δεδομένων είναι μηδενική.



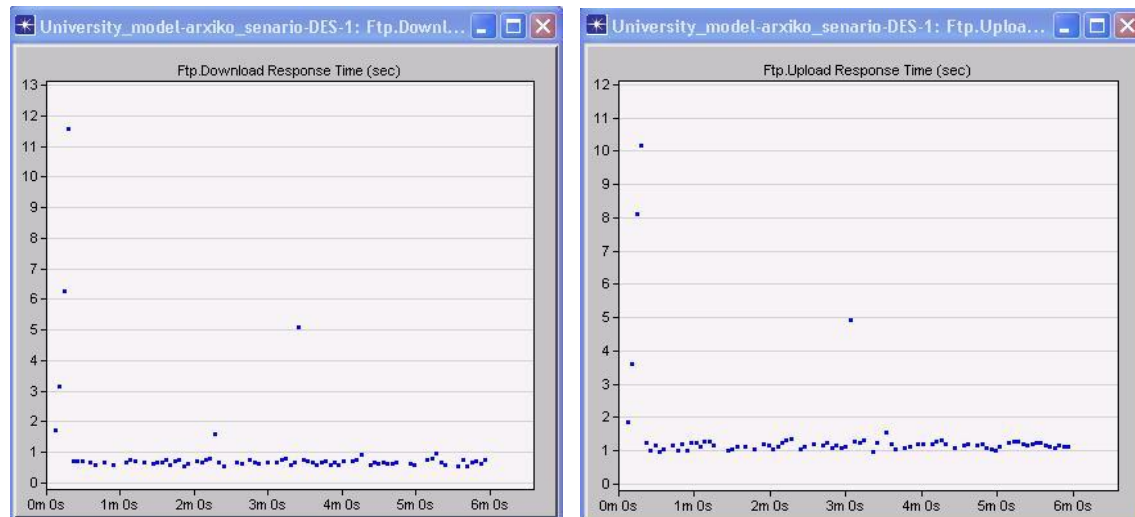
Εικόνα 31: Εφαρμογή Email: Χρόνος απόκρισης Download/Upload

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα (εικόνα 31) φαίνεται η διάρκεια σε δευτερόλεπτα που χρειάζεται μέχρι να απαντήσει ο εξυπηρετητής σε ένα αίτημα για αποστολή ή για λήψη μηνυμάτων ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Ο χρόνος αυτός και στις δύο περιπτώσεις είναι πολύ μικρός δηλαδή μικρότερος του 1 δευτερολέπτου και απόλυτα αποδεκτός όσο αναφορά την εφαρμογή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου.



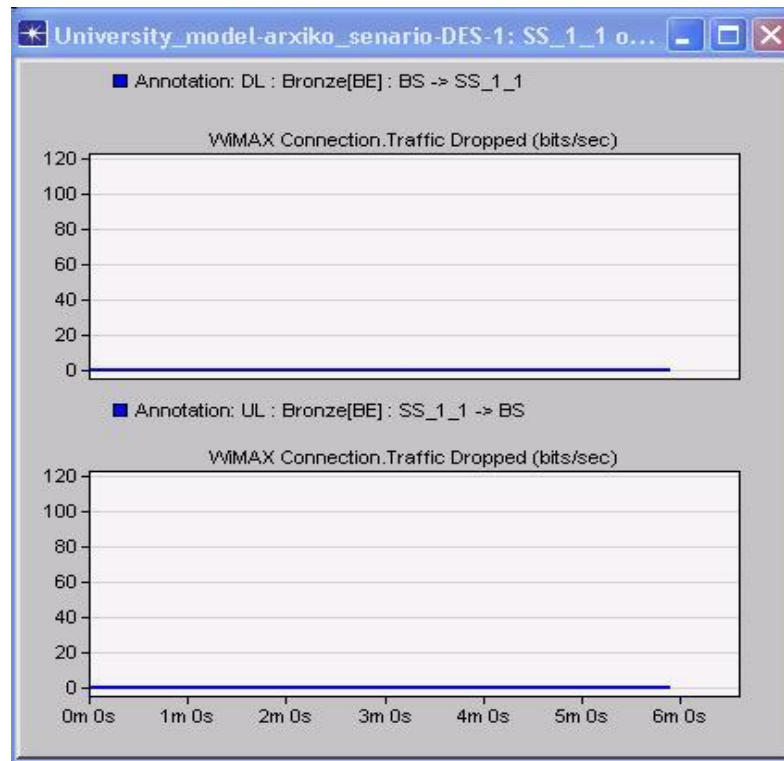
Εικόνα 32: Εφαρμογή FTP: Traffic received/sent

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 32) φαίνεται για την εφαρμογή FTP το συνολικό μέγεθος των δεδομένων που μεταδόθηκαν σε σχέση με τα δεδομένα που ελήφθησαν. Και εδώ η απώλεια σε δεδομένα είναι μηδενική.



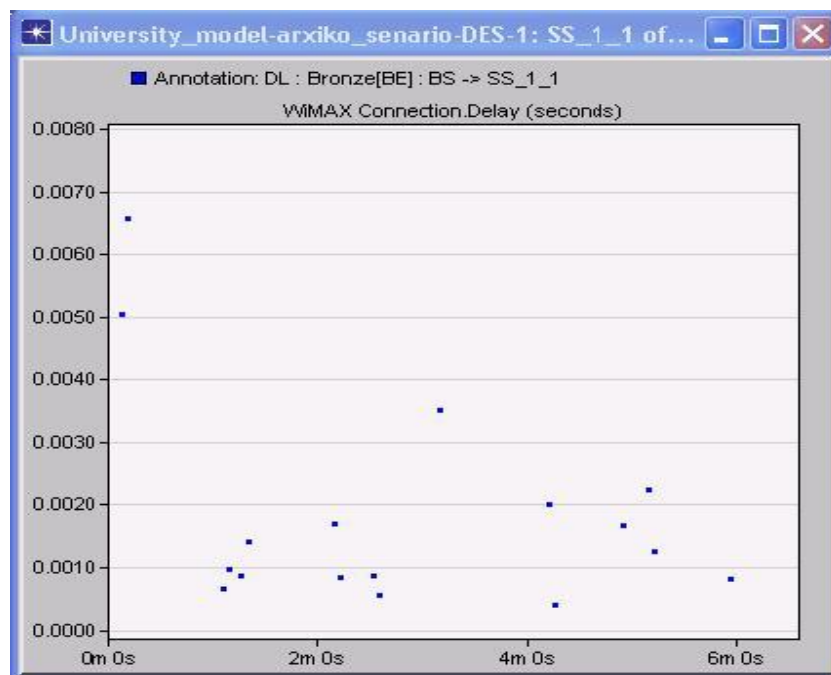
Εικόνα 33: Εφαρμογή FTP: Χρόνος απόκρισης Download/Upload

Τα δύο διαγράμματα δείχνουν το χρόνο απόκρισης για τη εφαρμογή FTP είτε αυτό αφορά τη λήψη είτε την αποστολή δεδομένων. Σε αντίθεση με τις εφαρμογές HTTP και ηλεκτρονικού ταχυδρομείου οι καθυστερήσεις εδώ είναι λίγο μεγαλύτερες δηλαδή κυμαίνονται λίγο πάνω ή λίγο κάτω από το ένα δευτερόλεπτο αλλά και εδώ το ποσοστό είναι ικανοποιητικό για την εφαρμογή αυτή. Η μεγαλύτερη καθυστέρηση σε σχέση με τις δύο προηγούμενες εφαρμογές οφείλεται στον μεγαλύτερο όγκο δεδομένων που είναι σχεδόν πενταπλάσιος από τον όγκο δεδομένων των εφαρμογών HTTP και email. Παρακάτω φαίνεται και ένα ενδεικτικό διάγραμμα από ένα σταθμό που επιλέχθηκε τυχαία από το δίκτυο και δείχνει το ποσοστό απόρριψης πακέτων από το συγκεκριμένο σταθμό.



Εικόνα 34: Απόρριψη κίνησης σταθμού SS\_1\_1

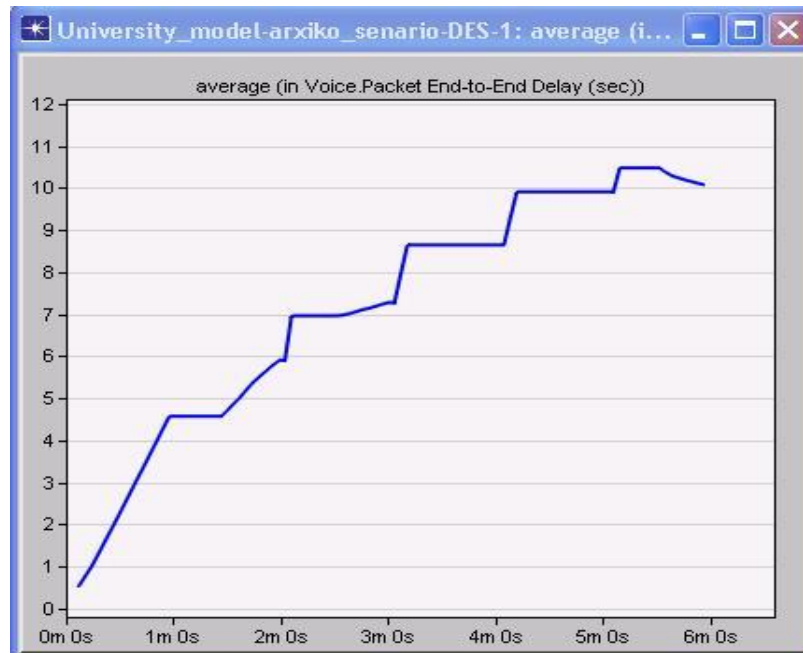
Όπως φαίνεται από το διάγραμμα το ποσοστό απόρριψης των πακέτων είναι μηδενικό και για την αποστολή και για τη λήψη δεδομένων. Ο σταθμός SS\_1\_1 χρησιμοποιεί τις εφαρμογές HTTP, e-mail και FTP.



Εικόνα 35: Καθυστέρηση σταθμού SS\_1\_1



Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 35) παρουσιάζεται η καθυστέρηση μεταξύ του σταθμού βάσης και του σταθμού SS\_1\_1. Φυσικά η καθυστέρηση είναι πολύ μικρή και κυμαίνεται μεταξύ 0,0001 και 0.0040 περίπου δευτερόλεπτα.



Εικόνα 36: Εφαρμογή VoIP: Μέσος όρος από άκρο σε άκρο καθυστέρησης

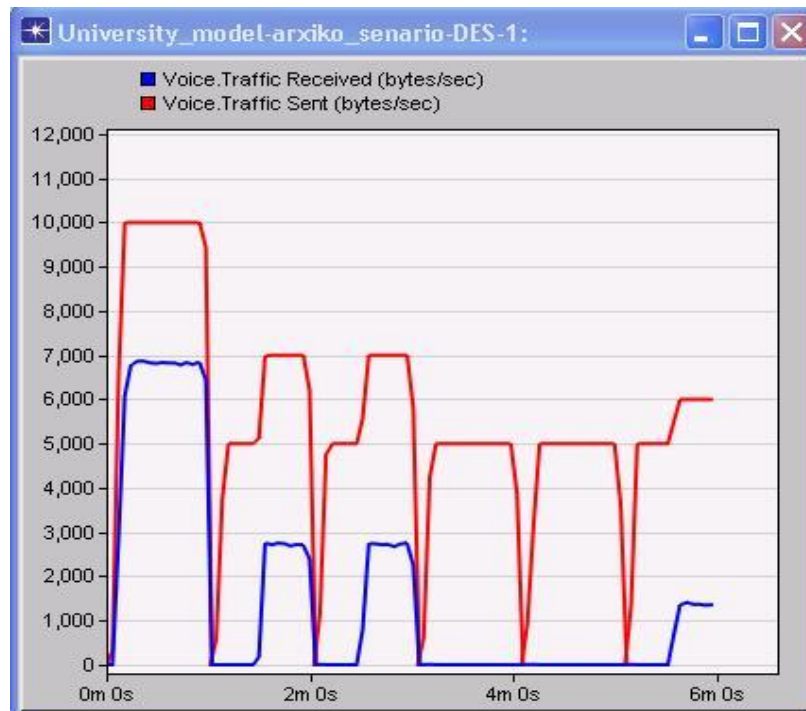
Αυτό το διάγραμμα παρουσιάζει για την εφαρμογή voice τον μέσο όρο της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο του δικτύου όσο αναφορά την εφαρμογή της φωνής δηλαδή την καθυστέρηση που χρειάζεται για την μετάδοση ενός πακέτου από το ένα άκρο του δικτύου στο άλλο. Η καμπύλη είναι συνεχώς ανοδική και οι καθυστερήσεις φτάνουν ακόμα και πάνω από τα δέκα δευτερόλεπτα πράγμα σε καμία περίπτωση αποδεκτό.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα αποδεκτά όρια για τη μετάδοση δεδομένων φωνής είναι:

- Ρυθμός μετάδοσης:
  - 4 – 384 Kbps τουλάχιστον
- Καθυστέρηση:
  - Μικρότερη των 150 ms
- Jitter:

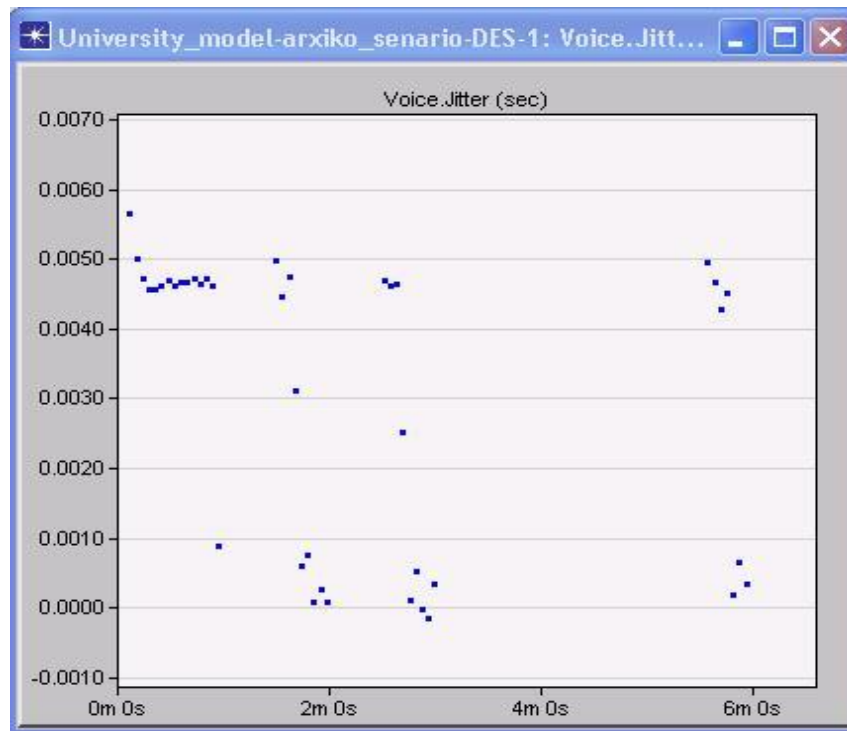


- Μικρότερο 50 ms
- Απώλεια πακέτων:
  - Μικρότερη του 1%



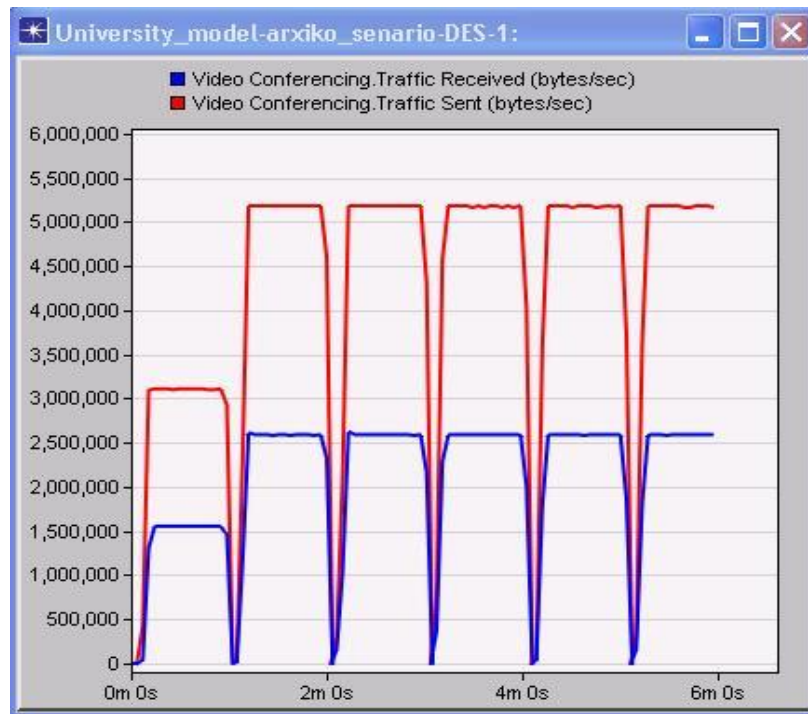
Εικόνα 37: Εφαρμογή VoIP: Traffic received/sent

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται για την εφαρμογή φωνής το σύνολο των δεδομένων που μεταδόθηκαν σε σχέση με αυτά που ελήφθησαν τελικά σωστά. Από ότι βλέπουμε τα ποσοστά είναι πολύ χαμηλά και όσο περνάει ο χρόνος τα ποσοστά γίνονται όλο και μικρότερα. Αυτή η απώλεια οφείλεται στις μεγάλες καθυστερήσεις που παρουσιάζονται στο δίκτυο κατά τη μετάδοση πακέτων φωνής όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της προηγούμενης σελίδας.



**Εικόνα 38: Jitter εφαρμογής VoIP**

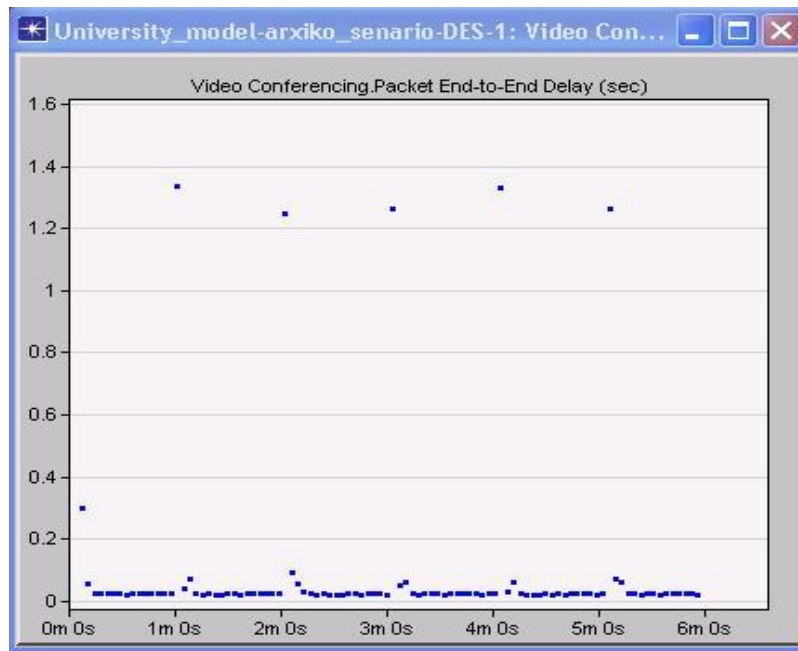
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει το jitter όσο αφορά την μετάδοση φωνής στο δίκτυο. Ως jitter θεωρείται η διακύμανση στην καθυστέρηση μετάδοσης των πακέτων δηλαδή αν δύο πακέτα μεταδοθούν τη χρονική στιγμή A και B αντίστοιχα και φτάσουν στο παραλήπτη τη χρονική στιγμή Γ και Δ αντίστοιχα τότε ως jitter θεωρείται το:  $(\Delta - \Gamma) - (A - B)$ . Για το αρχικό σενάριο το jitter κυμαίνεται μεταξύ 0 και 0,0060 δευτερολέπτων.



Εικόνα 39: Εφαρμογή Video: Traffic received/sent

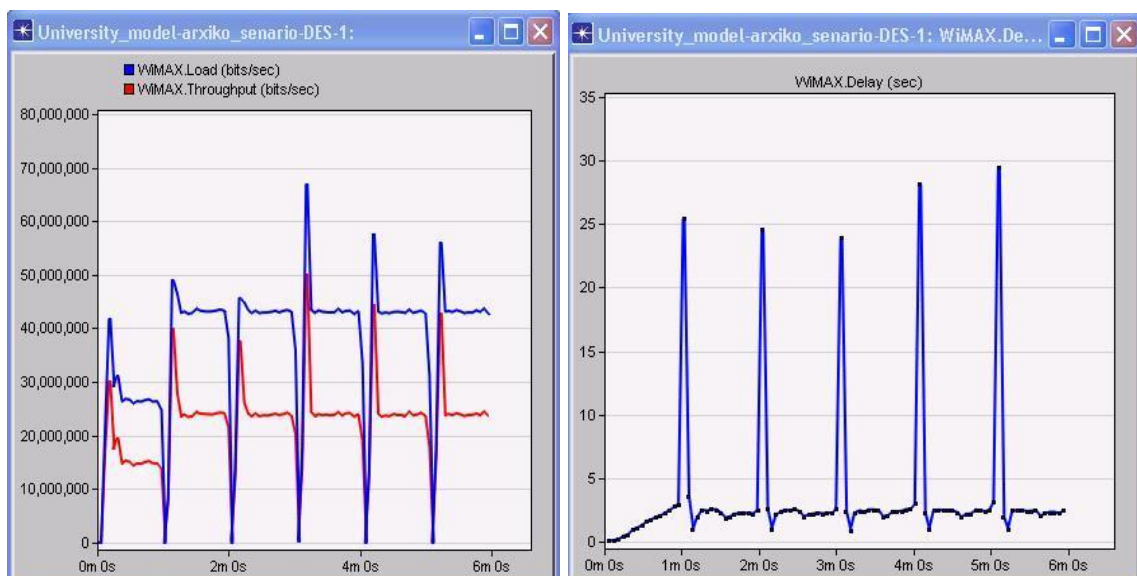
Η παραπάνω εικόνα δείχνει για την εφαρμογή του video το συνολικό αριθμό των δεδομένων που μεταδόθηκαν σε σχέση με αυτά που ελήφθησαν σωστά από το δέκτη τελικά. Το ποσοστό είναι περίπου στο 50% δηλαδή τα μισά πακέτα δεν έφτασαν ποτέ στο προορισμό τους. Το ποσοστό αυτό δεν είναι αποδεκτό για την μετάδοση βίντεο επίσης εδώ πρέπει να επισημανθεί ότι οι ελάχιστες απαιτήσεις για την μετάδοση βίντεο είναι:

- Απώλεια πακέτων
  - Μέσος όρος: μικρότερη από  $10^{-3}$
  - Ιδανικό: μικρότερη από  $10^{-5}$
- Καθυστέρηση
  - Μέσος όρος: μικρότερη από 300 ms
  - Ιδανικό: μικρότερη από 10 ms
- Jitter
  - Μέσος όρος: μικρότερο από 60 ms
  - Ιδανικό: μικρότερο από 20 ms
- Ελάχιστο throughput
  - 10 Kbps – 5 Mbps



**Εικόνα 40: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση**

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η καθυστέρηση μετάδοσης από άκρο σε άκρο όσο αναφορά την μετάδοση βίντεο. Απ' ότι δείχνει το διάγραμμα η καθυστερήσεις κυμαίνονται μεταξύ 0,050 και 0,1 δευτερόλεπτα αλλά σε κάποια σημεία της μετάδοσης φτάνουν ακόμα και τα 1,4 δευτερόλεπτα περίπου πράγμα μη αποδεκτό σύμφωνα με τις προϋποθέσεις που προαναφέρθηκαν για την μετάδοση βίντεο.



**Εικόνα 41: Υποδίκτυο WiMAX: Load/throughput και καθυστέρηση**

Τα δύο παραπάνω διαγράμματα (εικόνα 41) παρουσιάζουν κάποια γενικά στοιχεία για το δίκτυο WiMAX. Στο ένα φαίνεται ο συνολικός φόρτος του δικτύου σε σχέση με το throughput του δικτύου όσο αναφορά το WiMAX και απ' ότι φαίνεται το ποσοστό των πακέτων που μεταδόθηκαν με επιτυχία κυμαίνεται περίπου στο 60%. Το ποσοστό αυτό δεν είναι καθόλου καλό και περισσότερο οφείλεται στις μεταδόσεις φωνής και βίντεο οι οποίες έχουν και τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πόρους του δικτύου. Ενώ στο δεύτερο παρουσιάζεται η καθυστέρηση για το δίκτυο WiMAX η οποία καθυστέρηση έχει μεγάλες αποκλίσεις που ξεκινάνε από ποσοστά μικρότερα του 0,1 δευτερόλεπτα και φτάνουν στο μέγιστο περίπου στα 30 δευτερόλεπτα.

### **5.3.3 Συμπεράσματα προσομοίωσης αρχικού σεναρίου**

Το δίκτυο που δημιουργήθηκε αφορά την μετάδοση πέντε διαφορετικών τύπων δεδομένων τα οποία είναι φωνή, βίντεο, HTTP, e-mail και FTP. Το δίκτυο χωρίζεται σε 5 υποδίκτυα WiMAX όπου το καθένα διαθέτει 50 σταθμούς εργασίας και ένα σταθμό βάσης όπου από αυτούς οι 48 χρησιμοποιούν τις εφαρμογές HTTP, e-mail και FTP ενώ υπάρχει και από ένας σταθμός που κάνει χρήση της εφαρμογής φωνής και ένας που κάνει χρήση της εφαρμογής βίντεο. Το δίκτυο αρχικά προσομοιώθηκε χωρίς να γίνουν κάποιες αλλαγές στις ρυθμίσεις του όσο αναφορά την απόδοση αυτού δηλαδή περισσότερο χρησιμοποιήθηκαν οι προκαθορισμένες ρυθμίσεις που δίνει το Ornet.

Μετά την προσομοίωση του αρχικού σεναρίου και σύμφωνα με τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν παραπάνω το δίκτυο σε αυτή του τη μορφή μπορεί να υποστηρίξει την μετάδοση δεδομένων HTTP, e-mail και FTP αλλά δεν μπορεί να υποστηρίξει την μετάδοση βίντεο και φωνής λόγω των μεγάλων καθυστερήσεων που παρουσιάζονται κατά την μετάδοση αυτού του τύπου δεδομένων που έχουν ως αποτέλεσμα την μεγάλη απώλεια σε πακέτα δεδομένων.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μία προσπάθεια βελτίωσης των χαρακτηριστικών του δικτύου με σκοπό και την υποστήριξη εφαρμογών όπως φωνής και βίντεο αλλά και την διατήρηση της υποστήριξης και των υπόλοιπων εφαρμογών που χρησιμοποιούνται.

# Κεφάλαιο 6: Εναλλακτικά σενάρια προσομοίωσης

## 6.1 Εισαγωγή

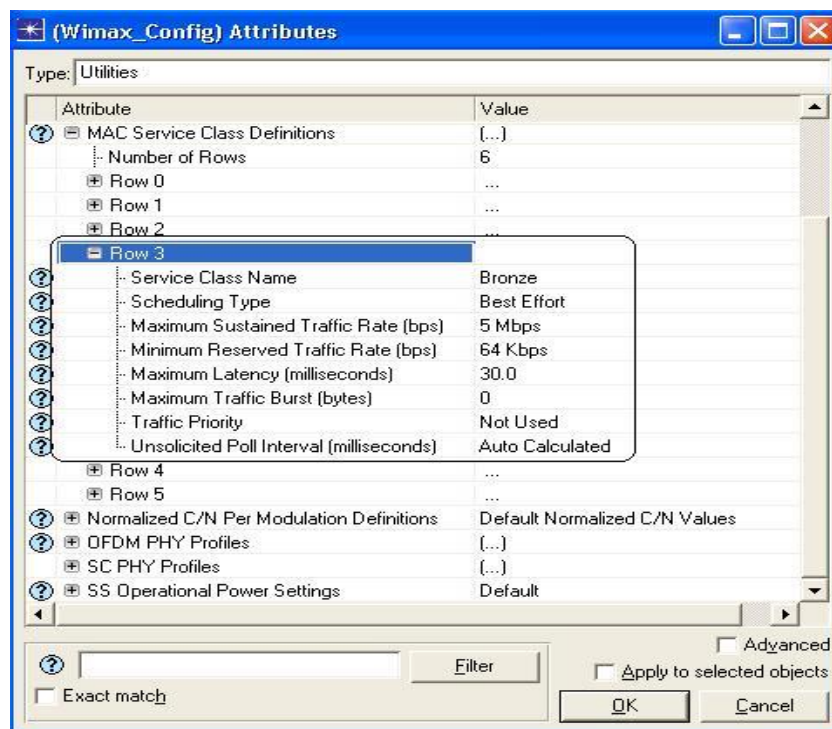
Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μία ανάλυση όσο αναφορά το αρχικό σενάριο προσομοίωσης του δικτύου που δημιουργήθηκε καθώς και μία λεπτομερή ανάλυση των ρυθμίσεων του δικτύου και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν μετά την προσομοίωση αυτού με τη βοήθεια του προσομοιωτή OPNET Modeler. Ως αποτέλεσμα αυτών των μετρήσεων ήταν φανερό πως το δίκτυο στην αρχική του μορφή έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τις εφαρμογές HTTP, email και FTP αλλά παρουσιάζει προβλήματα με τις εφαρμογές φωνής και βίντεο.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία προσπάθεια με τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων προσομοίωσης ώστε το δίκτυο να υποστηρίξει όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε αυτό. Δηλαδή ενώ η κίνηση και ο αριθμός των σταθμών παραμένει ίδιος με το αρχικό σενάριο που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε προσπάθεια μέσω αλλαγών στις ρυθμίσεις του δικτύου να επιτευχθεί η υποστήριξη όλων των εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Τέλος, έγινε μία προσπάθεια μέτρησης της χωρητικότητας του δικτύου όσο αναφορά σε σταθμούς φωνής και βίντεο.

## 6.2 2<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης: Data rates and buffer size

### 6.2.1 Αλλαγές στο δίκτυο

Στο σενάριο αυτό όπως προαναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου ο αριθμός των σταθμών και οι ρυθμίσεις των εφαρμογών που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο παρέμειναν ίδιες με το αρχικό σενάριο της προσομοίωσης. Οι αλλαγές που έγιναν αφορούν στο μέγιστο και τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να επιτευχθεί μεταξύ των σταθμών βάσης και των σταθμών εργασίας καθώς και το μέγεθος του buffer στους σταθμούς εργασίας. Πιο αναλυτικά οι αλλαγές παρουσιάζονται στις δύο επόμενες εικόνες:

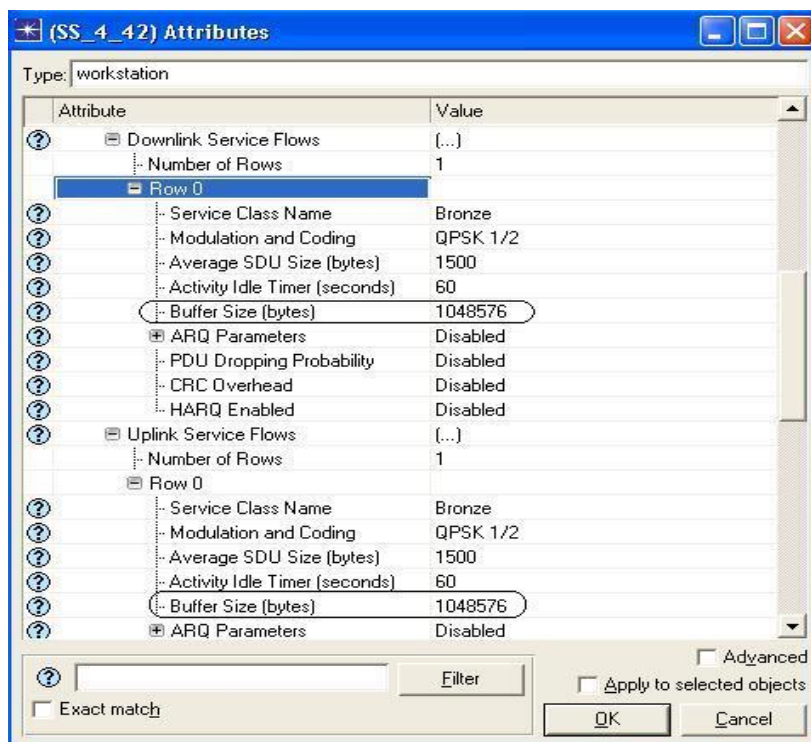


Εικόνα 42: Ρυθμίσεις κλάσης υπηρεσιών Bronze

Όπως φαίνεται από την εικόνα στη προηγούμενη σελίδα το maximum sustained traffic rate δηλαδή ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης μεταξύ ενός σταθμού εργασίας και του σταθμού βάσης έγινε 5 Mbps ενώ το minimum reserved traffic rate



δηλαδή ο ελάχιστος επιτρεπτός ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι τα 64 Kbps.

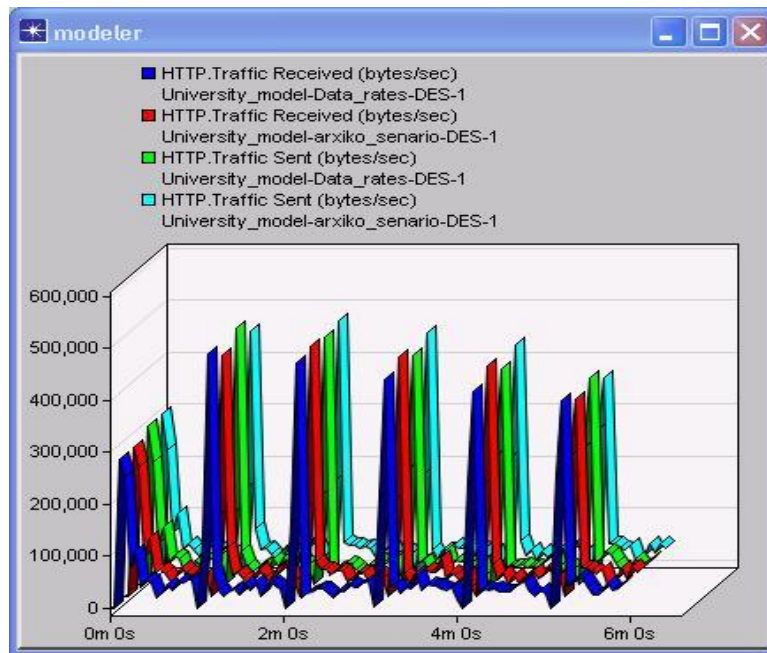


Εικόνα 43: Μέγεθος Buffer

Η δεύτερη αλλαγή που έγινε στο δίκτυο σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα είναι ότι το μέγεθος του buffer δηλαδή της προσωρινής μνήμης που μπορεί ένας σταθμός να αποθηκεύει τα πακέτα πριν τα μετάδοση ή τα παραλάβει είναι στα 1048576 bps (1024 Kbps) και για το downlink όσο και για το uplink.

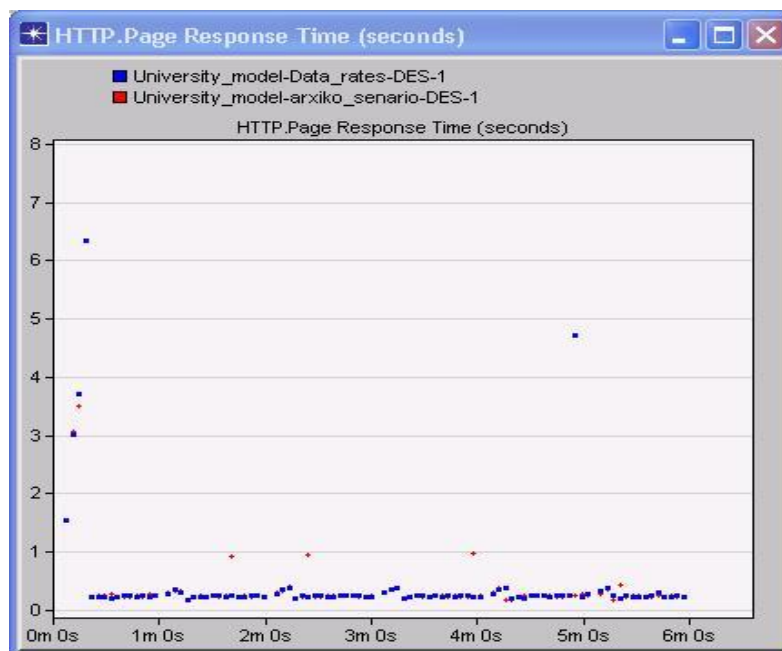
## 6.2.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 2<sup>ου</sup> σεναρίου και σύγκριση με το αρχικό σενάριο προσομοίωσης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την προσομοίωση του 2<sup>ου</sup> σεναρίου και γίνεται μία σύγκριση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το αρχικό σενάριο προσομοίωσης.



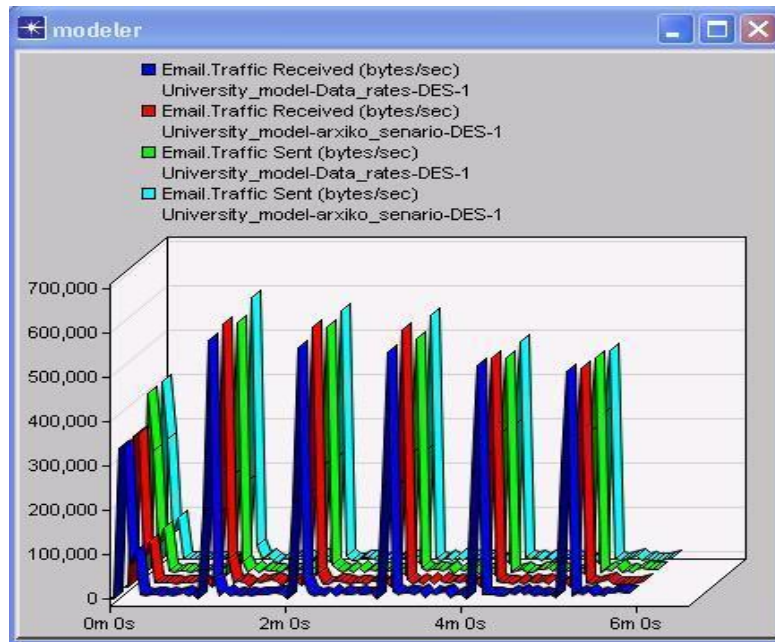
Εικόνα 44: Εφαρμογή HTTP: Traffic received/sent

Στο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας γίνεται μία σύγκριση η οποία αφορά την εφαρμογή HTTP η οποία δείχνει το ποσοστό των δεδομένων που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν αρχικά για το αρχικό σενάριο σε σχέση με τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> σεναρίου που δημιουργήθηκε. Τα αποτελέσματα και των δύο σεναρίων ταυτίζονται απόλυτα δηλαδή δεν έχουμε καθόλου απώλειες δεδομένων όσο αναφορά την εφαρμογή HTTP.



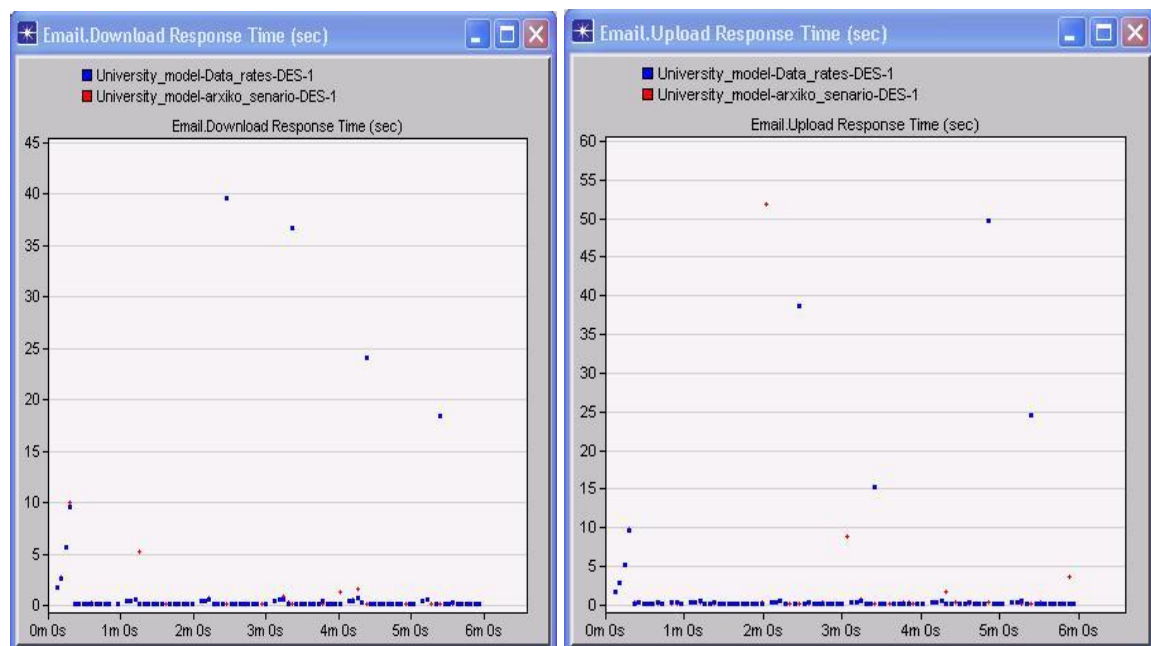
Εικόνα 45: Απόκριση σελίδας εφαρμογής HTTP

Στην εικόνα 45 συγκρίνεται ο χρόνος απόκρισης μίας σελίδας HTTP μεταξύ των δύο σεναρίων και όπως φαίνεται και εδώ υπάρχει μια ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων.



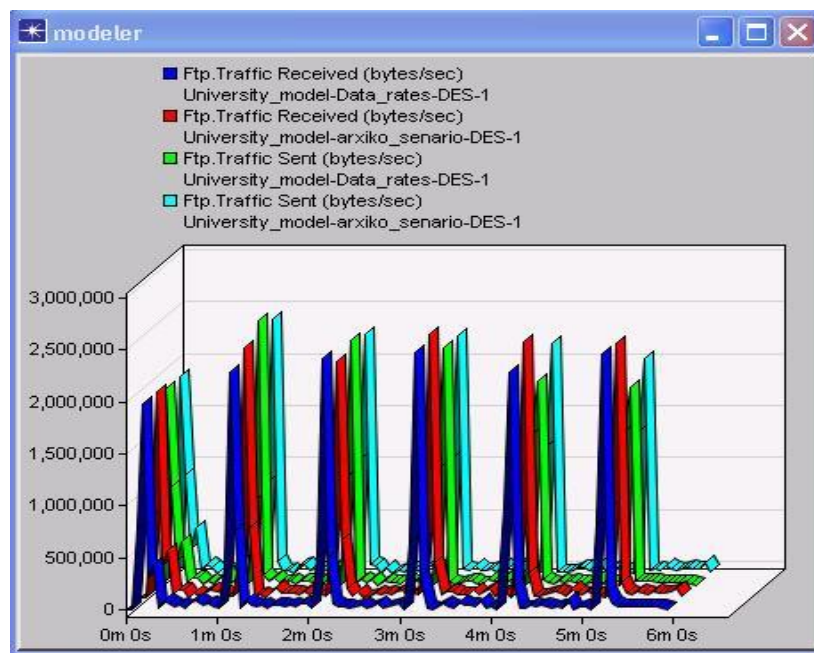
Εικόνα 46: Εφαρμογή Email: Traffic received/sent

Στο διάγραμμα της εικόνας 46 γίνεται μία σύγκριση για την εφαρμογή email όσο αναφορά στο ποσοστό των δεδομένων που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν μεταξύ των δύο σεναρίων προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα και εδώ ταυτίζονται απόλυτα δηλαδή δεν έχουμε καθόλου απώλειες δεδομένων.



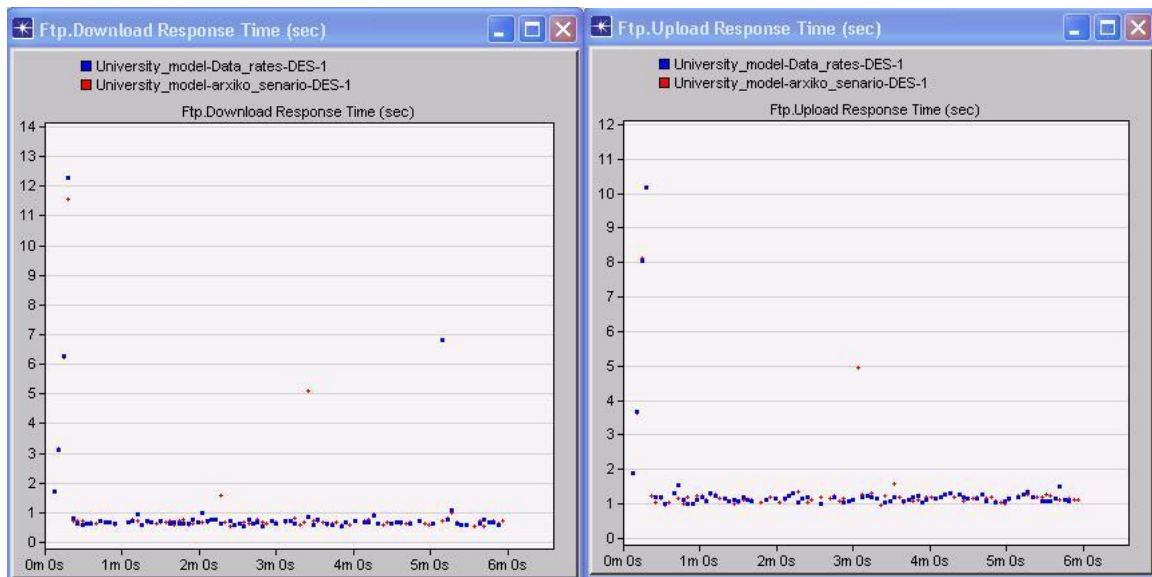
Εικόνα 47: Εφαρμογή Email: Χρόνος απόκρισης Download/Upload

Στα δύο αυτά διαγράμματα της εικόνας 47 συγκρίνεται στη μεν πρώτη ο χρόνος απόκρισης κατά την αποστολή ενός email και στην μεν δεύτερη ο χρόνος απόκρισης κατά τη λήψη ενός μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου όσο αναφορά την εφαρμογή email. Όπως φαίνεται τα αποτελέσματα και στα δύο σενάρια ταυτίζονται πλήρως μεταξύ τους.



Εικόνα 48: Εφαρμογή FTP: Traffic received/sent

Η σύγκρισή για την εφαρμογή FTP για τα δεδομένα που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που εστάλησαν των δύο σεναρίων παρουσιάζεται στην παραπάνω εικόνα και όπως δείχνει το διάγραμμα τα αποτελέσματα και εδώ είναι περίπου τα ίδια δηλαδή δεν υπάρχει απώλεια σε δεδομένα και για αυτή την εφαρμογή.



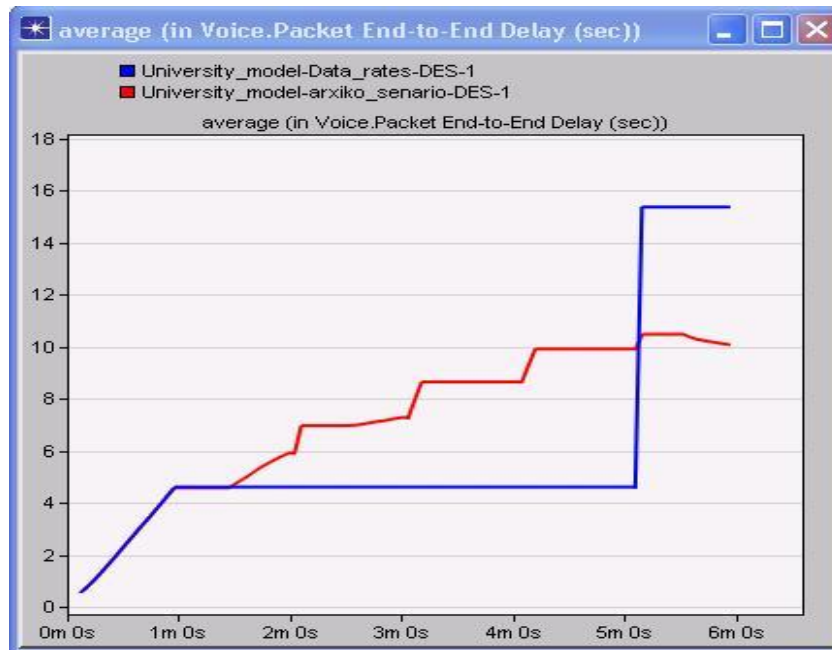
Εικόνα 49: Εφαρμογή FTP: Χρόνος απόκρισης Download/Upload

Στις δύο παραπάνω εικόνες (εικόνα 49) παρουσιάζεται ο χρόνος απόκρισης κατά την αποστολή ή λήψη ενός μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου όσο αναφορά την εφαρμογή FTP των δύο σεναρίων που προσομοιώθηκαν. Μέσω της σύγκρισης των δύο σεναρίων φαίνεται πως τα αποτελέσματα ταυτίζονται μεταξύ τους δηλαδή οι χρόνοι απόκρισης είναι σχεδόν ίδιοι μεταξύ τους.



Εικόνα 50: Εφαρμογή VoIP: Traffic received/sent

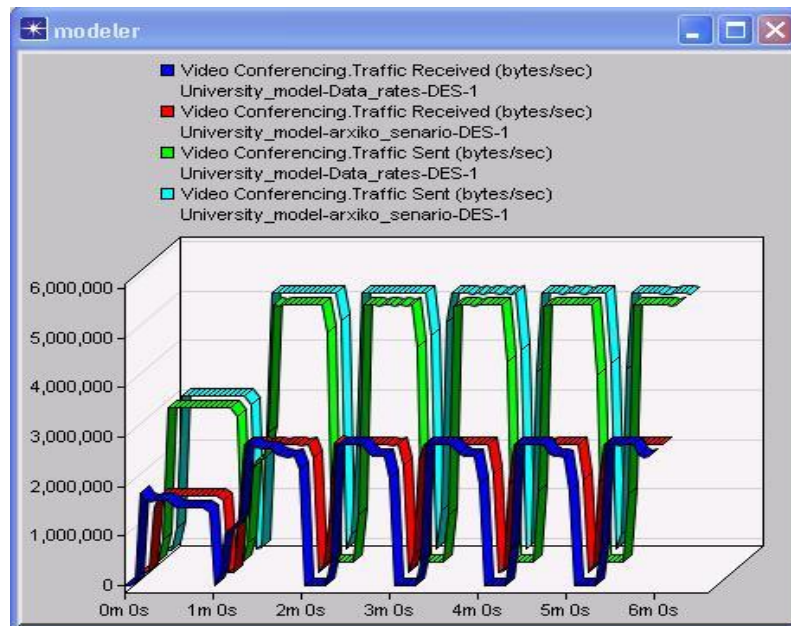
Στο διάγραμμα της εικόνας 50 γίνεται μία σύγκριση των συνολικά δεδομένων που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν για την εφαρμογή VoIP που χρησιμοποιείται στα δύο αυτά σενάρια. Εδώ φαίνεται πως τα αποτελέσματα του αρχικού σεναρίου είναι από την αρχή μέχρι το τέλος της προσομοίωσης καλύτερα σε σχέση με αυτά του δεύτερου σεναρίου άρα έχουμε μία μείωση της απόδοσης για την εφαρμογή VoIP στο 2<sup>ο</sup> σενάριο.



Εικόνα 51: Εφαρμογή VoIP: Μέσος όρος από άκρο σε άκρο καθυστέρησης

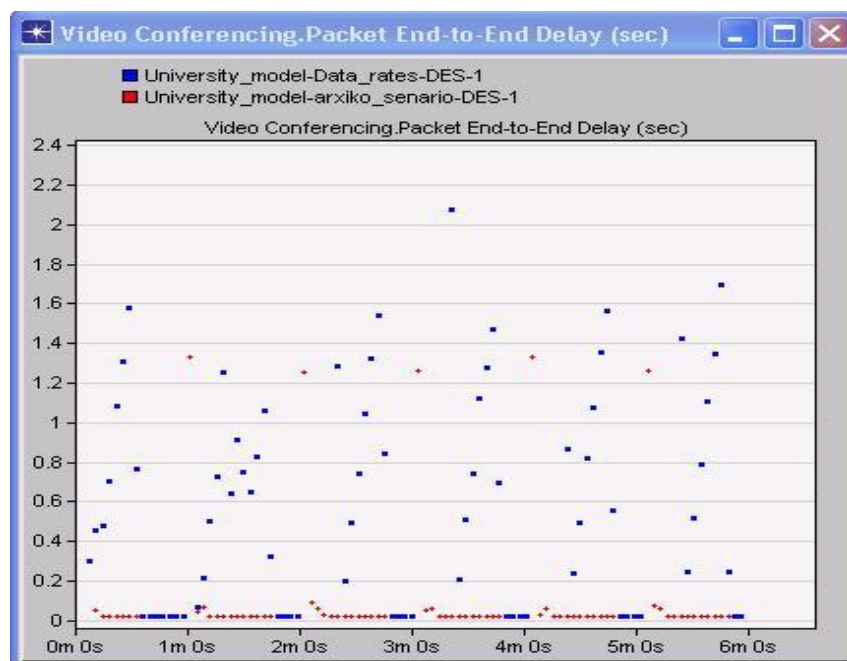
Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα όπου συγκρίνεται ο μέσος όρος της από άκρο σε άκρο καθυστέρησης για την εφαρμογή VoIP των δύο σεναρίων ενώ μέχρι το 1<sup>ο</sup> λεπτό της προσομοίωσης περίπου οι τιμές ταυτίζονται φαίνεται πως μετά για το αρχικό σενάριο η καθυστέρηση ανεβαίνει με σταθερό ρυθμό ενώ για το 2<sup>ο</sup> σενάριο μένει σταθερή και στο τέλος έχουμε μία απότομη αύξηση της καθυστέρησης.





Εικόνα 52: Εφαρμογή Video: Traffic received/sent

Στο διάγραμμα στην εικόνα της προηγούμενης σελίδας συγκρίνεται ο αριθμός των δεδομένων βίντεο που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν για τα δύο σενάρια. Τα αποτελέσματα αυτής της σύγκρισης δείχνουν πως και για τα δύο σενάρια έχουμε παρόμοια σχεδόν απόδοση όσο αναφορά την εφαρμογή βίντεο.



Εικόνα 53: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 53) αν και απ' ότι είδαμε από το διάγραμμα της προηγούμενης σελίδας όπου παρουσιαζόταν τα δεδομένα που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν ήταν τα ίδια για τα δύο σενάρια, σύμφωνα με την παραπάνω εικόνα οι καθυστερήσεις για το 2<sup>ο</sup> σενάριο είναι πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με το αρχικό σενάριο προσομοίωσης όσο αναφορά την μετάδοση βίντεο. Άρα και για την εφαρμογή βίντεο μετά τις αλλαγές που έγιναν παρατηρείται μία περαιτέρω πτώση στην απόδοση.

### **6.2.3 Συμπεράσματα από την σύγκριση μεταξύ του αρχικού σεναρίου και του 2<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης**

Παραπάνω έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στο αρχικό σενάριο ώστε να βελτιωθούν οι επιδόσεις του. Αυτές οι τροποποιήσεις αφορούσαν τον μέγιστο και τον ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης καθώς και το μέγεθος του buffer των σταθμών εργασίας. Όπως φάνηκε μετά την παρουσίαση και την σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων, τα αποτελέσματα του 2<sup>ου</sup> σεναρίου ήταν σχεδόν ίδια για τις εφαρμογές HTTP, email και FTP αλλά εκεί τα αποτελέσματα ήταν ήδη πολύ καλά από το αρχικό σενάριο άρα δεν αναμενόταν να γίνει αντιληπτή κάποια αισθητή βελτίωση. Όσο αναφορά τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων για τις εφαρμογές βίντεο και VoIP τα αποτελέσματα για το 2<sup>ο</sup> σενάριο ήταν χειρότερα από το αναμενόμενο και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως όταν απλά αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου χωρίς την χρήση προτεραιοτήτων σε αυτό για τους διάφορους τύπους δεδομένων που μεταδίδονται τα αποτελέσματα δεν θα είναι τα επιθυμητά.



## 6.3 3<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης: Quality of Services

### 6.3.1 Αλλαγές στο δίκτυο

Σε αυτό το σενάριο έγινε μία τροποποίηση στις ρυθμίσεις του αρχικού σεναρίου ώστε να υποστηριχθεί η χρήση Quality of Services (QoS) από το υποδίκτυο WiMAX. Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο τα QoS που χρησιμοποιούνται στο πρωτόκολλο IEEE 802.16 μέχρι στιγμής είναι το best effort, το UGS το rtps και το ertps. Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας όπου παρουσιάζονται οι αλλαγές που έγιναν στο δίκτυο.

Πίνακας 3: Ρυθμίσεις σταθμών εργασίας 3<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης

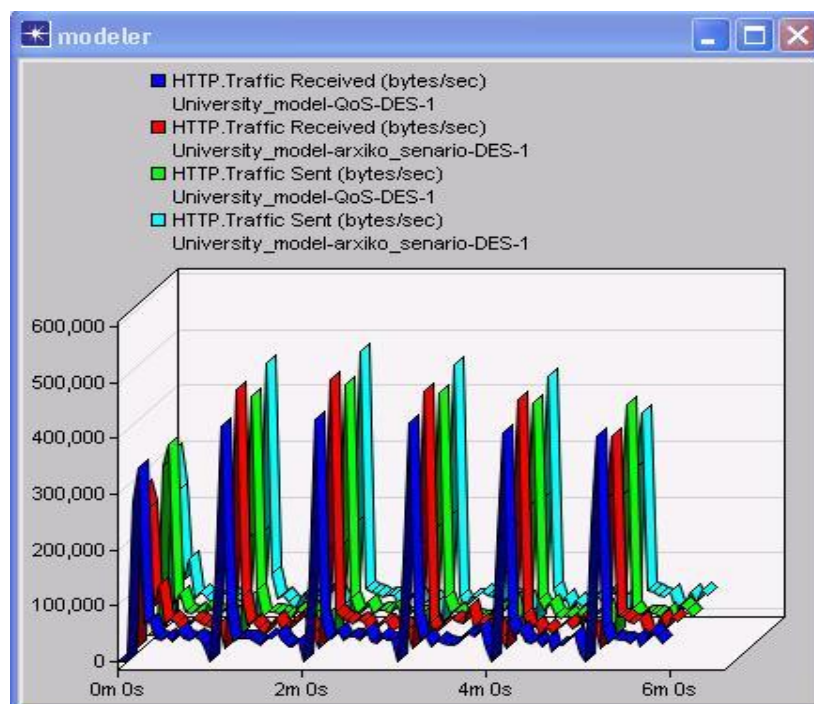
Τύπος Σταθμού	Αριθμός Σταθμών	Service Class Name	Quality Of Service	Data rates maximum/ minimum	Μέγεθος Buffer	Εφαρμογή
Σταθμός εργασίας	48	Bronze	Best Effort	384 Kbps / 384 Kbps	64 kb	HTTP, email, FTP
Σταθμός εργασίας	1	Gold	UGS	384 Kbps / 384 Kbps	64 kb	VoIP
Σταθμός εργασίας	1	Silver	RTPS	384 Kbps / 384 Kbps	64 kb	video

Τα στοιχεία που αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα αφορούν ένα υποδίκτυο WiMAX αλλά όπως έχει προαναφερθεί επειδή και τα πέντε υποδίκτυα WiMAX είναι ίδια μεταξύ τους ισχύει και για τα υπόλοιπα τέσσερα. Επομένως όπως φαίνεται στο πίνακα στο δίκτυο συνεχίζουν να υπάρχουν 48 σταθμοί εργασίας οι οποίοι χρησιμοποιούν τις εφαρμογές HTTP, email και FTP και ανήκουν στην κλάση bronze και κάνουν χρήση του quality of service best effort με μέγιστο και

ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης τα 384 kbps και τέλος έχουν buffer μεγέθους 64 kb. Επίσης υπάρχει ένας σταθμός εργασίας που χρησιμοποιεί την εφαρμογή VoIP ο οποίος πλέον ανήκει στην κλάση gold και χρησιμοποιεί το QoS UGS με μέγιστο και ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης τα 384 kbps και buffer 64 kb. Τέλος ο σταθμός που χρησιμοποιεί την εφαρμογή βίντεο ανήκει στην κλάση silver και κάνει χρήση του QoS rtps με μέγιστο και ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης τα 384 kbps και μέγεθος buffer 64 kb.

### 6.3.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 3<sup>ου</sup> σεναρίου και σύγκριση με το αρχικό σενάριο προσομοίωσης

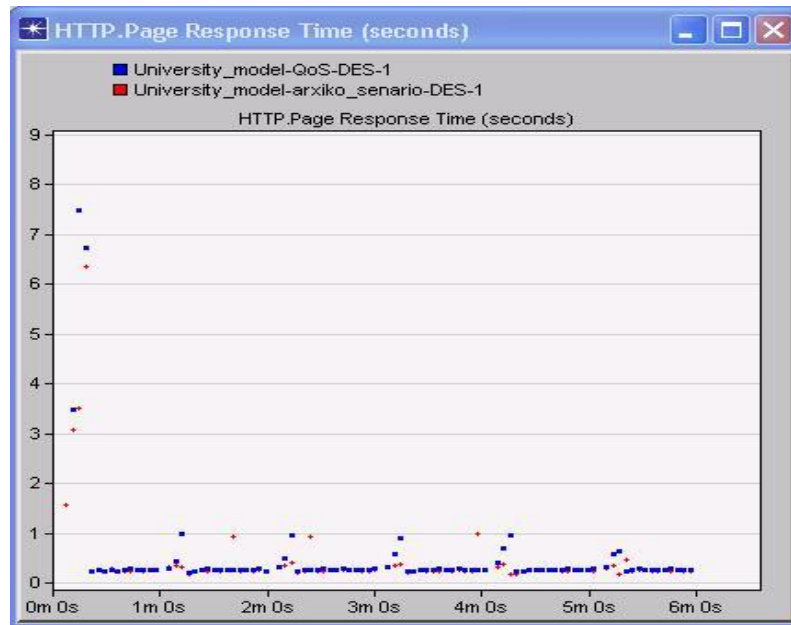
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την προσομοίωση του 3<sup>ου</sup> σεναρίου τα οποία συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του αρχικού σεναρίου.



Εικόνα 54: Εφαρμογή HTTP: Traffic received/sent

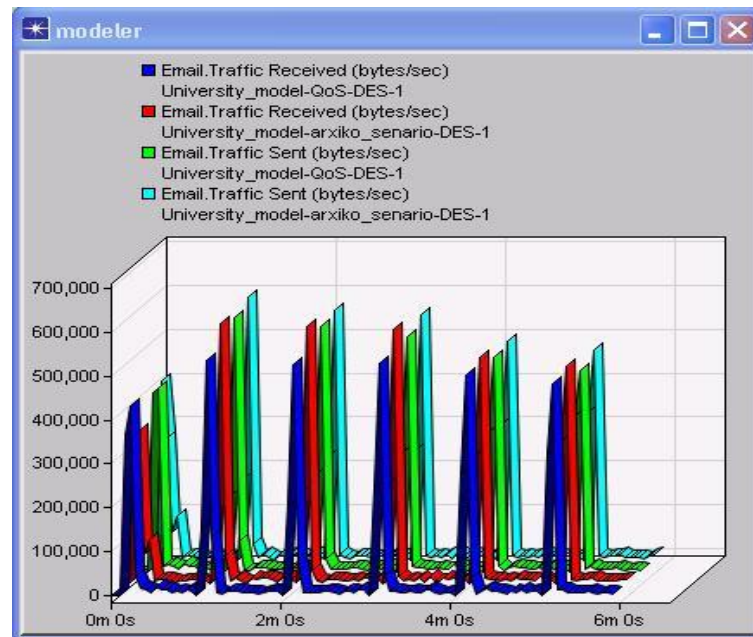
Στην εικόνα 54 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο γίνεται μία σύγκριση για την εφαρμογή HTTP όσο αναφορά στο ποσοστό των δεδομένων που ελήφθησαν

σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν αρχικά για το αρχικό σενάριο σε σχέση με τα αποτελέσματα του 3<sup>ου</sup> σεναρίου που δημιουργήθηκε. Τα αποτελέσματα και των δύο σεναρίων ταυτίζονται απόλυτα δηλαδή δεν έχουμε καθόλου απώλειες δεδομένων όσο αναφορά την εφαρμογή HTTP.



Εικόνα 55: Χρόνος απόκρισης σελίδας HTTP

Στο παραπάνω διάγραμμα της εικόνα γίνεται μία σύγκριση όσο αναφορά στο χρόνο απόκρισης μίας ιστοσελίδας HTTP μεταξύ των δύο σεναρίων. Όπως φαίνεται και εδώ υπάρχει μια ταύτιση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων.



Εικόνα 56: Εφαρμογή Email: Traffic received/sent

Στο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας γίνεται μία σύγκριση όσο αναφορά στο ποσοστό των δεδομένων που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που στάλθηκαν μεταξύ των δύο σεναρίων προσομοίωσης για την εφαρμογή email. Τα αποτελέσματα όπως ήταν αναμενόμενο και εδώ ταυτίζονται απόλυτα δηλαδή δεν έχουμε καθόλου απώλειες δεδομένων.



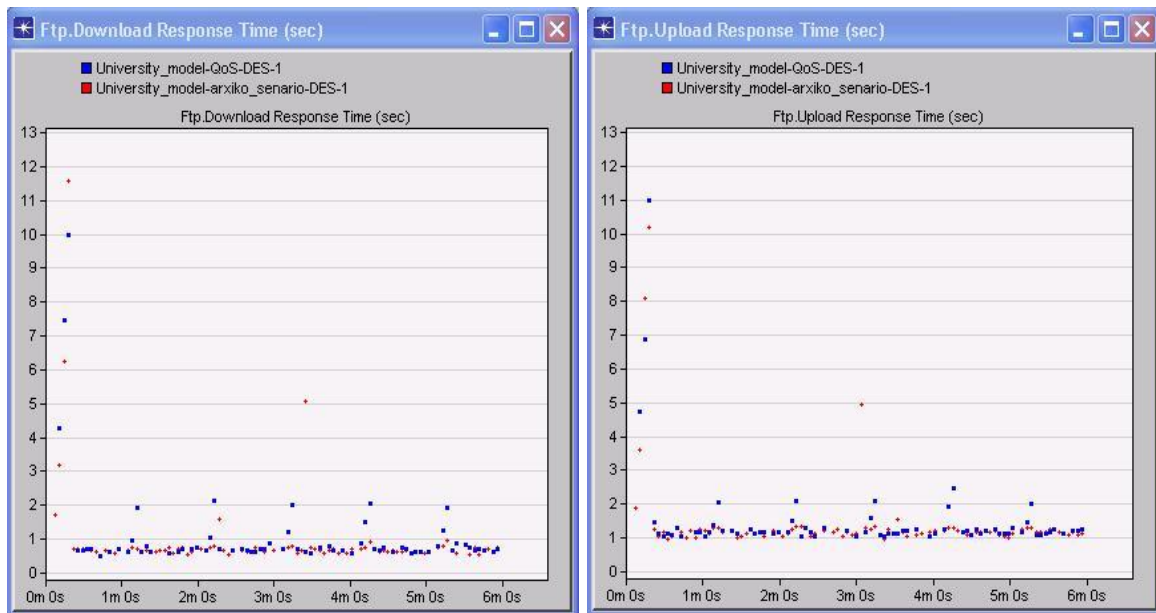
Εικόνα 57: Εφαρμογή Email: Χρόνος απόκρισης Download/Upload

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα (εικόνα 57) συγκρίνεται ο χρόνος απόκρισης κατά την μετάδοση και τη λήψη ενός μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου αντίστοιχα όσο αναφορά την εφαρμογή email. Όπως είναι φανερό τα αποτελέσματα των δύο σεναρίων ταυτίζονται πλήρως μεταξύ τους και για την εφαρμογή email.



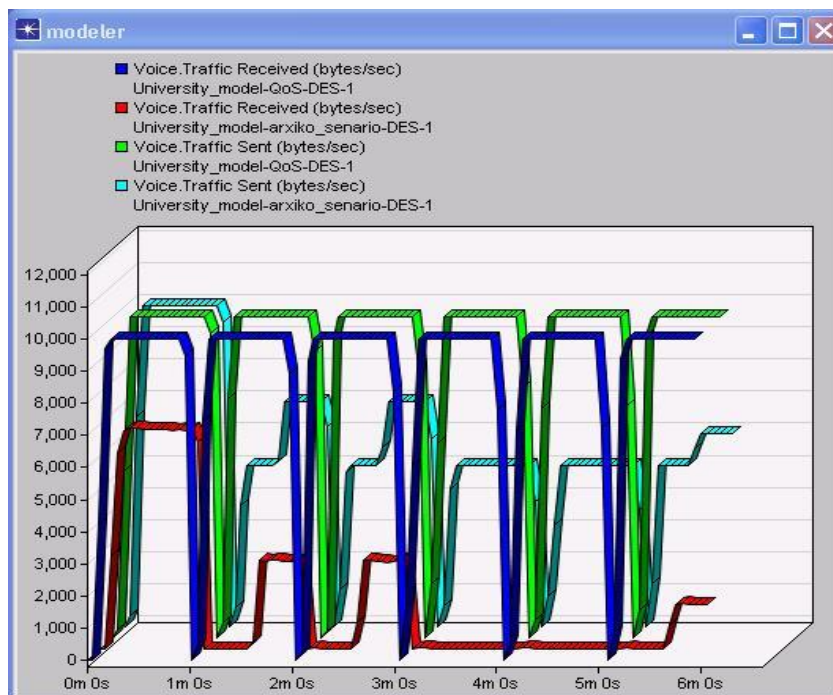
Εικόνα 58: Εφαρμογή FTP: Traffic received/sent

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται για την εφαρμογή FTP τα δεδομένα που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που εστάλησαν και για τα δύο σενάρια προσομοίωσης.



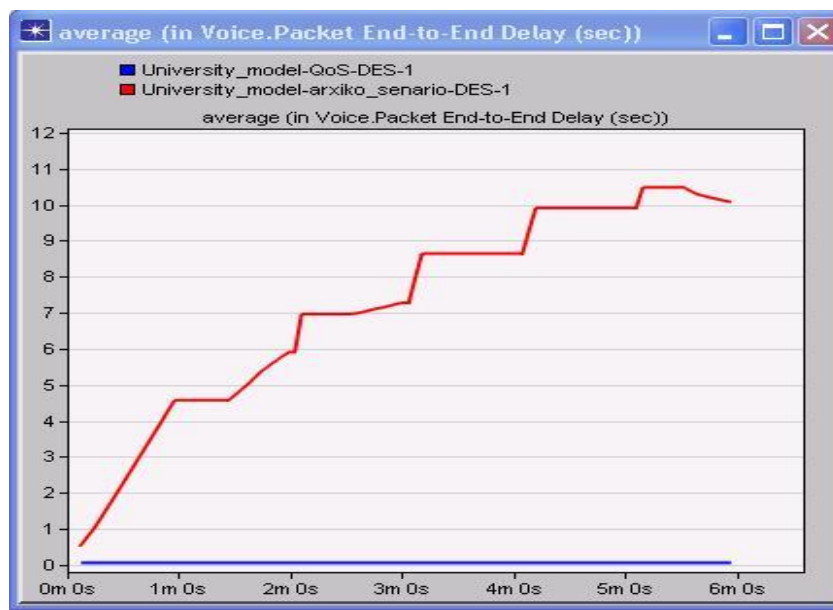
**Εικόνα 59: Εφαρμογή FTP: Χρόνος απόκρισης Download/Upload**

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα (εικόνα 59) παρουσιάζεται ο χρόνος απόκρισης κατά την αποστολή και τη λήψη δεδομένων όσο αναφορά την εφαρμογή FTP των δύο σεναρίων που προσομοιώθηκαν. Μετά την σύγκριση των δύο σεναρίων φαίνεται πως τα αποτελέσματα ταυτίζονται μεταξύ τους δηλαδή οι χρόνοι απόκρισης είναι σχεδόν ίδιοι μεταξύ τους.



**Εικόνα 60: Εφαρμογή VoIP: Traffic received/sent**

Στο διάγραμμα παραπάνω (εικόνα 60) συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσο αναφορά τα δεδομένα που εστάλησαν σε σχέση με τα δεδομένα που ελήφθησαν για την εφαρμογή VoIP. Όπως παρατηρείται υπάρχει μία σαφή βελτίωση στο 3<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης σε σχέση με το αρχικό σενάριο. Πλέον η απώλεια δεδομένων για την εφαρμογή VoIP είναι μηδενική.

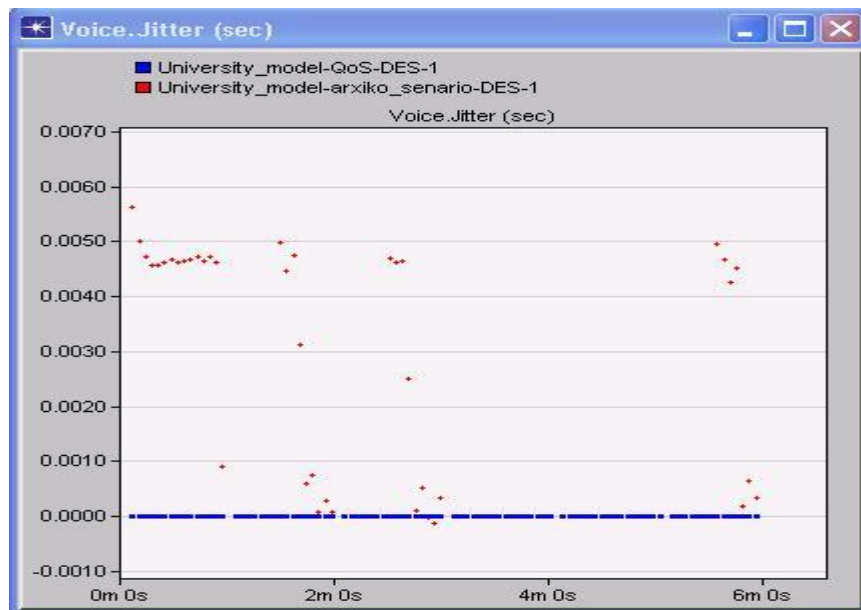


Εικόνα 61: Μέσος όρος από άκρο σε άκρο καθυστέρησης εφαρμογής VoIP

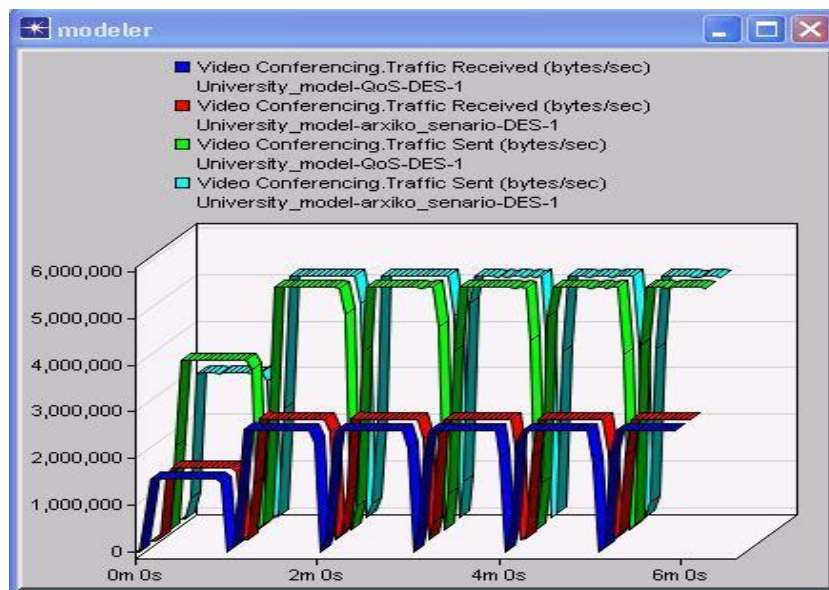
Η παραπάνω εικόνα δείχνει τον μέσο όρο καθυστέρησης για την εφαρμογή φωνής των δύο σεναρίων που συγκρίνονται και όπως ήταν αναμενόμενο μετά τα αποτελέσματα του διαγράμματος της προηγούμενης σελίδας οι καθυστερήσεις για το 3<sup>ο</sup> σενάριο είναι πλέον σχεδόν μηδενικές.



Επίσης το jitter για την εφαρμογή VoIP όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα είναι μηδενικό και χωρίς διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.



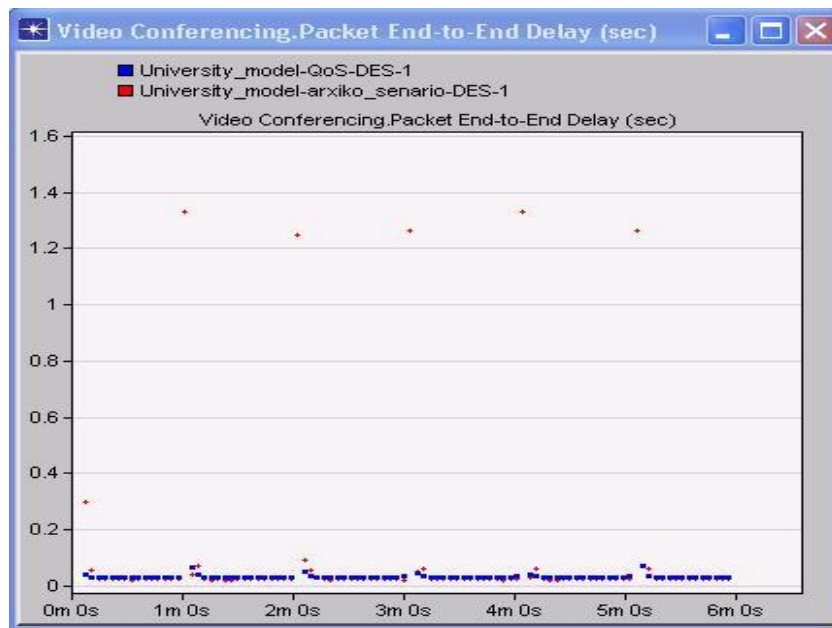
Εικόνα 62: Εφαρμογή VoIP: Jitter



Εικόνα 63: Εφαρμογή Video: Traffic received/sent

Στο παραπάνω διάγραμμα συγκρίνεται το ποσοστό των δεδομένων που μεταδόθηκαν αρχικά σε σχέση με αυτά που έφτασαν τελικά στο προορισμό τους για την εφαρμογή βίντεο των δύο σεναρίων προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα είναι περίπου τα ίδια με αυτά του αρχικού σεναρίου επομένως δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική βελτίωση.





Εικόνα 64: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση

Τέλος, σύμφωνα με το τελευταίο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η καθυστέρηση μετάδοσης για την εφαρμογή βίντεο για τα δύο σενάρια που συγκρίνονται φαίνεται πως οι τιμές ταυτίζονται μεταξύ τους όπως ήταν αναμενόμενο μετά τα αποτελέσματα του προηγούμενου διαγράμματος. Άρα οι καθυστερήσεις και στα δύο σενάρια για την εφαρμογή βίντεο είναι περίπου ίδιες.

### 6.3.3 Συμπεράσματα από την σύγκριση μεταξύ του αρχικού σεναρίου και του 3<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης

Σε αυτό το σενάριο έγινε χρήση QoS ώστε να εισαχθούν προτεραιότητες κατά την μετάδοση των διάφορων τύπων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο με σκοπό την καλύτερη απόδοση του δικτύου.

Μετά από την μελέτη και την ανάλυση των αποτελεσμάτων παρατηρήθηκε ότι με τις αλλαγές που έγιναν στο 3<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης οι εφαρμογές HTTP, email και FTP συνεχίζουν να υποστηρίζονται με απόλυτη επιτυχία από το δίκτυο που δημιουργήθηκε. Επίσης η εφαρμογή VoIP πλέον παρουσιάζει πολύ καλά και

αποδεκτά αποτελέσματα και δεν έχει καθόλου απόρριψη πακέτων. Τέλος, η εφαρμογή βίντεο η οποία είναι και η πιο απαιτητική σε σχέση με τις υπόλοιπες τέσσερις που χρησιμοποιούνται όσο αναφορά τους πόρους του δικτύου που χρειάζεται για να λειτουργεί σωστά δεν παρουσίασε σαφή βελτίωση. Στη συνέχεια θα γίνει μία προσπάθεια να χρησιμοποιηθούν από κοινού οι αλλαγές του 2<sup>ου</sup> και του 3<sup>ου</sup> σεναρίου ώστε να μελετηθεί αν η απόδοση του δικτύου θα είναι καλύτερη και αν θα μπορέσει να υποστηρίξει και την εφαρμογή βίντεο.

## **6.4 4<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης: Optimized scenario**

### **6.4.1 Αλλαγές στο δίκτυο**

Σε αυτό το σενάριο χρησιμοποιήθηκαν από κοινού οι αλλαγές που έγιναν στα δύο προηγούμενα σενάρια (2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης) ώστε να διαπιστωθεί αν τελικά μπορεί να εξυπηρετηθούν όλες οι εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν από το δίκτυο WiMAX και αν οι αλλαγές που έγιναν στα προηγούμενα δύο σενάρια κινούνται προς την σωστή κατεύθυνση. Πιο αναλυτικά οι αλλαγές αφορούν στη χρήση quality of services και στη χρήση διαφορετικού μέγιστου και ελάχιστου επιτρεπτού ρυθμού μετάδοσης καθώς και στο μέγεθος του buffer των σταθμών εργασίας. Οι αλλαγές που έγιναν παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα στην επόμενη σελίδα.

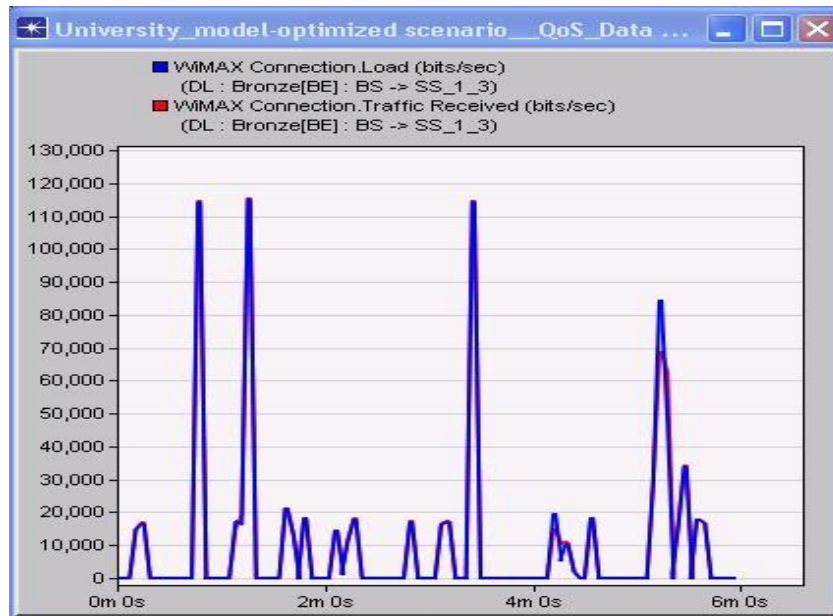
Πίνακας 4: Ρυθμίσεις σταθμών εργασίας 4<sup>ο</sup> σεναρίου προσομοίωσης

Τύπος Σταθμού	Αριθμός Σταθμών	Service Class Name	Quality Of Service	Data rates maximum/ minimum	Μέγεθος Buffer	Εφαρμογή
Σταθμός εργασίας	48	Bronze	Best Effort	1 Mbps / 64 Kbps	256 kb	HTTP, email, FTP
Σταθμός εργασίας	1	Gold	UGS	1 Mbps / 64 Kbps	256 kb	VoIP
Σταθμός εργασίας	1	Silver	RTPS	1 Mbps / 64 Kbps	256 kb	video

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα οι 48 από τους 50 σταθμούς εργασίας του κάθε υποδικτύου WIMAX που χρησιμοποιούν τις εφαρμογές HTTP, email και FTP ανήκουν στην κλάση bronze και χρησιμοποιούν best effort. Ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης είναι στο 1 Mbps και ο ελάχιστος είναι στα 64 kbps ενώ το μέγεθος του buffer στους 48 αυτούς σταθμούς είναι 256 kbps. Επίσης ο ένας σταθμός εργασίας που χρησιμοποιεί την εφαρμογή VoIP ανήκει στην κλάση gold και χρησιμοποιεί QoS UGS και έχει ως μέγιστο και ελάχιστο επιτρεπτό ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps και 64 kbps αντίστοιχα και μέγεθος buffer 256 kbps. Τέλος, ο σταθμός εργασίας που χρησιμοποιεί την εφαρμογή βίντεο ανήκει στην κλάση silver και χρησιμοποιεί QoS RTPS ενώ έχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης 1 Mbps και 64 kbps ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης και τέλος 256 kbps μέγεθος buffer.

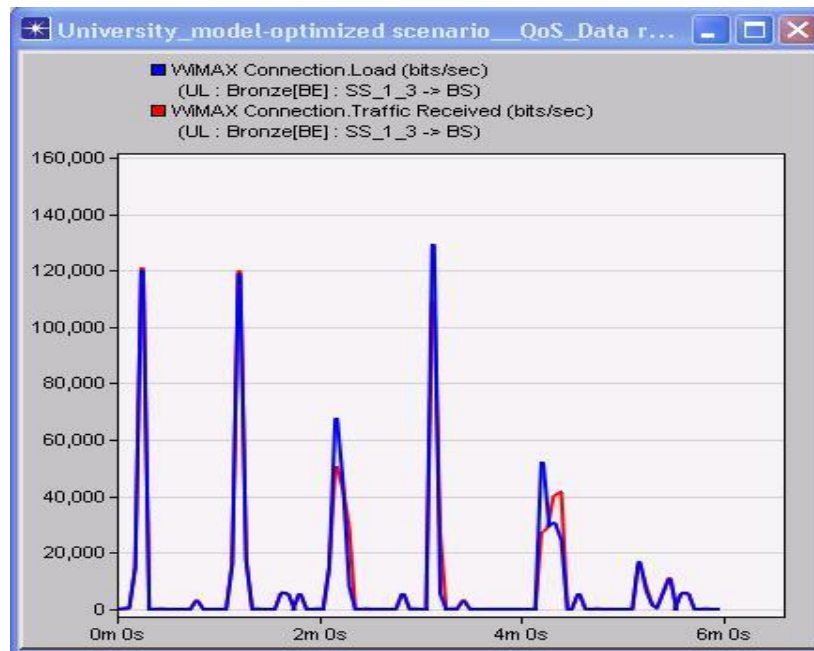
## 6.4.2 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 4<sup>ου</sup> σεναρίου

Εδώ παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την προσομοίωση του 4<sup>ου</sup> σεναρίου.



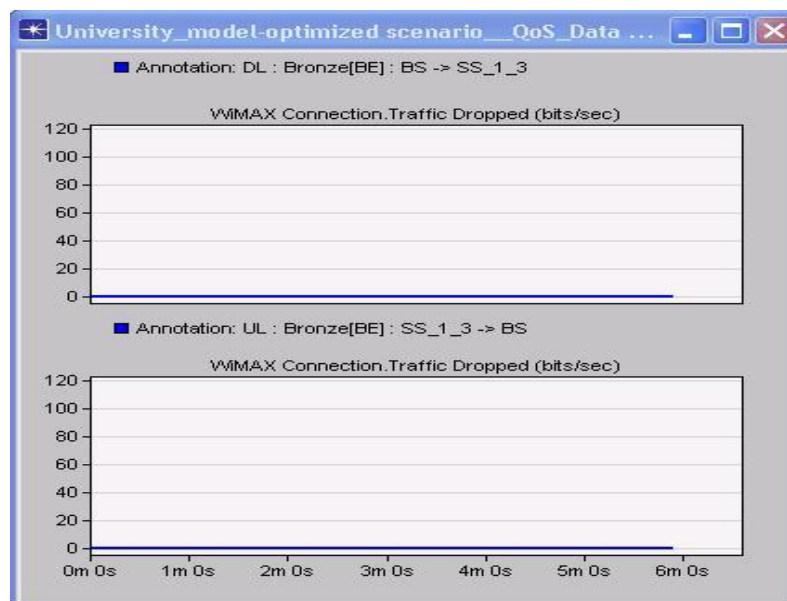
Εικόνα 65: Φόρτος / ληφθείσα κίνηση Download σταθμού SS\_1\_3

Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από ένα σταθμό που επιλέχθηκε τυχαία ο οποίος χρησιμοποιεί τις εφαρμογές HTTP, email και FTP. Στο διάγραμμα απεικονίζεται για το downlink μία σύγκριση μεταξύ του συνολικού φόρτου δηλαδή το συνολικό όγκο δεδομένων που στάλθηκαν στο συγκεκριμένο σταθμό σε σχέση με τα δεδομένα που παραλήφθηκαν σωστά από αυτό το σταθμό εργασίας. Οι δύο καμπύλες συμπίπτουν πλήρως άρα όλα τα δεδομένα έχουν φτάσει στο προορισμό τους το οποίο είναι και το ζητούμενο σε αυτή την περίπτωση.



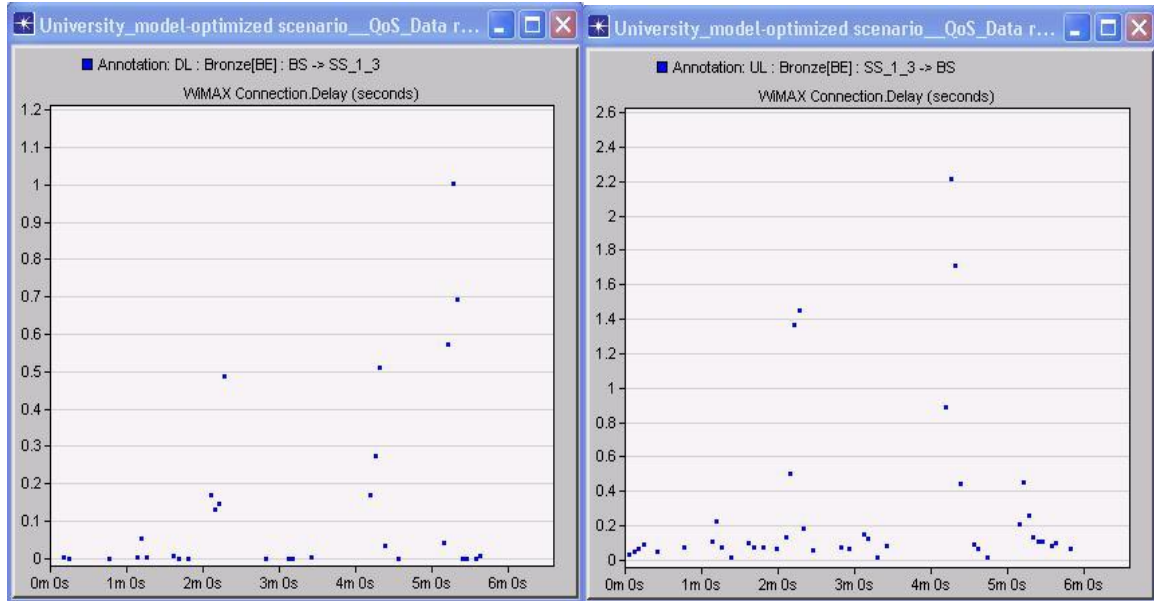
Εικόνα 66: Φόρτος / ληφθείσα κίνηση Upload σταθμού SS\_1\_3

Στη παραπάνω εικόνα για τον ίδιο σταθμό που αναφέρθηκε στο προηγούμενο διάγραμμα απεικονίζεται για το uplink μία σύγκριση μεταξύ του συνολικού φόρτου σε σχέση με τα δεδομένα που παραλήφθηκαν σωστά από αυτό το σταθμό εργασίας. Οι δύο τιμές ταυτίζονται μεταξύ τους άρα και για το uplink όλα τα δεδομένα έχουν φτάσει στο προορισμό τους το οποίο είναι και το ζητούμενο σε αυτή την περίπτωση.



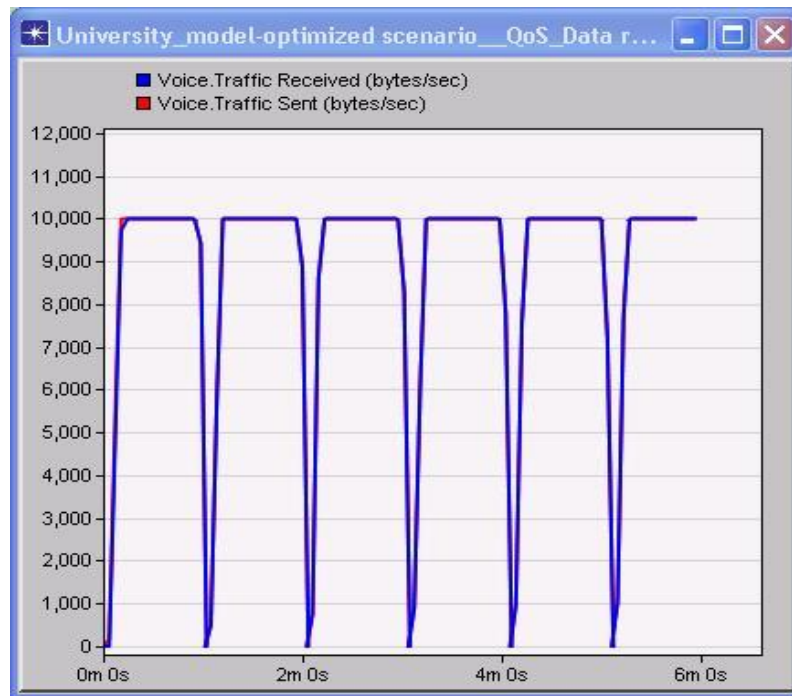
Εικόνα 67: Απόρριψη κίνησης Download/Upload σταθμού SS\_1\_3

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα της παραπάνω εικόνας (εικόνα 67) για τον ίδιο σταθμό εργασίας το ποσοστό απώρριψης των πακέτων είναι μηδενικό και για την αποστολή και για τη λήψη δεδομένων.



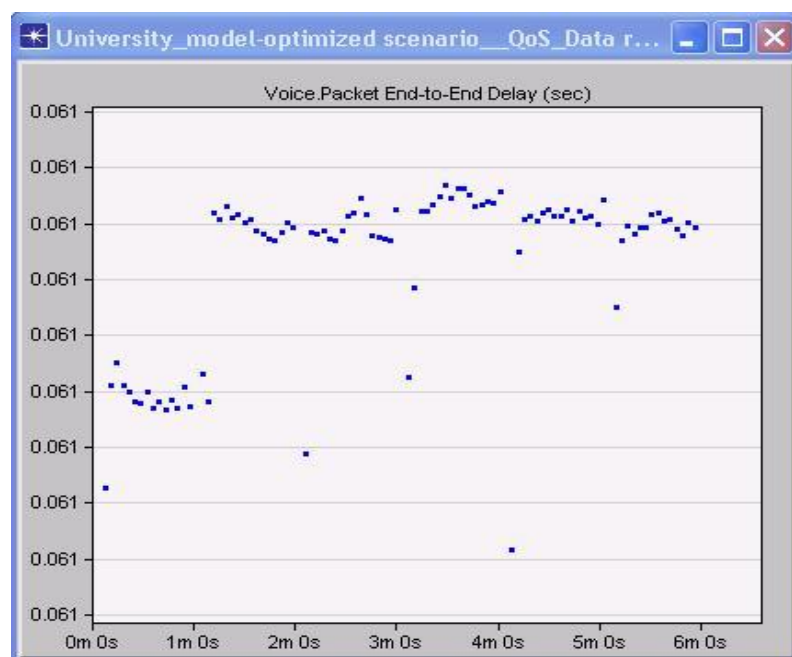
Εικόνα 68: Καθυστέρηση Download/Upload σταθμού SS\_1\_3

Στη εικόνα 68 (αριστερά) φαίνεται η καθυστέρηση σε δευτερόλεπτα για το downlink και στη δεύτερη η καθυστέρηση για το uplink. Στη πρώτη περίπτωση οι καθυστερήσεις κυμαίνονται από μηδέν έως και ένα δευτερόλεπτο περίπου ενώ στη δεύτερη πάλι ξεκινάνε από μηδέν έως και 2,2 δευτερόλεπτα περίπου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το διάγραμμα αφορά καθυστερήσεις κατά τη μετάδοση και αποστολή δεδομένων των εφαρμογών email, HTTP και FTP τα αποτελέσματα θεωρούνται ικανοποιητικά.



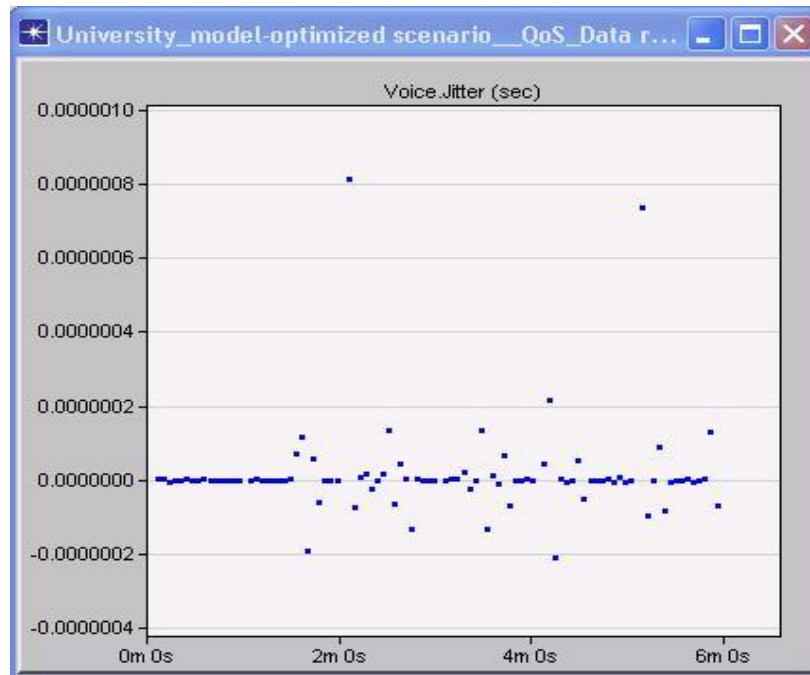
Εικόνα 69: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent

Στο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με τα δεδομένα που εστάλησαν σε σχέση με τα δεδομένα που ελήφθησαν για την εφαρμογή VoIP. Όπως παρατηρείται πλέον η απώλεια δεδομένων για την εφαρμογή VoIP είναι μηδενική πράγμα πέραν του ικανοποιητικού για την εφαρμογή VoIP.



Εικόνα 70: Εφαρμογή VoIP: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση

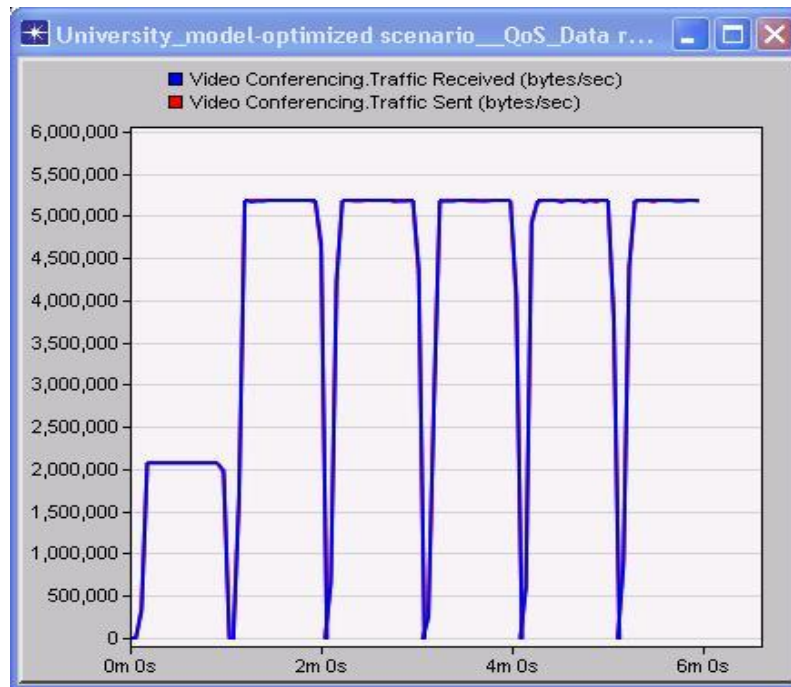
Η εικόνα 70 στη προηγούμενη σελίδα δείχνει την καθυστέρηση μετάδοσης για την εφαρμογή VoIP η οποία καθυστέρηση κυμαίνεται περίπου στα 0,061 δευτερόλεπτα ή 61 millisecond το οποίο είναι απολύτως ικανοποιητικό για την μετάδοση δεδομένων φωνής.



**Εικόνα 71: Εφαρμογή VoIP: Jitter**

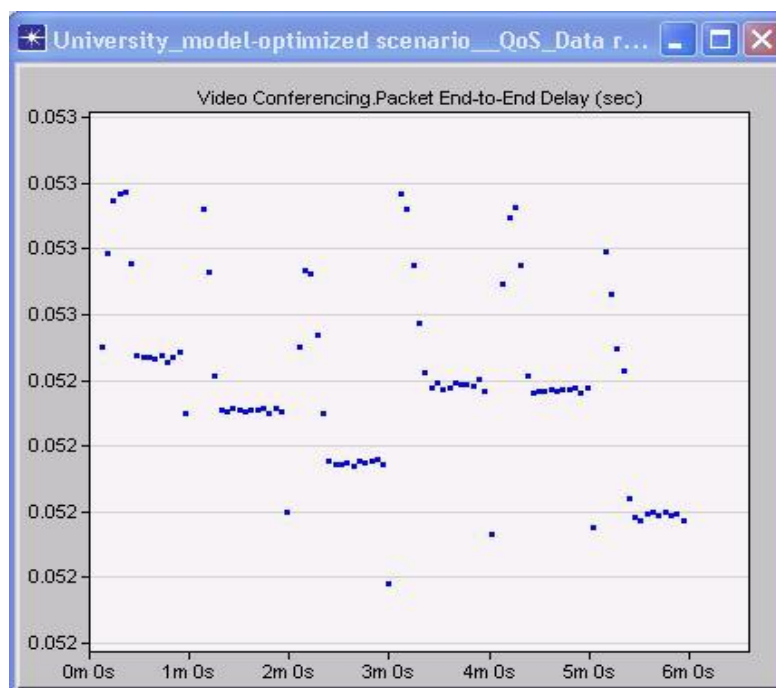
Στην εικόνα της προηγούμενης σελίδας παρουσιάζεται το jitter για την εφαρμογή VoIP το οποίο κυμαίνεται από -0,0000002 sec και 0,0000008 sec δηλαδή η διακύμανση είναι τις τάξης των 0,0000006 δευτερολέπτων το οποίο είναι αμελητέο και απόλυτα αποδεκτό για την συγκεκριμένη εφαρμογή.





Εικόνα 72: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent

Το παραπάνω διάγραμμα αφορά την εφαρμογή βίντεο και παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσο αναφορά τα δεδομένα που εστάλησαν σε σχέση με αυτά που ελήφθησαν για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Όπως παρατηρείται η απώλεια σε δεδομένα είναι μηδενική δηλαδή όλα τα πακέτα βίντεο μεταδόθηκαν με επιτυχία στο προορισμό τους.



Εικόνα 73: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση

Τέλος, στο τελευταίο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας (εικόνα 73) για το 4<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης στο οποίο παρουσιάζεται η καθυστέρηση για την εφαρμογή βίντεο σε δευτερόλεπτα η οποία είναι μεταξύ 0,052 και 0,053 δευτερόλεπτα ή 52 και 53 millisecond αντίστοιχα. Η καθυστέρηση αυτή για την εφαρμογή βίντεο είναι αποδεκτή και μέσα στα όρια που προαναφέρθηκαν για την εφαρμογή βίντεο στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### **6.4.3 Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης**

Παραπάνω παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα μετά την προσομοίωση του 4<sup>ου</sup> σεναρίου που δημιουργήθηκε. Οι τροποποιήσεις που έγιναν σε αυτό το σενάριο αποτελούν ένα συνδυασμό από τις τροποποιήσεις των δύο προηγούμενων σεναρίων και επιγραμματικά αφορούν τη χρήση QoS και τη χρήση διαφορετικού μεγέθους buffer στους σταθμούς εργασίας καθώς και διαφορετικού μέγιστου και ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης. Μετά την μελέτη και την ανάλυση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι το δίκτυο σε αυτή του τη μορφή μπορεί να υποστηρίξει με απόλυτη επιτυχία όλες τις εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή τις εφαρμογές HTTP, email, FTP αλλά και τις εφαρμογές VoIP και video για όλους τους σταθμούς του δικτύου για τις οποίες υπήρχε και το πρόβλημα στα προηγούμενα σενάρια. Άρα το δίκτυο σύμφωνα με τις προσομοιώσεις που έγιναν με τη βοήθεια του προσομοιωτή OPNET Modeler με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις και ρυθμίσεις μπορεί να ικανοποιήσει το συγκεκριμένο όγκο δεδομένων και χρηστών μετά από τις αλλαγές που έγιναν με απόλυτη επιτυχία.

Στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου έχοντας ως δεδομένο τα αποτελέσματα του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης θα γίνει μία προσπάθεια μέσω περαιτέρω προσομοιώσεων να μετρηθεί η χωρητικότητα του δικτύου όσο αναφορά σε σταθμούς voice και video.

## 6.5 5<sup>ο</sup> και 6<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης: Μέτρηση χωρητικότητας voice σταθμών

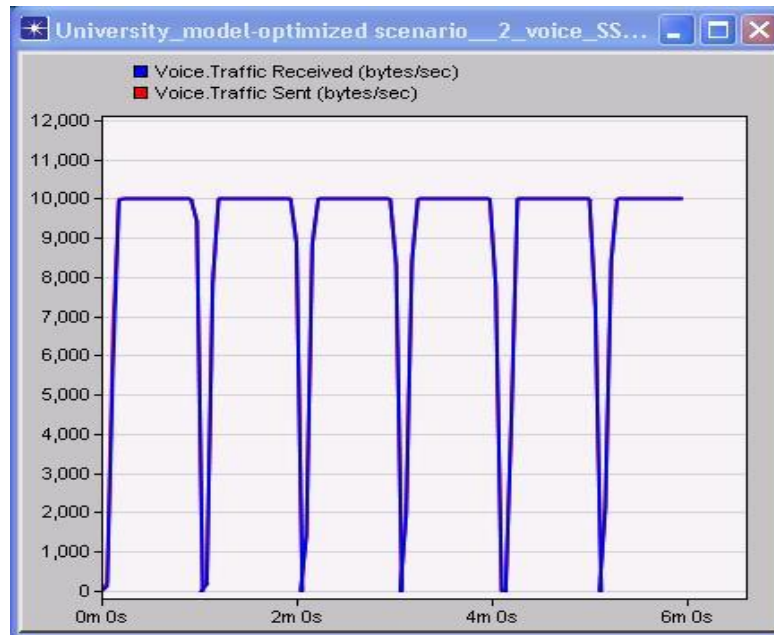
### 6.5.1 Αλλαγές στο δίκτυο

Εδώ γίνεται μία προσπάθεια ώστε έχοντας ως δεδομένο τις ρυθμίσεις και τα αποτελέσματα του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης (optimized scenario) να μετρηθεί η χωρητικότητα σε σταθμούς οι οποίοι χρησιμοποιούν την εφαρμογή voice δηλαδή μέχρι πόσους σταθμούς που θα τρέχουν την εφαρμογή VoIP μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο.

Αρχικά, για το 5<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης η μόνη αλλαγή που έγινε σε σχέση με το 4<sup>ο</sup> σενάριο είναι ότι πλέον σε κάθε υποδίκτυο WiMAX ένας σταθμός που χρησιμοποιούσε τις εφαρμογές HTTP, email και FTP πλέον χρησιμοποιεί μόνο τη εφαρμογή VoIP. Δηλαδή υπάρχουν δύο σταθμοί εργασίας σε κάθε υποδίκτυο WiMAX που χρησιμοποιούν την εφαρμογή VoIP και επικοινωνούν πλέον απευθείας μεταξύ τους χωρίς τη βοήθεια κάποιου εξυπηρετητή όπως συνέβαινε στα προηγούμενα σενάρια. Οι σταθμοί voice και γενικά το δίκτυο έχουν ακριβώς τις ίδιες ρυθμίσεις με το δίκτυο του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά οι δύο σταθμοί voice του κάθε υποδικτύου WiMAX ανήκουν στην κλάση gold και χρησιμοποιούν το quality of service UGS ενώ το μέγεθος του buffer των σταθμών παραμένει 256 kbps.

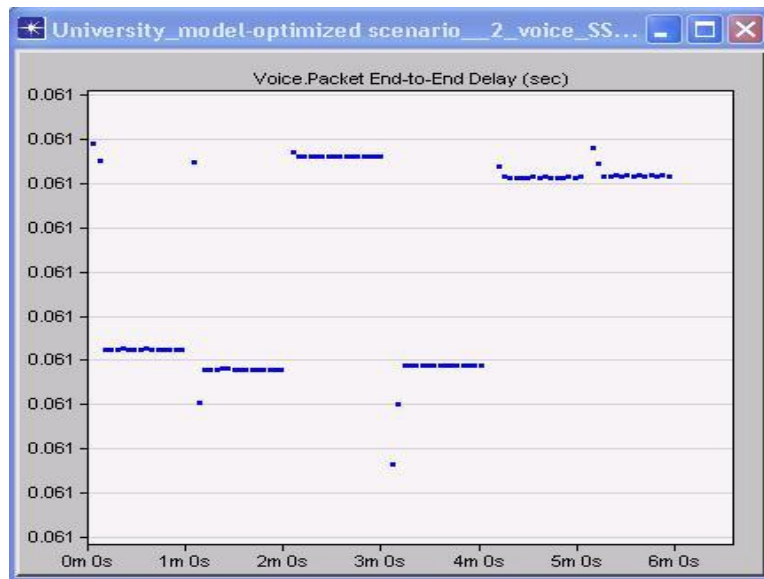
## 6.5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μετά το τέλος της προσομοίωσης του δικτύου που δημιουργήθηκε στο OPNET προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:



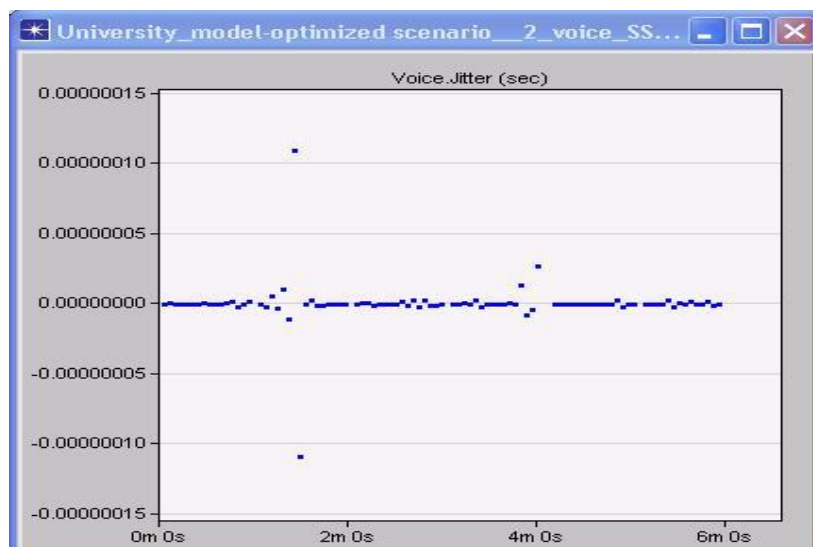
Εικόνα 74: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent

Στο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας φαίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όσο αναφορά τα δεδομένα που εστάλησαν σε σχέση με τα δεδομένα που ελήφθησαν συνολικά για την εφαρμογή VoIP που χρησιμοποιήθηκε στο δίκτυο. Το αποτέλεσμα είναι πως οι δύο αυτές τιμές είναι πλήρως ταυτόσημες άρα όλα τα δεδομένα έφτασαν σωστά στο προορισμό τους χωρίς να υπάρχουν απώλειες πράγμα απολύτως ικανοποιητικό.



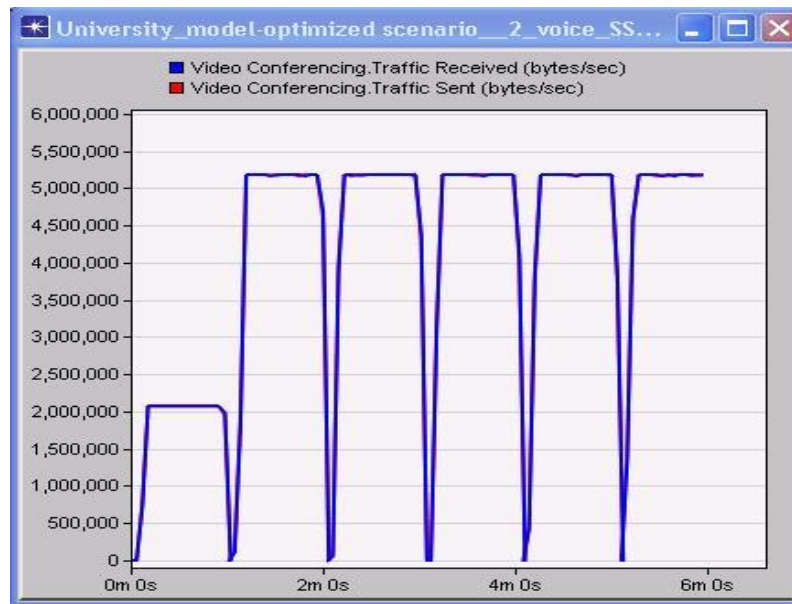
**Εικόνα 75: Εφαρμογή VoIP: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση**

Στη παραπάνω εικόνα παρουσιάζεται η από-άκρο-σε-άκρο καθυστέρηση για την εφαρμογή VoIP η οποία σε γενικές γραμμές κυμαίνεται περίπου στα 0,061 δευτερόλεπτα ή 61 millisecond, μέτρηση η οποία είναι πάρα πολύ καλή για τη μετάδοση δεδομένων φωνής.

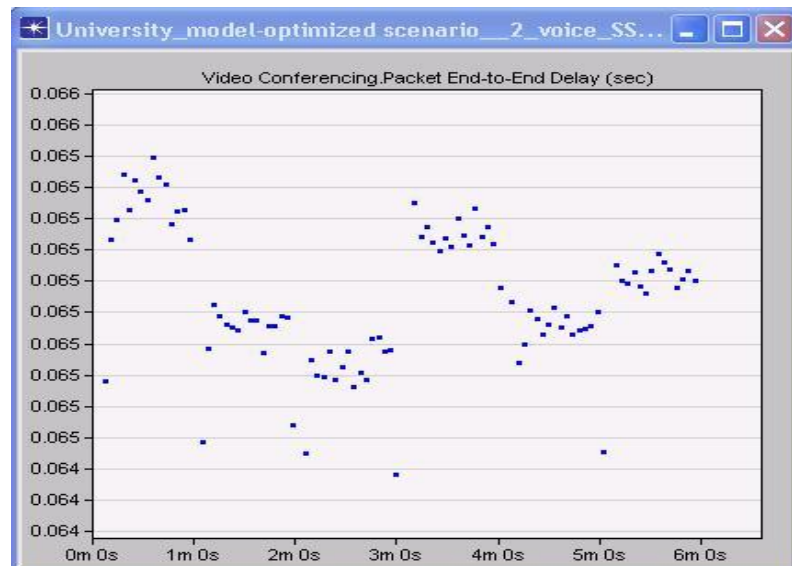


**Εικόνα 76: Εφαρμογή VoIP: Jitter**

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει τη τιμή του jitter για την εφαρμογή VoIP. Σύμφωνα με το διάγραμμα η διακύμανση του jitter είναι σχεδόν μηδενική και με πολύ μικρή διακύμανση αποτέλεσμα το οποίο είναι απολύτως ικανοποιητικό.



Εικόνα 77: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent

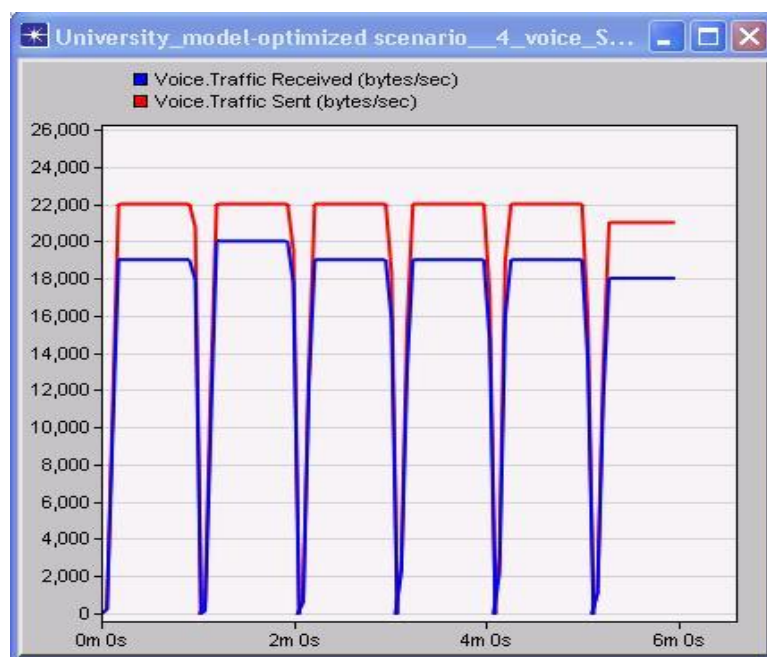


Εικόνα 78: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση

Στις δύο παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται ενδεικτικά και τα αποτελέσματα για την εφαρμογή video του 5<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά παρουσιάζεται η αναλογία μεταξύ των δεδομένων που εστάλησαν σε σχέση με αυτά που ελήφθησαν για την εφαρμογή βίντεο του σεναρίου και όπως φαίνεται και εδώ δεν υπάρχουν απώλειες ενώ στο δεύτερο διάγραμμα όπου δείχνει την καθυστέρηση, η οποία είναι περίπου 0,065 δευτερόλεπτα ή 65 millisecond. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε απόλυτα ικανοποιητικά επίπεδα για την μετάδοση δεδομένων βίντεο.

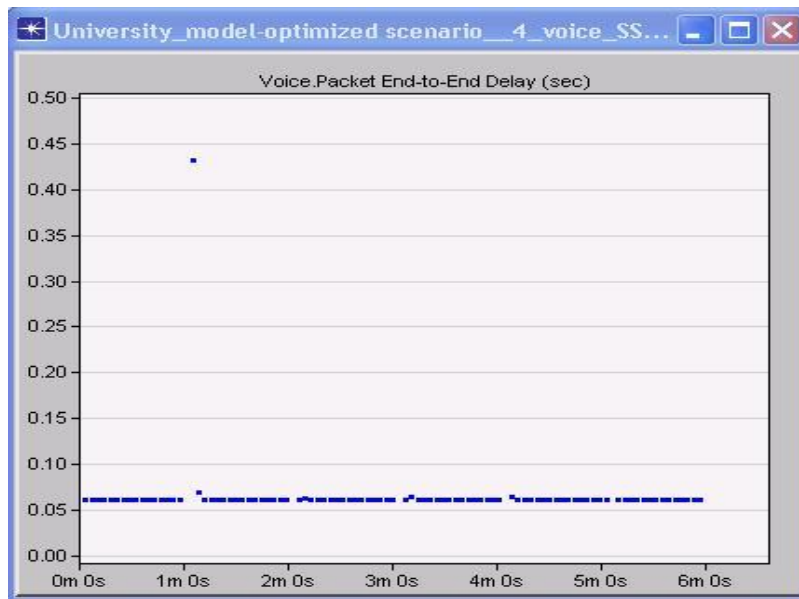
Τέλος, το δίκτυο του 5<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης μπορεί να υποστηρίξει την ύπαρξη δύο σταθμών που χρησιμοποιούν την εφαρμογή VoIP χωρίς κανένα πρόβλημα. Στη συνέχεια το δίκτυο τροποποιήθηκε ώστε σε κάθε υποδίκτυο δύο ακόμα σταθμοί που έκαναν χρήση των εφαρμογών HTTP, email και FTP τροποποιήθηκαν ώστε να χρησιμοποιούν πλέον την εφαρμογή VoIP με αποτέλεσμα να υπάρχουν τέσσερις σταθμοί που θα χρησιμοποιούν την εφαρμογή VoIP και οι οποίοι θα επικοινωνούν ανά δύο μεταξύ τους χωρίς πάλι την διαμεσολάβηση κάποιου εξυπηρετητή.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την προσομοίωση του 6<sup>ου</sup> σεναρίου έχουν ως εξής:



Εικόνα 79: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent

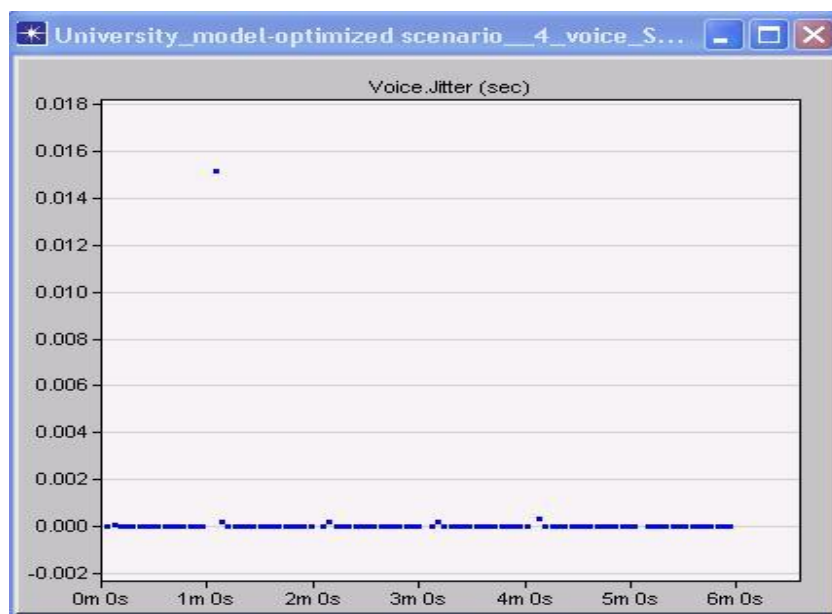
Στο παραπάνω διάγραμμα το οποίο δείχνει το συνολικό όγκο των δεδομένων που εστάλησαν σε σχέση με αυτά που ελήφθησαν τελικά από τους σταθμούς εργασίας για την εφαρμογή VoIP φαίνεται πως υπάρχει μία απώλεια περίπου της τάξης του 10% σε σχέση με τα δεδομένα που εστάλησαν ποσοστό το οποίο δεν είναι αποδεκτό για την μετάδοση δεδομένων φωνής.



**Εικόνα 80: Εφαρμογή VoIP: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση**

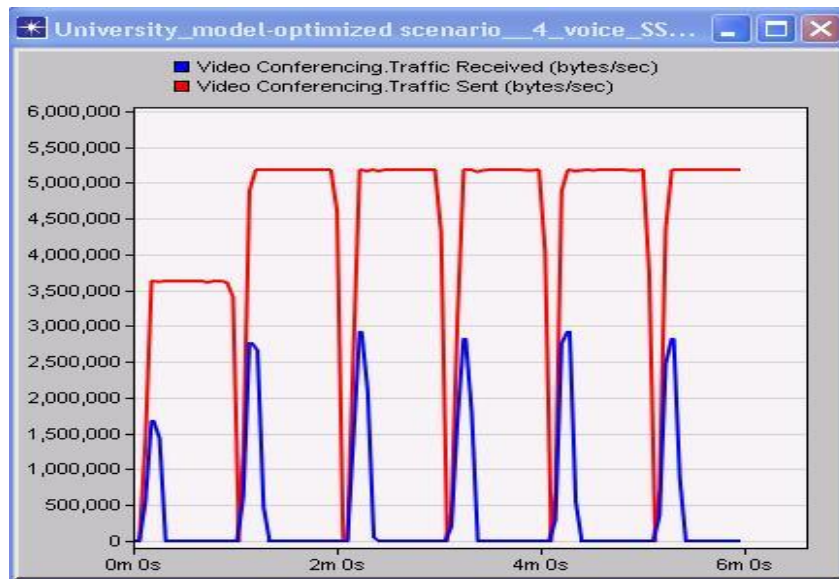
Στο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας παρουσιάζεται η καθυστέρηση για το 6<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης. Καθυστέρηση η οποία είναι περίπου 0,06 δευτερόλεπτα ή 60 millisecond η οποία είναι αποδεκτή για την μετάδοση δεδομένων φωνής.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα για το jitter της εφαρμογής VoIP το οποίο είναι σχεδόν μηδενικό και με πολύ μικρή έως καθόλου διακύμανση στην τιμή του πράγμα απολύτως αποδεκτό.

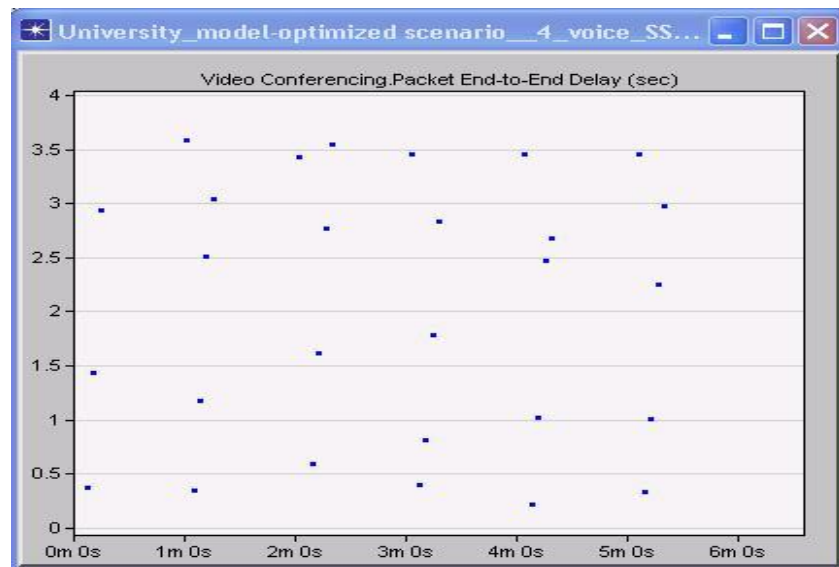


**Εικόνα 81: Εφαρμογή VoIP: Jitter**





**Εικόνα 82: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent**



**Εικόνα 83: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση**

Στα δύο παραπάνω διαγράμματα των εικόνων (εικόνες 82 και 83) παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα για την εφαρμογή βίντεο του 6<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά στην πρώτη εικόνα παρουσιάζονται τα δεδομένα που εστάλησαν σε σχέση με τα δεδομένα που ελήφθησαν όπου φαίνεται πως η απώλεια δεδομένων είναι πολύ μεγάλη περίπου της τάξης του 95% ενώ και στο δεύτερο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η καθυστέρηση είναι πολύ μεγάλη ενώ σε μερικά σημεία ξεπερνάει ακόμα και τα 3,5 δευτερόλεπτα πράγμα απαγορευτικό για την μετάδοση βίντεο.

### **6.5.3 Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του 5<sup>ου</sup> και 6<sup>ου</sup> σεναρίου**

Στα δύο τελευταία σενάρια προσομοίωσης που παρουσιάστηκαν έγινε μία προσπάθεια ώστε να μετρηθεί η χωρητικότητα των σταθμών που κάνουν χρήση της εφαρμογής VoIP χωρίς να αλλάξει ο συνολικός αριθμός των σταθμών ή οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται από αυτούς στο δίκτυο. Η μόνη αλλαγή που έγινε ήταν πως αρχικά για το 5<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης ένας σταθμός που χρησιμοποιούσε τις εφαρμογές HTTP, email και FTP μετατράπηκε σε σταθμό VoIP με ότι περαιτέρω αλλαγές συνεπάγεται αυτό όπως προαναφέρθηκε, άρα συνολικά υπάρχουν δύο VoIP σταθμοί σε κάθε υποδίκτυο ενώ στο 6<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης οι σταθμοί VoIP με τον ίδιο τρόπο που προαναφέρθηκε έγιναν συνολικά τέσσερις για το κάθε υποδίκτυο WiMAX.

Όπως φάνηκε μετά την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο σεναρίων προσομοίωσης το δίκτυο σε αυτή του τη μορφή μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και δύο σταθμούς σε κάθε υποδίκτυο WiMAX και συνολικά δέκα για όλο το δίκτυο που κάνουν χρήση της εφαρμογής VoIP χωρίς να παρουσιάζεται κανένα πρόβλημα. Ενώ όταν οι σταθμοί διπλασιαστούν γίνουν δηλαδή τέσσερις σε κάθε υποδίκτυο και είκοσι συνολικά τότε παρουσιάζονται προβλήματα ειδικά για την εφαρμογή βίντεο του δικτύου η οποία έχει τεράστιες απώλειες σε πακέτα που μεταδόθηκαν και μεγάλες καθυστερήσεις κατά την μετάδοση.

Άρα σύμφωνα με τις παραπάνω προσομοιώσεις που έγιναν το δίκτυο σε αυτή του τη μορφή μπορεί να υποστηρίξει μέχρι και δύο σταθμούς φωνής σε κάθε υποδίκτυο WiMAX που θα επικοινωνούν μεταξύ τους και συνολικά δέκα για όλο το δίκτυο.

## **6.6 7<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης: Μέτρηση χωρητικότητας βίντεο σταθμών**

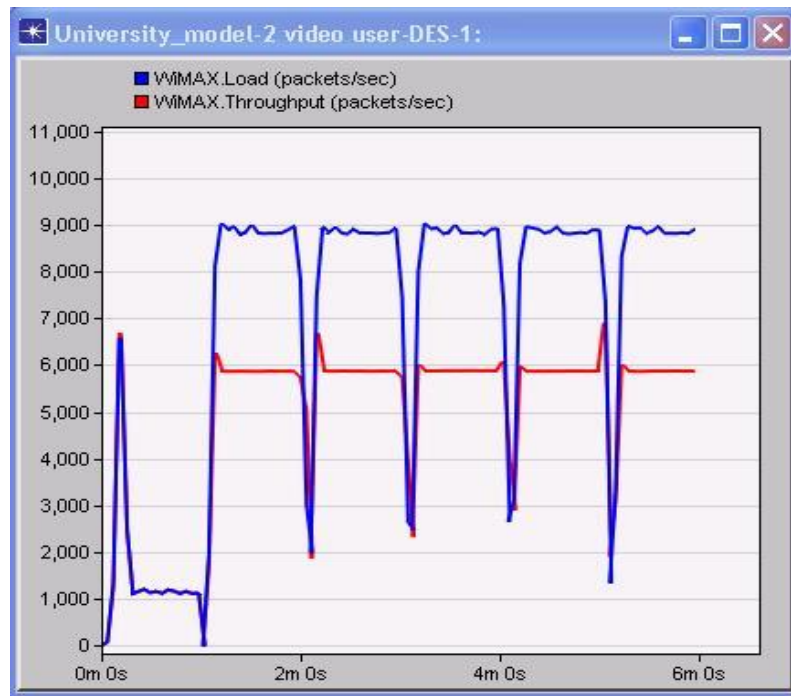
### **6.6.1 Αλλαγές στο δίκτυο**

Ο σκοπός δημιουργίας αυτού του σεναρίου προσομοίωσης ήταν να μετρηθεί η χωρητικότητα σε βίντεο σταθμούς για το δίκτυο του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης δηλαδή μέχρι πόσους σταθμούς οι οποίοι θα χρησιμοποιούν την εφαρμογή βίντεο μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο συνολικά και κάθε υποδίκτυο ξεχωριστά.

Οι αλλαγές που έγιναν είναι ότι ένας σταθμός από κάθε υποδίκτυο WiMAX ο οποίος χρησιμοποιούσε τις εφαρμογές HTTP, email και FTP πλέον χρησιμοποιεί την εφαρμογή video με αυτό το σταθμό πλέον να ανήκει στην κλάση gold και να χρησιμοποιεί το quality of service rtps όπως και όλοι οι υπόλοιποι βίντεο σταθμοί ώστε σε κάθε υποδίκτυο WiMAX να υπάρχουν δύο σταθμοί video και συνολικά δέκα σε όλο το δίκτυο.

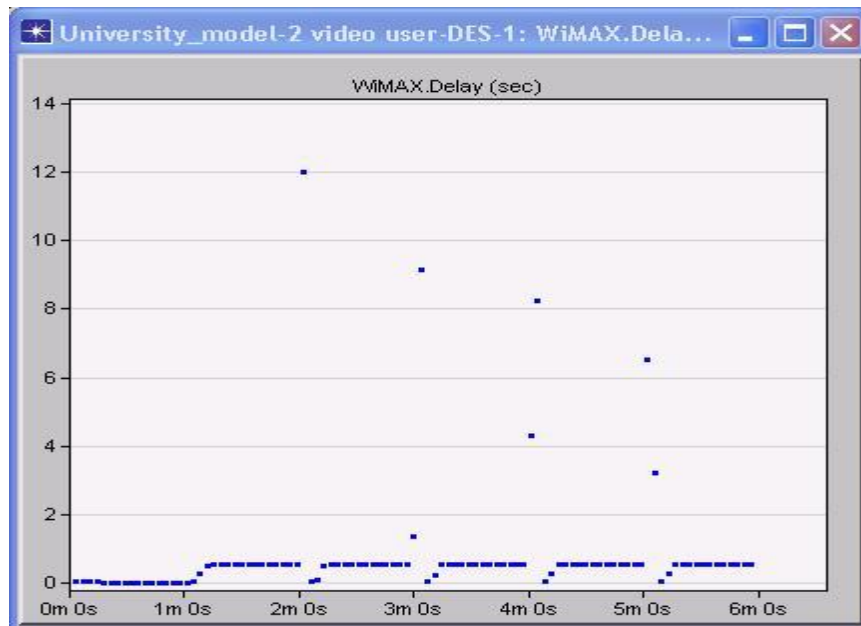
### **6.6.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του 7<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης.



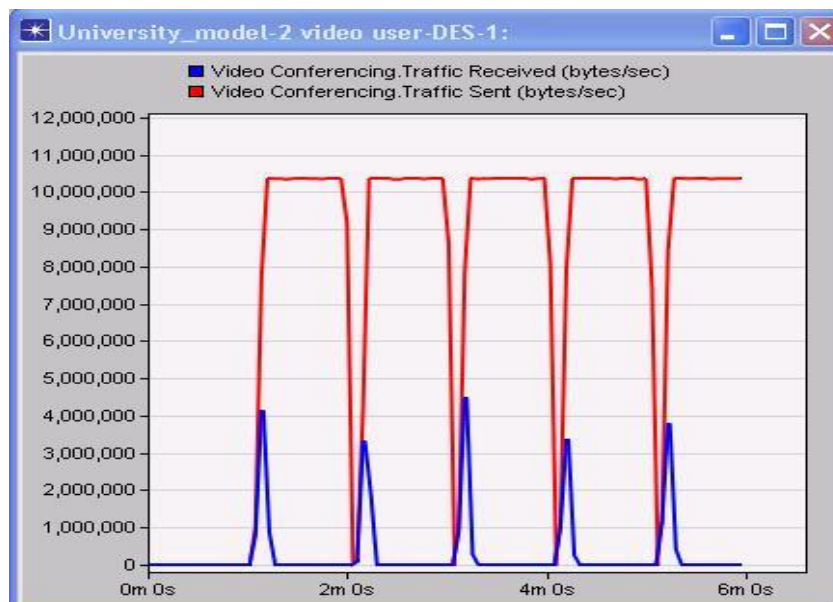
**Εικόνα 84: Υποδίκτυο WiMAX: Load/throughput**

Στο διάγραμμα της παραπάνω εικόνας φαίνεται συνολικά για το υποδίκτυο WiMAX το load σε σχέση με το throughput το οποίο επιτυγχάνεται. Το αποτέλεσμα δεν είναι καθόλου ενθαρρυντικό για την συνέχεια γιατί το 1/3 των δεδομένων που μεταδίδονται δεν φτάνουν στο προορισμό τους.



**Εικόνα 85: Υποδίκτυο WiMAX: Καθυστέρηση**

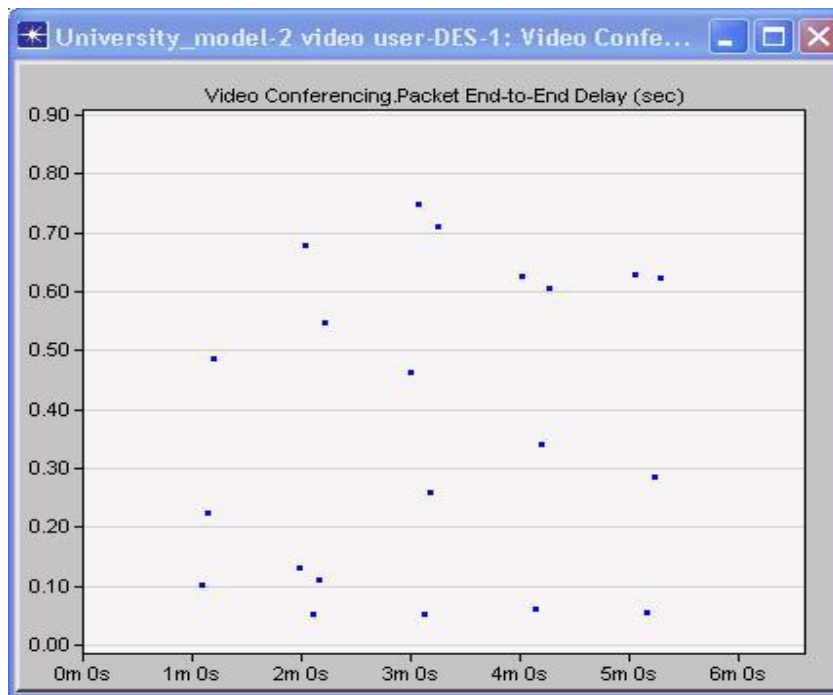
Στο παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζεται η καθυστέρηση για το υποδίκτυο WiMAX η οποία γενικά κυμαίνεται περίπου στα 0,8 με 0,7 δευτερόλεπτα αλλά στιγμιαία φαίνεται πως φτάνει ακόμα και τα 12 δευτερόλεπτα.



**Εικόνα 86: Εφαρμογή Video: Traffic Received/sent**

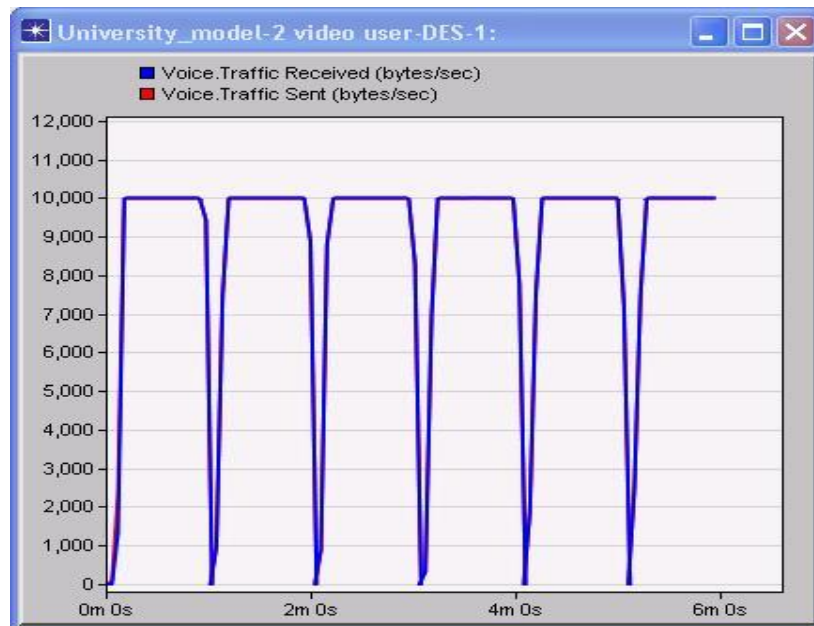
Πιο πάνω παρουσιάζεται το διάγραμμα στο οποίο συγκρίνεται ο συνολικός αριθμός των δεδομένων που εστάλησαν σε σχέση με αυτά που έφτασαν τελικά στο προορισμό τους για την εφαρμογή βίντεο του 7<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης στο οποίο φαίνεται πως τελικά μόνο ένα ποσοστό της τάξης του 5% έχει φτάσει

σωστά στο προορισμό του. Αποτέλεσμα το οποίο δεν είναι καθόλου καλό και σε καμία περίπτωση αποδεκτό για την μετάδοση δεδομένων βίντεο.



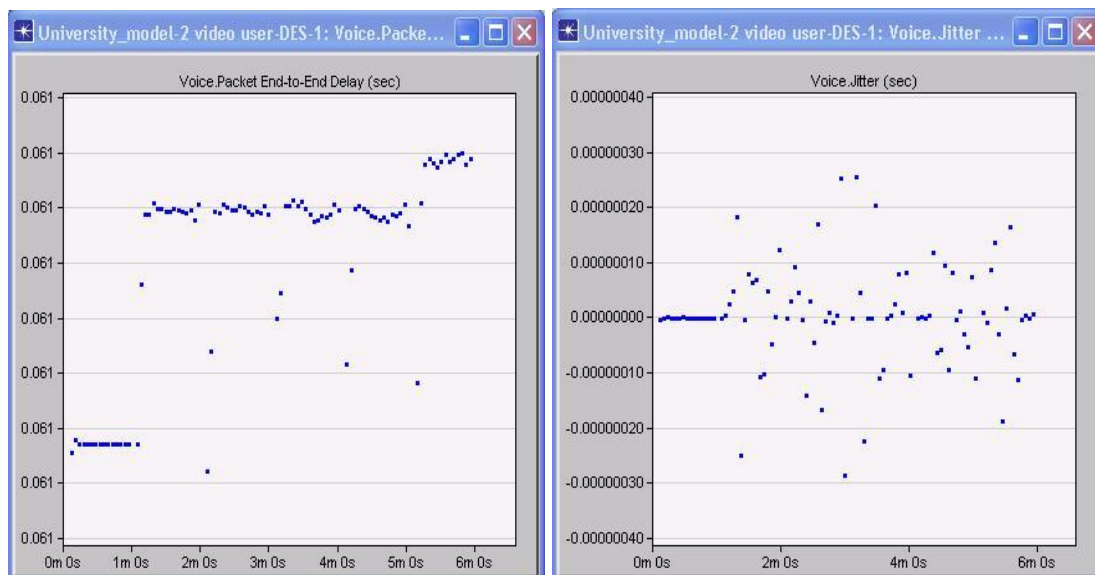
Εικόνα 87: Εφαρμογή Video: Από άκρο σε άκρο καθυστέρηση

Όπως ήταν αναμενόμενο μετά και τα προηγούμενα αποτελέσματα για το 7<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης στο παραπάνω διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η καθυστέρηση για την εφαρμογή βίντεο του δικτύου φαίνεται πως οι καθυστερήσεις φτάνουν ακόμα και τα 0,75 δευτερόλεπτα περίπου ή τα 750 millisecond το οποίο δεν είναι σε καμία περίπτωση αποδεκτό για την μετάδοση δεδομένων βίντεο.



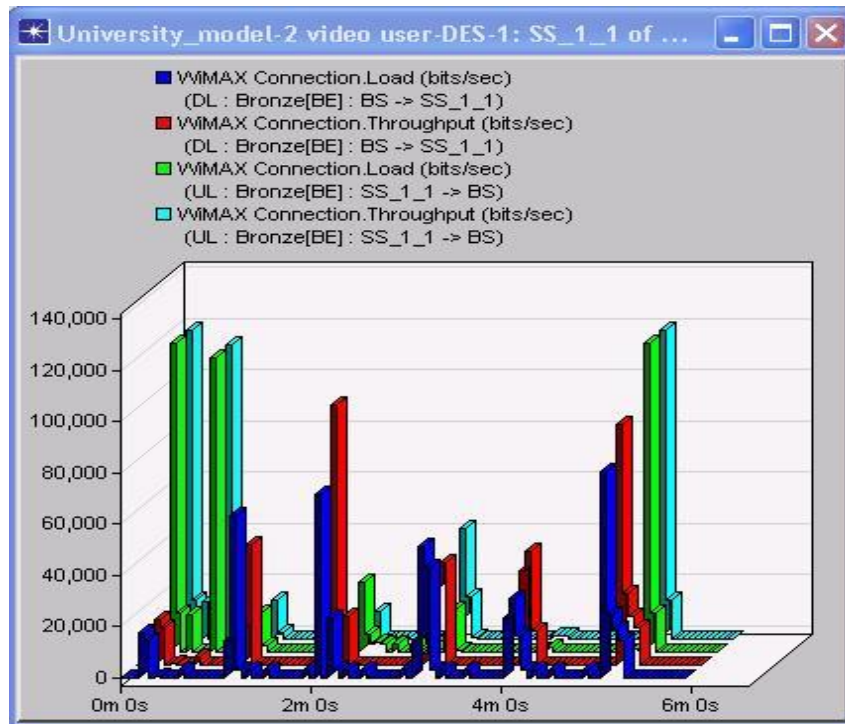
Εικόνα 88: Εφαρμογή VoIP: Traffic Received/sent

Συμφωνά με το παραπάνω διάγραμμα της εικόνας το οποίο παρουσιάζει τα δεδομένα που ελήφθησαν σε σχέση με αυτά που εστάλησαν για την εφαρμογή VoIP φαίνεται πως οι μεταδόσεις της εφαρμογής παραμένουν ανεπηρέαστες σε σχέση με τις αλλαγές που έγιναν και τα προηγούμενα αποτελέσματα του 7<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης δηλαδή η απώλεια σε δεδομένα παραμένει μηδενική όπως και στο 4<sup>ο</sup> σενάριο προσομοίωσης.



Εικόνα 89: Εφαρμογή Voice: Καθυστέρηση & Jitter

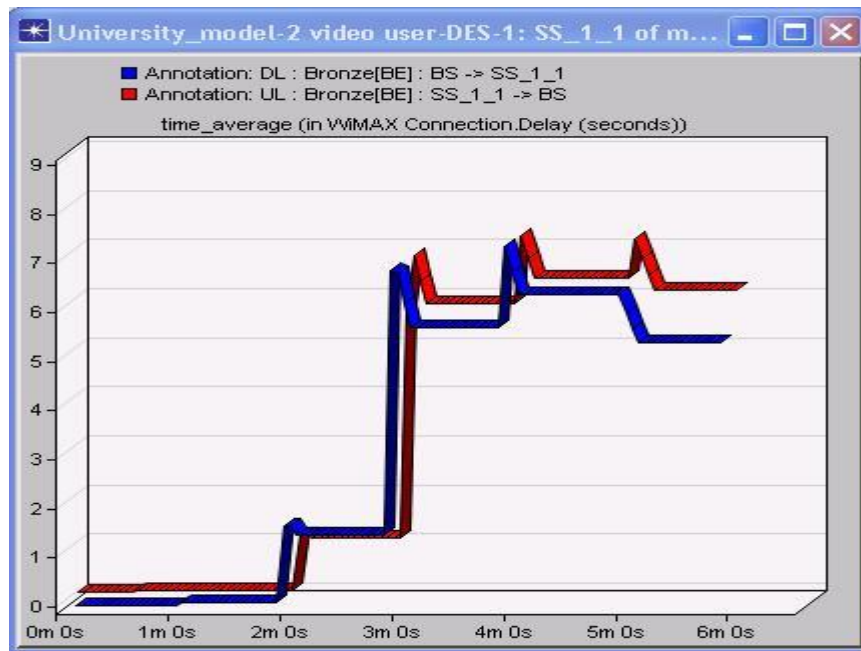
Στα δύο διαγράμματα της εικόνας 89 παρουσιάζετε η καθυστέρηση και το jitter για την εφαρμογή VoIP του σεναρίου. Οι μετρήσεις αυτές παραμένουν σε καλά επίπεδα αν και υπάρχει μία μικρή διακύμανση του jitter η οποία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα αποτελέσματα του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης. Τέλος, η εφαρμογή VoIP φαίνεται σχεδόν ανεπηρέαστη από τις αλλαγές που έγιναν στο δίκτυο.



Εικόνα 90: Download/Upload Load/throughput σταθμού SS\_1\_1

Στην παραπάνω εικόνα παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα από ένα σταθμό εργασίας ενός υποδικτύου WiMAX ο οποίος χρησιμοποιεί τις εφαρμογές HTTP, email και FTP. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται μία σύγκριση του load σε σχέση με το throughput για το downlink και για το uplink αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα υπάρχει μία μικρή απώλεια δεδομένων ιδιαίτερα για το downlink η οποία είναι πολύ μικρότερη απώλεια για το uplink.





Εικόνα 91: Υποδίκτυο WiMAX μέσος όρος καθυστέρησης

Τέλος, στο παραπάνω διάγραμμα πάλι για τον ίδιο σταθμό εργασίας που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η μέση καθυστέρηση κατά την διάρκεια του χρόνου προσομοίωσης για το downlink και για το uplink. Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται να υπάρχει μία συνεχής αύξηση της μέσης καθυστέρησης ώσπου καταλήγει περίπου στα 5 με 7 δευτερόλεπτα η οποία είναι αρκετά μεγάλη και κατά πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τα αποτελέσματα του 4<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης.

### 6.6.3 Συμπεράσματα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του 7<sup>ου</sup> σεναρίου προσομοίωσης

Παραπάνω έγινε μία προσπάθεια ώστε να μετρηθεί η χωρητικότητα σε βίντεο σταθμούς για τα πέντε υποδίκτυα WiMAX δηλαδή μέχρι πόσους βίντεο σταθμούς μπορεί να υποστηρίξει κάθε υποδίκτυο WiMAX. Χωρίς να αλλάξει ο συνολικός αριθμός των σταθμών ή οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται από αυτούς στο δίκτυο ένας σταθμός που χρησιμοποιούσε της εφαρμογές HTTP, email και FTP μετατράπηκε σε σταθμό βίντεο με ότι αλλαγές συνεπάγεται αυτό στις ρυθμίσεις του σταθμού αυτού. Άρα συνολικά υπάρχουν δύο σταθμοί σε κάθε υποδίκτυο

WiMAX και δέκα συνολικά σε όλο το δίκτυο οι οποίοι χρησιμοποιούν την εφαρμογή βίντεο.

Μετά την παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση του 7<sup>ου</sup> σεναρίου η χρήση δύο σταθμών βίντεο σε κάθε υποδίκτυο είναι απαγορευτική. Γιατί τα αποτελέσματα δείχνουν πως υπάρχει μεγάλη απώλεια σε δεδομένα και μεγάλες καθυστερήσεις ενώ δείχνουν να επηρεάζονται και οι μεταδόσεις των εφαρμογών HTTP, email και FTP σε ένα βαθμό. Τέλος, κάθε υποδίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μόνο ένα σταθμό βίντεο και συνολικά πέντε για όλα τα υποδίκτυα WiMAX.

# **Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα – μελλοντική μελέτη**

## **7.1 Συμπεράσματα προσομοιώσεων**

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είχε ως βασικό σκοπό την ανάπτυξη ενός δικτύου WiMAX με τη χρήση του προσομοιωτή *OPNET Modeler V16.0* ο οποίος είναι εγκατεστημένος και λειτουργεί στο Τμήμα Πληροφορικής του ΑΤΕΙΘ.

Μετά από την ανάπτυξη και την μελέτη διάφορων σεναρίων προσομοίωσης με τη βοήθεια του OPNET επειδή ήταν φύσης αδύνατο να παρουσιαστούν στα πλαίσια μίας πτυχιακής εργασίας όλη η έρευνα και η μελέτη που έγινε με την ανάπτυξη και ανάλυση διαφόρων σεναρίων προσομοίωσης επιλέχθηκε η ανάπτυξη ενός δικτύου το οποίο θα αφορά την εγκατάσταση του στο χώρο του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης.

Το δίκτυο αυτό αποτελείται από πέντε υποδίκτυα WiMAX και πενήντα σταθμούς εργασίας στο καθένα από αυτά (σύνολο 250 σταθμοί εργασίας), πέντε σταθμούς βάσης (ένα για κάθε υποδίκτυο WiMAX) και το δίκτυο κορμού το οποίο αποτελείται από τρεις δρομολογητές (routers) και πέντε εξυπηρετητές (servers) όπου κάθε ένας από αυτούς είναι υπεύθυνος για μία από τις πέντε εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν στο δίκτυο και αυτές είναι η εφαρμογή HTTP , η εφαρμογή ηλεκτρονικού ταχυδρομείου (Email), η εφαρμογή FTP, η εφαρμογή VoIP και η εφαρμογή Video (VoD).

Μέσω της ανάπτυξης διαφόρων σεναρίων που δημιουργήθηκαν με τη βοήθεια του προσομοιωτή *OPNET Modeler V16.0* και αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια αυτής της πτυχιακής εργασίας το συμπέρασμα είναι πως το δίκτυο στην αρχική του μορφή και μετά από κάποιες αλλαγές που έγιναν στις ρυθμίσεις του μπορεί να εξυπηρετήσει το φόρτο εργασίας που δημιουργείται από τις εφαρμογές που χρησιμοποιήθηκαν αποτελεσματικά και χωρίς απώλειες ή αλλά προβλήματα.

Όμως εδώ πρέπει να αναφερθεί πως μέσα από τις προσομοιώσεις που έγιναν για τη μέτρηση της χωρητικότητας σε σταθμούς εργασίας που χρησιμοποιούν τις εφαρμογές VoIP και VIDEO φάνηκε πως το δίκτυο σε αυτή του τη μορφή δεν μπορεί να υποστηρίξει μεγάλο αριθμό σταθμών που να χρησιμοποιούν αυτές τις δύο “βαριές” και ευαίσθητες σε καθυστέρηση εφαρμογές.

Συνεπώς ως γενικό συμπέρασμα προκύπτει πως ένα δίκτυο WiMAX μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τρόπος εναλλακτικής δικτύωσης σε ένα χώρο όπως το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο της Θεσσαλονίκης αλλά με κάποιους περιορισμούς όσο αναφορά τη χρήση εφαρμογών με μεγάλες απαιτήσεις σε bandwidth και ευαίσθητες σε καθυστερήσεις μετάδοσης όπως οι εφαρμογές βίντεο και φωνής που χρησιμοποιήθηκαν.

## 7.2 Μελλοντική μελέτη

Η εκπόνηση της παρούσης πτυχιακής εργασίας μπορεί να αποτελέσει μία αρκετά καλή βάση για την περαιτέρω ερεύνα για τη χρήση εναλλακτικών τρόπων δικτύωσης όπως αυτή της ασύρματης δικτύωσης WiMAX στο χώρο του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου της Θεσσαλονίκης. Επίσης, μπορεί να γίνει μία περαιτέρω ανάλυση στο γιατί το δίκτυο σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το προσομοιωτή του OPNET δεν μπορεί να υποστηρίξει την ύπαρξη μεγάλου αριθμού σταθμών εργασίας που να χρησιμοποιούν τις εφαρμογές βίντεο και φωνής όπως, για παράδειγμα, μπορεί να γίνει χρήση χαμηλότερης ποιότητας βίντεο ή μικρότερου όγκου δεδομένων από την εφαρμογή FTP. Τέλος, θα μπορούσαν να προστεθούν και περαιτέρω στοιχεία στην ερεύνα αυτή, όπως νέες εφαρμογές που θα μπορούσαν να υποστηριχθούν ή την εξολοκλήρου ανάπτυξης του δικτύου για ένα συγκεκριμένο σκοπό όπως τηλεφωνικών συνδιαλέξεων με τη χρήση VoIP.

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. G. S. V. Radha Krishna, Rao G. Radhamani, “*WiMAX A Wireless Technology Revolution*”, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, Boca Raton New York, 2008.
2. Frank Ohrtman, “*WiMAX Handbook Building 802.16 Wireless Networks*”, McGraw-Hill, United States, 2005.
3. Syed Ahson, Mohammad Ilyas, “*WiMAX Standards and Security*”, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2008.
4. Syed Ahson, Mohammad Ilyas, “*WiMAX Technologies, Performance Analysis and QoS*”, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2008.
5. Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh, Rias Muhamed, “*Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking*”, Prentice Hall, United States, 2007.
6. William Stallings, ” *WIRELESS COMMUNICATIONS AND NETWORKS SECOND EDITION*”, Pearson Prentice Hall, United States of America, 2005
7. Benny Bing, ” *Emerging Technologies in Wireless LANs Theory, Design, and Deployment*”, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, Cambridge, 2008.
8. Yang Xiao, ” *WiMAX/MobileFi Advanced Research and Technology*”, Auerbach Publications Taylor & Francis Group, United States, 2008.
9. Ping Chung Ng, Soung Chang Liew, Chinlon Lin, ” *Voice over Wireless LAN via IEEE 802.16 Wireless MAN and IEEE 802.11 Wireless Distribution System*”, Department of Information Engineering The Chinese University of Hong Kong, 2010.

10. Will Hrudey, Ljiljana Trajković, “*Streaming Video Content Over IEEE 802.16/WiMAX Broadband Access*”, Simon Fraser University Vancouver, British Columbia, 2010.
11. Iwan Adhicandra, “*Measuring Data and VoIP Traffic in WiMAX Networks*”, JOURNAL OF TELECOMMUNICATIONS, 2010.
12. Jong Min Lee, Hyo-Jin Park, Seong Gon Choi, Jun Kyun Choi, “*Adaptive Hybrid Transmission Mechanism for On-Demand Mobile IPTV Over WiMAX*”, IEEE TRANSACTIONS ON BROADCASTING, 2009.
13. Eun-Chan Park, “*Efficient Uplink Bandwidth Request with Delay Regulation for Real-Time Service in Mobile WiMAX Networks*”, IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, 2009.
14. Howon Lee, Taesoo Kwon, Dong-Ho Cho, Geunhwi Limt, Yong Changt, “*Performance Analysis of Scheduling Algorithms for VoIP Services in IEEE 802.16e Systems*”, Department of Electrical Engineering and Computer Science Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Korea, 2010.
15. Ehsan Haghani, Shyam Parekh, Doru Calin, Eunyoung Kim, Nirwan Ansari, “*A Quality-Driven Cross-Layer Solution for MPEG Video Streaming Over WiMAX Networks*”, IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA, 2009.
16. ZHOU Lian-ying, JI Wei-wei, “*A study on the application of WiMAX accesstechnology in IPTV system*”, 2010 Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, 2010.
17. Duangporn Aphiraksatyakul, Boon-Chong Seet, Chiew-Tong Lau, “*Evaluation of Terrain Effects on Mobile WiMax in a Vehicular Environment*”, School of Computer Engineering, Nanyang Technological University, Singapore Department of Electrical and Electronic Engineering, Auckland University of Technology, New Zealand, 2008.

18. Ioan Vlad Uilecan, Chi Zhou, Guillermo E. Atkin, “*Framework for Delivering IPTV Services over WiMAX Wireless Networks*”, IEEE EIT 2007 Proceedings, 2007.
19. B. Kaarthick, N.Nagarajan, “*Performance analysis of Video Conferencing and Multimedia application Services over WiMAX*”, 2009 IEEE International Advance Computing Conference (IACC 2009) Patiala, India, 2009.
20. Pedro Neves, Francisco Fontes, Joao Monteiro, Susana Sargento, Thomas M. Bohnert, “*Quality of Service Differentiation Support in WiMAX Networks*”, IEEE, 2008.
21. Gang Zhang, Chungui Liu, Feng Wang, Hongai Jiao, “*Quality of Service Scheduling Based on GPSS in IEEE 802.16 WiMax Networks*”, Department of Computer Science, Tianjin University, Department of Computer Science, Datong University, China, 2008.
22. Aguado, M., Jacob E., Saiz P., Matias, J., Higuero M., Toledo, N. Berbineau, “*Scanning on handover enhancement issues in video application deployments on WiMAX Mobile Networks*”, Univ. of Basque Country (UPV-EHU) ,Bilbao, Spain, 2008.
23. Ehsan Haghani, Shyam Parekh, Doru Calin, Eunyoung Kim, Nirwan Ansari, “*A Quality-Driven Cross-Layer Solution for MPEG Video Streaming Over WiMAX Networks*”, IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA, 2009.
24. Dai-Boong Lee, Wan Kim, Hwangjun Song, “*An Effective Mobile IPTV Channel Control Algorithm over WiMAX Network*”, IEEE CCNC, 2010.
25. Duangporn Aphiraksatyakul , Boon-Chong Seet , Chiew-Tong Lau, “*Evaluation of Terrain Effects on Mobile WiMax in a Vehicular Environment*“, IEEE, 2008.

26. B. Kaarthick, N.Nagarajan, “*Exploiting the Flexibility of MAC layer in WiMAX Networks for improved Data and VoIP traffic*”, 2008 International Conference on Computing, Communication and Networking (ICCCN 2008), 2008.
27. Po-Han Wu, Yu Hen Hu, Jenq-Neng Hwang, “*Optimal Layered Video IPTV Multicast Streaming over IEEE 802.16e WiMAX Systems*”, IEEE, 2010.
28. Khishigjargal Gonchigsumlaa, Young-II Kim, “*The Simulation Model of Multicast and Broadcast Service in the Mobile WiMAX for Qualnet*”, ICACT, 2010.
29. OPNET, <http://www.opnet.com>
30. IEEE Explore, <http://ieeexplore.ieee.org/>
31. <http://www.freewimaxinfo.com/how-wimax-works.html>
32. <http://6monthsindustrialtraining.wordpress.com/2010/08/22/wimax-bwa-india-auction-details-wimax-spectrum-allocation-circle-wise-in-india/>