



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ  
ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη και Σύγκριση Αλγορίθμων Πρόβλεψης  
σε Δίκτυα Πρόσβασης WiMAX.**

**Απροικίδης Κωνσταντίνος  
Α.Ε.Μ. 195**

**Επιβλέποντες Καθηγητές:  
Αναπληρωτής Καθηγητής: Παντελής Αγγελίδης  
Λέκτορας βάσει Π.Δ. 407/80: Παναγιώτης  
Σαρηγιαννίδης**

**Κοζάνη (Οκτώβριος 2013)**



## Περίληψη

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη και η σύγκριση αλγορίθμων πρόβλεψης σε δίκτυα πρόσβασης WiMAX. Στο βιβλιογραφικό της μέρος επικεντρώνεται στη παρουσίαση των ευρυζωνικών δικτύων και ειδικότερα του WiMAX και στην εκτενή μελέτη στο θεωρητικό υπόβαθρο των αλγορίθμων. Στο ερευνητικό της μέρος, εστιάζουμε στις αποκρίσεις των αλγορίθμων σε δεδομένα κίνησης WiMAX και καταλήγουμε σε παρατηρήσεις που προκύπτουν από αυτές. Οι στόχοι της εργασίας περιληπτικά είναι οι εξής:

- Μελέτη και παρουσίαση των ασύρματων ευρυζωνικών δικτύων γενικότερα και ειδικότερα του ασύρματου δικτύου WiMAX.
- Μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου των αλγορίθμων πρόβλεψης Παρεκτροπή , Αυτόματα Εκμάθησης, Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ και εμβάθυνση σε αυτούς με πρακτικά παραδείγματα.
- Ανάπτυξη και προσομοίωση των εν λόγω αλγορίθμων τόσο σε δοκιμαστικό περιβάλλον όσο και σε πραγματικά δεδομένα ενός ασύρματο δικτύου WiMAX.
- Συγκριτικά αποτελέσματα και προτάσεις.

Η προσομοίωση των αλγορίθμων επιτεύχθηκε από την αρχή με την γλώσσα προγραμματισμού Matlab, με τη χρήση γεγονοδηγούμενου προγραμματισμού. Τα συγκριτικά συμπεράσματα προκύπτουν μέσα από γραφικές παραστάσεις απόδοσης με βάση τα αποτελέσματα που εξάγονται από συγκεκριμένα σενάρια προσομοίωσης. Ακόμη για την καταγραφή και την επεξεργασία δεδομένων κίνησης WiMAX έγινε χρήση το ανοιχτού κώδικα προγράμματος Wireshark που χρησιμοποιείται για ανάλυση πρωτοκόλλων του διαδικτύου.

Η διπλωματική αυτή περιλαμβάνει συνολικά 5 κεφάλαια. Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια γενική αναφορά στα ευρυζωνικά δίκτυα, ενώ στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφονται η δομή και οι βασικές λειτουργίες του WiMAX. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναλύονται οι αλγόριθμοι πρόβλεψης και παρέχονται παραδείγματα για την κατανόηση τους. Τέλος στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γραφήματα της προσομοίωσης των σεναρίων και οι παρατηρήσεις που απορρέουν από αυτά και στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο καταλήγουμε σε κάποια συμπεράσματα για τους αλγόριθμους και κάνουμε κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία.

## **Abstract**

This diploma thesis endeavors to classify study and evaluate three of the most used prediction tools in telecommunication networking. These algorithms have been applied in a realistic WiMAX environment, where real traffic traces have been employed as an input to the prediction framework. The thesis has the following structure:

- Study and presentation of wireless broadband networks generally and WiMAX specifically.
- Study of the prediction algorithm theoretical foundations Extrapolation, Learning Automata, Hidden Markov chains and practical examples for better understanding.
- Algorithms development and simulation to test environment and real data of WiMAX wireless network as well.
- Comparative conclusions and proposals.

The simulation algorithms achieved from the beginning with the Matlab programming with the use of event-driven programming. The comparative conclusions obtained through performance graphs based on the results of specific simulation scenarios. In addition, with the open source program Wireshark that is used for network protocol analyzing was used for WiMAX traffic data registration and elaboration.

This thesis includes a total of five chapters: the first chapter includes a reference to the broadband networks, the second chapter presents the WiMAX structure and basic functions. In the third chapter prediction algorithms are demonstrated and examples for understanding are provided. In the fourth chapter evaluation scenarios graphs are demonstrated and observations arising from these. Finally, in the fifth chapter algorithms conclusions and proposals for future work are presented.

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας και συγκεκριμένα τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Αγγελίδη Παντελή και τον καθηγητή (Π.Δ. 407/80) κ. Σαρηγιαννίδη Παναγιώτη για την υπομονή, την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την βοήθεια και την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, τους καθηγητές και όλους όσους ήταν δίπλα μου όλα αυτά τα χρόνια και με βοήθησαν να φέρω εις πέρας τους στόχους μου.

# Περιεχόμενα

1. Ευρυζωνικότητα.....	9
1.1 Εισαγωγή .....	9
1.2 Εξέλιξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας.....	13
1.3 Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου περιορισμένης ζώνης.....	15
1.4 Συστήματα ευρυζωνικότητας πρώτης γενιάς .....	16
1.5 Δεύτερης γενιάς ευρυζωνικά συστήματα.....	19
1.6 IEEE Working Group Standardization Bodies .....	20
1.7 Το WiMAX και άλλες τεχνολογίες ασύρματης ευρυζωνικότητας.....	23
2. WiMAX.....	25
2.1 Εισαγωγή στο WiMAX.....	25
2.2 Τα πρότυπα IEEE 802.16 και ETSI HiperMAN.....	26
2.3 Αρχιτεκτονική του δικτύου WiMAX.....	33
2.3.1 Τοπολογία σταθερού WiMAX .....	33
2.3.1 Τοπολογία κινητού WiMAX.....	35
2.4 Φυσικό επίπεδο του WiMAX.....	36
2.4.1 Βασική θεωρία του OFDM.....	36
2.4.2 Ομαδοποίηση Υποδιαύλων και Δομή Πλαισίου WiMAX.....	38
2.4.3 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο WiMAX .....	40
2.5 WiMAX Mac layer .....	42
2.5.1 Επισκόπηση .....	42
2.5.2 Ποιότητα Υπηρεσιών.....	44
2.5.3 Λειτουργίες ασφάλειας.....	46
2.5.4 Υποστήριξη Κινητικότητας.....	47
3. Αλγόριθμοι Πρόβλεψης .....	50
3.1 Εισαγωγή στην Πρόβλεψη .....	50
3.2 Εισαγωγή Στην Παρεμβολή (Interpolation) .....	51
3.2.1 Πολυωνυμική προσέγγιση Lagrange.....	52
3.2.2 Παραδείγματα με παρεμβολή πολυωνύμου Lagrange.....	55
3.2.3 Παρεμβολή με συναρτήσεις Σφήνας .....	58
3.2.4 Παρεκτροπή (Extrapolation) Richardson's .....	61
3.3 Αυτόματα Εκμάθησης (Learning Automata) .....	65

3.3.1	Εισαγωγή .....	65
3.3.2	Αυτόματο Εκμάθησης.....	69
3.3.3	Περιβάλλον.....	71
3.3.4	Σχέδια ενίσχυσης.....	72
3.3.5	Ιεραρχημένη Δομή Αυτομάτων Εκμάθησης.....	74
3.3.6	Ομαλοποίηση και προβολή.....	75
3.4	Εισαγωγή στις κρυφές Αλυσίδες Markov (Hidden Markov Chains).....	80
3.4.1	Στοχαστικές Διαδικασίες και Αλυσίδες Markov.....	80
3.4.2	Εισαγωγή στις κρυφές Αλυσίδες Markov.....	82
3.4.3	Μοντέλα γραμμικών συστημάτων.....	83
3.4.4	Χρονικά Εξαρτώμενες Διαδικασίες .....	84
3.4.5	Ορισμός της κρυφής αλυσίδας Markov .....	85
3.4.6	Παραδείγματα με HMM.....	86
4.	Προσομοίωση στη Matlab.....	91
4.1	Εισαγωγή .....	91
4.2	Προσομοίωση.....	91
4.3	Ανάλυση των αλγορίθμων και παραδείγματα εκτέλεσης .....	93
4.3.1	Αλγόριθμος Παρεκτροπής (Extrapolation).....	93
4.3.2	Αλγόριθμος Αυτόματο Εκμάθησης (AE).....	96
4.3.3	Αλγόριθμος Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ (Hidden Markov Chains).....	99
4.4	Επεξεργασία Φόρτου κίνησης WiMAX.....	102
4.4.1	Επεξεργασία Φόρτου κίνησης στο Wireshark.....	102
4.4.2	Επεξεργασία Φόρτου κίνησης στη Matlab .....	105
4.5	Παρουσίαση Γραφημάτων Προσομοίωσης .....	110
4.5.1	Δεύτερο Σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις και αποτελέσματα.....	110
4.5.2	Τρίτο Σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις και αποτελέσματα.....	120
4.5.3	Συγκριτικά Γραφήματα.....	127
5.	Συμπεράσματα .....	138
	Βιβλιογραφία .....	141
	Παραρτήματα.....	147
I)	Παράρτημα Πινάκων.....	147
II)	Παράρτημα Γραφημάτων .....	148
III)	Παράρτημα Γλωσσάρι.....	150





---

## 1. Ευρυζωνικότητα

---

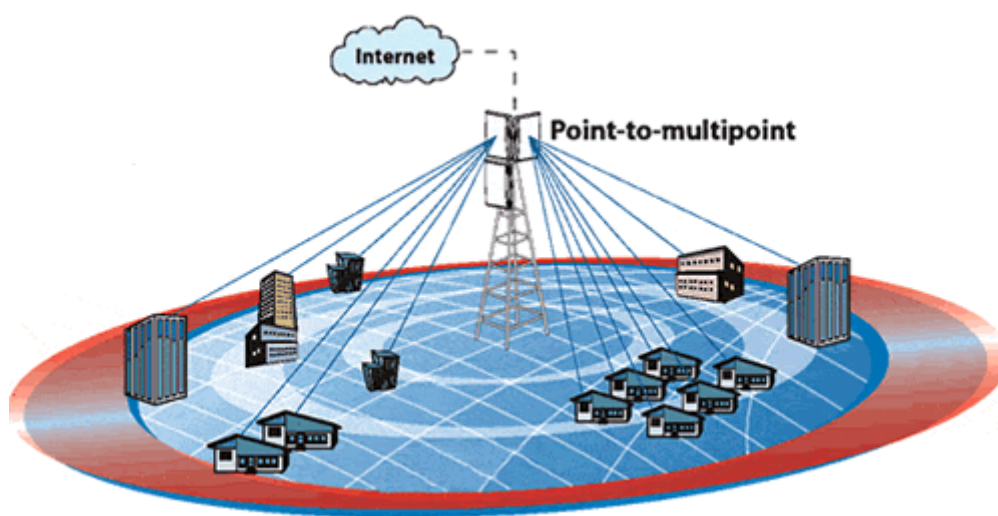
### 1.1 Εισαγωγή

Οι ασύρματες τεχνολογίες και ειδικότερα οι ασύρματες επικοινωνίες αποτελούν αυτή τη στιγμή τον πιο ραγδαία αναπτυσσόμενο κλάδο των τεχνολογικών επιστημών. Κατά τη δεκαετία του 1980 η ιδέα της ασύρματης επικοινωνίας αποτελούσε μια απλή θεωρητική ουτοπία. Όταν ο R.Metcalfε συνέλαβε και υλοποίησε την ιδέα του Ethernet, πιθανόν να μη μπορούσε να συλλάβει και το ότι και ο αιθέρας που υπήρχε μέσα στα απτά καλώδια των LANs για να μεταδοθεί η πληροφορία, θα μπορούσε να μετατραπεί στο απλούστερο δυνατό αέριο μέσο, τον αέρα που υπάρχει γύρω μας, χωρίς είτε καλώδια είτε κάποιο άλλο υλικό μέσο.

Έκτοτε η ασύρματη τεχνολογία άρχισε να εξελίσσεται τόσο πολύ, ώστε σήμερα να θεωρείται το *de facto standard* για την υλοποίηση τηλεπικοινωνιακών αναγκών. Σήμερα οι ασύρματες τεχνολογίες στις τηλεπικοινωνίες έχουν προχωρήσει απίστευτα πολύ και χρησιμοποιούνται στις κινητές τηλεπικοινωνίες, τα αμυντικά συστήματα, την τηλεκπαίδευση, την τηλεϊατρική, την ψηφιακή τηλεόραση και σε πολλές άλλες υπηρεσίες.

Η Ασύρματη Ευρυζωνικότητα βρίσκεται στη συμβολή των δύο από τις πιο αξιόλογες ιστορίες ανάπτυξης στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών τα πρόσφατα χρόνια, των ασύρματων συστημάτων και της ευρυζωνικότητας. Τόσο τα ασύρματα συστήματα όσο και η ευρυζωνικότητα γνωρίζουν ραγδαία ανάπτυξη και διάδοση στην αγορά. Από 11 εκατομμύρια συνδρομητές σε όλον τον κόσμο το 1990, οι ασύρματες κινητές υπηρεσίες αυξήθηκαν σε περισσότερους από 2 δισεκατομμύρια το 2005. Το Internet, από παράξενο ακαδημαϊκό όργανο, εξελίχθηκε σε μέσο εργαλείο ενός δισεκατομμυρίου χρηστών. Αυτή η εκπληκτική εξάπλωση του Internet οδηγεί στην απαίτηση για πιο γρήγορες υπηρεσίες πρόσβασης στο Internet και, κατά συνέπεια, σε μια

παράλληλη αύξηση της υιοθέτησης της ευρυζωνικότητας. Σε λιγότερο από μία δεκαετία, οι ευρυζωνικοί συνδρομητές παγκοσμίως αυξήθηκαν στην πραγματικότητα από 0 σε περισσότερους από 200 εκατομμύρια. Το επόμενο όριο για την εξέλιξη της βιομηχανίας των ασύρματων τηλεπικοινωνιών θα είναι ο συνδυασμός της πρακτικότητας των ασύρματων συστημάτων με τις πλούσιες επιδόσεις της ευρυζωνικότητας. Εύλογα, εγείρονται τα ερωτήματα αν ένας τέτοιος συνδυασμός μπορεί να είναι τεχνικά και εμπορικά βιώσιμος και αν τα ασύρματα συστήματα μπορούν να προσφέρουν εφαρμογές και υπηρεσίες ευρυζωνικότητας που θα ενδιαφέρουν τους τελικούς χρήστες.



**Εικόνα 1.1 Ασύρματη Ευρυζωνικότητα**

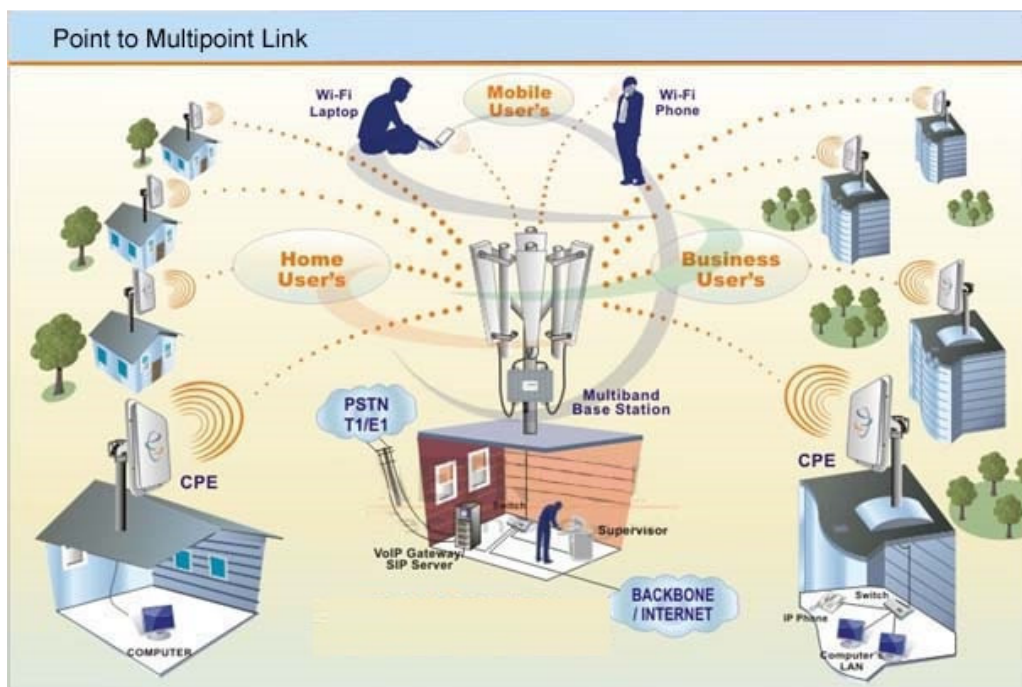
Πριν εμβαθύνουμε στην ασύρματη ευρυζωνικότητα, θα πρέπει να εξετάσουμε την κατάσταση της ευρυζωνικής πρόσβασης σήμερα. Οι κυρίαρχες τεχνολογίες ευρυζωνικής πρόσβασης στην αγορά σήμερα είναι η τεχνολογία DSL, η οποία προσφέρει τις ευρυζωνικές συνδέσεις μέσω τηλεφωνικών καλωδίων συνεστραμμένου ζεύγους και η τεχνολογία καλωδιακού μόντεμ, η οποία υλοποιείται μέσω των εγκαταστάσεων ομοαξονικών καλωδίων τηλεόρασης. Και οι δύο τεχνολογίες συνήθως παρέχουν έως και μερικά megabits ανά δευτερόλεπτο δεδομένων σε κάθε χρήστη και οι διαρκείς εξελίξεις καθιστούν εφικτή τη μεταφορά αρκετών δεκάδων megabits ανά δευτερόλεπτο. Από την αρχική τους υλοποίηση στα

τέλη της δεκαετίας του 1990, αυτές οι υπηρεσίες απολαμβάνουν σημαντική ανάπτυξη. Στις Η.Π.Α. υπάρχουν περισσότεροι από 50 εκατομμύρια «ευρυζωνικοί» συνδρομητές, εκ των οποίων οι περισσότεροι από τους μισούς είναι οικιακοί χρήστες του Internet. Η διαθεσιμότητα μιας ασύρματης λύσης για την ευρυζωνικότητα θα μπορούσε δυνητικά να επιταχύνει την ανάπτυξη της.

Ποιες είναι οι εφαρμογές που καθοδηγούν αυτήν την ανάπτυξη; Οι χρήστες της ευρυζωνικότητας παγκοσμίως διαπιστώνουν ότι αλλάζει δραματικά τον τρόπο που ανταλλάσσουμε πληροφορίες, εργαζόμαστε και διασκεδάζουμε. Η ευρυζωνική πρόσβαση δεν παρέχει μόνο ταχύτερη περιήγηση στο Web και γρήγορες λήψεις αλλά δίνει την ευκαιρία για υλοποίηση αρκετών εφαρμογών πολυμέσων, όπως αναπαραγωγή ήχου και βίντεο σε πραγματικό χρόνο, τηλεδιασκέψεις με πολυμέσα και διαδραστικά παιχνίδια. Οι ευρυζωνικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται, επίσης, για τηλεφωνία-μετάδοσης φωνής υιοθετώντας την τεχνολογία φωνής μέσω πρωτοκόλλου Internet (VoIP). Πιο προηγμένα συστήματα ευρυζωνικής πρόσβασης, όπως οι οπτικές ίνες (FTTH) και ο ψηφιακός βρόγχος συνδρομητών πολύ υψηλής ταχύτητας για μετάδοση δεδομένων (VDSL) προσφέρουν εφαρμογές βίντεο υψηλής ποιότητας, όπως τηλεόραση υψηλής ευκρίνειας (HDTV) και βίντεο κατά απαίτηση (VoD). Καθώς η αγορά της ευρυζωνικότητας θα συνεχίσει να αυξάνεται, είναι πιθανό, να εμφανιστούν αρκετές νέες εφαρμογές και είναι δύσκολο να προβλέψουμε ποιες θα έχουν επιτυχία στο μέλλον.

Τι είναι λοιπόν η ασύρματη ευρυζωνικότητα; Η ασύρματη ευρυζωνικότητα είναι η μεταφορά της ευρυζωνικής εμπειρίας σε ασύρματο πλαίσιο, το οποίο προσφέρει στους χρήστες κάποια μοναδικά πλεονεκτήματα και ευκολίες. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι υπηρεσιών ασύρματης ευρυζωνικότητας. Ο πρώτος τύπος επιχειρεί να παρέχει ένα σύνολο υπηρεσιών παρόμοιες με αυτές της παραδοσιακής ευρυζωνικής σταθερής γραμμής, χρησιμοποιώντας όμως ασύρματα μέσα για μετάδοση. Αυτός ο τύπος ο οποίος ονομάζεται σταθερή ασύρματη ευρυζωνικότητα, μπορεί να θεωρηθεί ως μία ανταγωνιστική εναλλακτική πρόταση για το DSL ή το καλωδιακό διαμορφωτή / αποδιαμορφωτή. Ο δεύτερος τύπος ασύρματης ευρυζωνικότητας, η επονομαζόμενη κινητή ευρυζωνικότητα, προσφέρει τις

επιπλέον λειτουργίες της φορητότητας, της νομαδικότητας και της κινητικότητας. Η κινητή ευρυζωνικότητα επιχειρεί να οδηγήσει τις ευρυζωνικές εφαρμογές σε νέες εμπειρίες για τους χρήστες, προσφέροντας μία πολύ διαφορετική ποιοτικά πρόταση. Η τεχνολογία WiMAX, έχει σχεδιαστεί ώστε να εξυπηρετεί τόσο τις σταθερές όσο και τις κινητές ευρυζωνικές εφαρμογές.



**Εικόνα 1.2 Ζεύξη σημείο προς σημείο**

Κάνοντας μια ανασκόπηση του τρόπου με τον οποίο η συντριπτική πλειοψηφία των σημερινών χρηστών πλοηγείται στο διαδίκτυο, μάλλον η πιο συνηθισμένη εικόνα που σχηματίζει κανείς στο μυαλό του είναι αυτή των καλωδίων που απαιτούνται για τη σύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή με κάποιο modem ή router. Η πρόσβαση στο Internet μέσω ενσύρματων δικτύων μπορεί να παρουσιάζει σαν πλεονέκτημα την υψηλή σταθερότητα της σύνδεσης, ωστόσο περιορίζει σημαντικά την ευελιξία του χρήστη, ο οποίος θα πρέπει να βρίσκεται σε ένα σταθερό σημείο προκειμένου να χρησιμοποιήσει τις υπηρεσίες του διαδικτύου.

Τα τελευταία χρόνια γνώρισε σημαντική απήχηση σε παγκόσμια κλίμακα μια εξελιγμένη τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης, το Wi-Fi, το οποίο απλοποιεί τις διαδικασίες σύνδεσης ενός χρήστη με το Internet. Το Wi-Fi όμως, αν και αρκετά απλό στη χρήση, δεν έφερε την πραγματική

επανάσταση, που όλοι περίμεναν και αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περιορισμένη εμβέλεια της κάλυψής του. Στην πραγματικότητα η εν λόγω τεχνολογία αξιοποιήθηκε κυρίως για σύνδεση ηλεκτρονικών υπολογιστών και δρομολογητών (routers) σε οικιακούς ή εταιρικούς χώρους και όχι για την παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet σε μια γεωγραφικά εκτεταμένη περιοχή. Με την εμβέλειά του να περιορίζεται στα 100μέτρα, δεν θα μπορούσε φυσικά να περιμένει κανείς κάτι διαφορετικό.

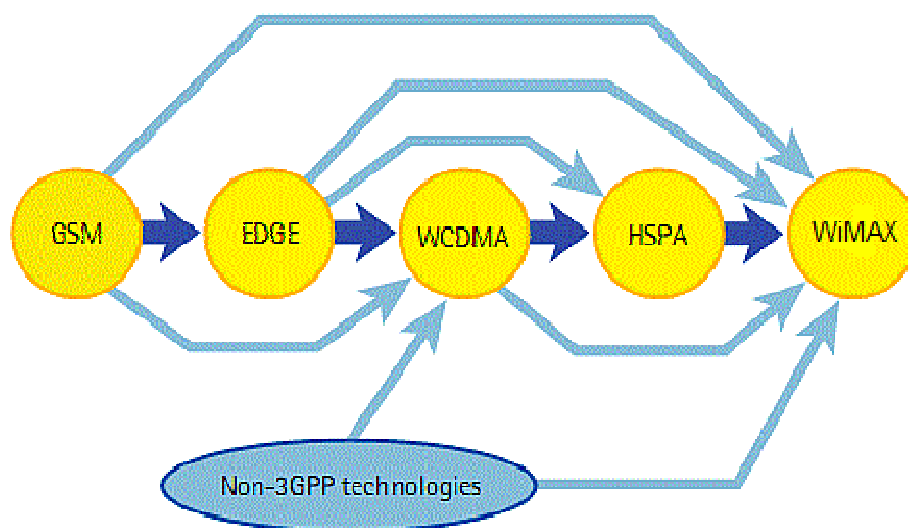
Το μειονέκτημα της περιορισμένης εμβέλειας του Wi-Fi άφησε σαν μοναδική λύση για τους χρήστες που επιθυμούν μόνιμη πρόσβαση στο διαδίκτυο εν κινήσει, τη χρήση των τεχνολογιών GPRS και 3G, μέσω των GSM και UMTS δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι εν λόγω τεχνολογίες προσφέρουν μεν σταθερή σύνδεση σε κάθε σημείο όπου υπάρχει κάλυψη σήματος από το δίκτυο, κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι ο συνδρομητής μπορεί να πλοηγείται στα web sites που τον ενδιαφέρουν, να «κατεβάζει» τα e-mail του και να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε άλλη υπηρεσία του Internet ακόμη και στη διάρκεια ενός ταξιδιού από τη μία άκρη μιας χώρας στην άλλη, χωρίς καμία σχεδόν διακοπή της σύνδεσης.

Όμως τόσο το GPRS όσο και το 3G διαθέτουν ένα σημαντικό μειονέκτημα, που κράτησε μειωμένη τη συνδρομητική βάση: τις υψηλές χρεώσεις. Παρόλο που ο χρήστης είναι σε συνεχή σύνδεση με το Internet, χωρίς να υφίσταται χρονοχρέωση, η κοστολόγηση της πρόσβασης γίνεται σύμφωνα με τον όγκο των διακινούμενων δεδομένων. Ενδεικτικά στη χώρα μας, 1 MB δεδομένων που στέλνει ή λαμβάνει ο συνδρομητής GPRS/3G φθάνει να κοστολογείται μέχρι και 5 ευρώ, κάτι που καθιστά απαγορευτική τη χρήση της υπηρεσίας ακόμη και για πλοήγηση σε web sites λίγα λεπτά καθημερινά.

## **1.2 Εξέλιξη της ασύρματης ευρυζωνικότητας**

Η ιστορία της ασύρματης ευρυζωνικότητας, σε σχέση με το WiMAX, ξεκινά από την επιθυμία για εύρεση μιας ανταγωνιστικής εναλλακτικής λύσης

αντί των τεχνολογιών ενσύρματης πρόσβασης. Η απελευθέρωση της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών και η ραγδαία ανάπτυξη του Internet παρείχαν ώθηση ώστε αρκετοί ανταγωνιστικοί φορείς να προσπαθήσουν να βρουν μία ασύρματη λύση που θα παρέκαμπτε τους δεσμευτικούς παρόχους υπηρεσιών. Αρκετά συστήματα ασύρματης πρόσβασης, κυρίως από νέες εταιρείες που είχαν ως κίνητρο την πολύ ενδιαφέρουσα προοπτική των ασύρματων συστημάτων, αναπτύχθηκαν κατά την προηγούμενη δεκαετία. Αυτά τα συστήματα παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές στις επιδόσεις, τα πρωτόκολλα, το φάσμα συχνοτήτων που χρησιμοποιούσαν, στις εφαρμογές που υποστήριζαν και σε πολλές άλλες παραμέτρους. Μερικά συστήματα υλοποιήθηκαν, αλλά πολύ σύντομα παροπλίστηκαν. Οι επιτυχημένες υλοποιήσεις έως τώρα περιορίζονται σε λίγες εφαρμογές και αγορές. Είναι σαφές ότι η ασύρματη ευρυζωνικότητα έως τώρα παρουσιάζει ένα πολύμορφο μητρώο, εν μέρει εξαιτίας του κατακερματισμού της βιομηχανίας, ο οποίος οφείλεται στην έλλειψη ενός κοινού προτύπου. Η εμφάνιση του WiMAX ως βιομηχανικό πρότυπο αναμένεται να αλλάξει αυτήν την κατάσταση.



**Εικόνα 1.3 Εξέλιξη της Ευρυζωνικότητας**

Δεδομένης της ποικιλίας των λύσεων που αναπτύχθηκαν και υλοποιήθηκαν για την ασύρματη ευρυζωνικότητα στο παρελθόν, μία

ολοκληρωμένη ιστορική έρευνα αυτών των λύσεων δεν είναι κάτι που θα μας απασχολήσει σε αυτήν την ενότητα. Αντίθετα, θα παρουσιάσουμε μία σύντομη επισκόπηση μερικών γενικών μοτίβων αυτής της εξέλιξης.

Η τεχνολογία WiMAX εξελίχθηκε σε τέσσερα στάδια, αν και δεν είναι πλήρως διακριτά και δεν ακολουθούν μία καθαρή σειριακή πορεία: (1) ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου περιορισμένης ζώνης, (2) συστήματα ευρυζωνικότητας πρώτης γενιάς με οπτική επαφή (LOS), (3) συστήματα ευρυζωνικότητας δεύτερης γενιάς χωρίς την οπτική επαφή (NLOS) και (4) ασύρματα συστήματα ευρυζωνικότητας που βασίζονται σε πρότυπα.

### **1.3 Ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου περιορισμένης ζώνης**

Η τηλεφωνία μετάδοσης φωνής ήταν, όπως είναι φυσικό, η πρώτη εφαρμογή για την οποία αναπτύχθηκε και υλοποιήθηκε μία ασύρματη εναλλακτική πρόταση. Αυτά τα συστήματα, τα οποία ονομάστηκαν ασύρματα συστήματα τοπικού βρόγχου (WLL), είχαν σχετική επιτυχία σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, η Ινδονησία, η Βραζιλία και η Ρωσία, στις οποίες η υψηλή ζήτηση για βασικές τηλεφωνικές υπηρεσίες δεν μπορούσε να εξυπηρετηθεί από την υπάρχουσα υποδομή. Στην πραγματικότητα, τα συστήματα WLL που βασίζονται στα πρότυπα DECT (ασύρματη τηλεφωνία ψηφιακά βελτιωμένη) και CDMA (Διαχωρισμός με κωδικοποίηση πολλαπλής πρόσβασης) συνεχίζουν να εφαρμόζονται σε αυτές τις αγορές.

Στις αγορές στις οποίες ήδη υπήρχαν στιβαρές υποδομές τοπικού βρόγχου για την τηλεφωνία μετάδοσης φωνής, τα συστήματα WLL έπρεπε να προσφέρουν επιπλέον λειτουργίες προκειμένου να είναι ανταγωνιστικά. Μετά την εμπορευματοποίηση του Internet το 1993, η απαίτηση για υπηρεσίες πρόσβασης στο Internet άρχισε να γιγαντώνεται και πολλοί θεώρησαν ότι η παροχή υψηλής ταχύτητας πρόσβασης στο Internet είναι το μέσο που θα κάνει τα ασύρματα συστήματα να διαφοροποιηθούν. Για παράδειγμα, τον Φεβρουάριο του 1997, η AT& T ανακοίνωσε ότι ανέπτυξε ένα σύστημα ασύρματης πρόσβασης για τη ζώνη (μπάντα) των 1.900 MHz PCS (προσωπικές υπηρεσίες επικοινωνιών) που θα μπορούσε να προσφέρει

στους συνδρομητές δύο γραμμές για φωνή και μία γραμμή για μετάδοση δεδομένων, με ταχύτητα 128 kbs. Αυτό το σύστημα, το οποίο αναπτύχθηκε υπό το κωδικό σύστημα «Project Angel», ήταν ένα από τα πρώτα εμπορικά ασύρματα συστήματα που χρησιμοποιούσαν τεχνολογία προσαρμοσμένων κεραιών. Μετά από δοκιμαστικές εφαρμογές για μερικά χρόνια και μία σύντομη εμφάνιση στην αγορά, η AT&T αποφάσισε να καταργήσει αυτήν την υπηρεσία τον Δεκέμβριο του 2001, προβάλλοντας το υψηλό κόστος και την χαμηλή εισχώρηση στην αγορά ως εξηγήσεις για αυτήν την απόφαση.

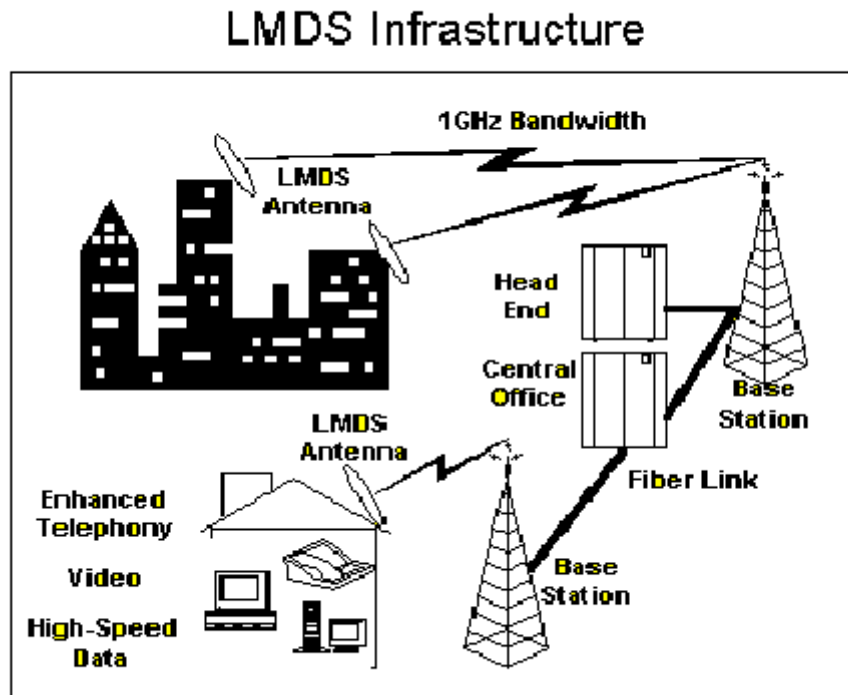
Παράλληλα την ίδια περίοδο, αρκετές νέες επιχειρήσεις, χρησιμοποιώντας ασύρματα συστήματα, επικεντρώθηκαν αποκλειστικά στην παροχή υπηρεσιών πρόσβασης στο Internet. Αυτές οι εταιρείες παροχής ασύρματης πρόσβασης στο Internet (WISP) συνήθως ανέπτυσαν συστήματα στις ελεύθερες ζώνες συχνοτήτων των 900 MHz και 2.4 GHz. Τα περισσότερα από αυτά τα συστήματα απαιτούσαν την εγκατάσταση κεραιών στην έδρα των πελατών τους, είτε στις ταράτσες ή σε κάποιο άλλο σημείο εξωτερικά των κτηρίων. Οι εγκαταστάσεις περιορίζονταν σε επιλεγμένες γειτονιές και μικρές πόλεις. Αυτά τα πρώτα συστήματα προσέφεραν συνήθως ταχύτητες έως λίγες εκατοντάδες kilobits ανά δευτερόλεπτο, ενώ μεταγενέστερα συστήματα προσέφεραν μεγαλύτερες ταχύτητες.

#### **1.4 Συστήματα ευρυζωνικότητας πρώτης γενιάς**

Καθώς ξεκίνησε η υλοποίηση του DSL και των καλωδιακών μόντεμ, τα ασύρματα συστήματα έπρεπε να εξελιχθούν ώστε να υποστηρίξουν πολύ υψηλότερες ταχύτητες για να είναι ανταγωνιστικά. Ξεκίνησε έτσι η ανάπτυξη συστημάτων για υψηλότερες συχνότητες, όπως οι συχνότητες 2.5 GHz και 3.5 GHz. Εμφανίστηκαν επίσης συστήματα πολύ υψηλής ταχύτητας, τα επονομαζόμενα τοπικά συστήματα κατανομής πολλαπλών σημείων (LMDS), που υποστήριζαν έως και αρκετές εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο, και τα οποία αναπτύχθηκαν στις ζώνες συχνοτήτων κυμάτων επιπέδου χιλιοστού, όπως οι 24GHz και 39GHz. Οι υπηρεσίες που βασίζονται στην τεχνολογία LMDS αφορούσαν επαγγελματίες χρήστες και στο τέλος της



δεκαετίας του 1990 απολάμβαναν ραγδαία αλλά σύντομη επιτυχία. Τα προβλήματα που είχαν να κάνουν με τις δυσκολίες πρόσβασης των ταρατσών για την εγκατάσταση των κεραιών, καθώς και οι μικρές δυνατότητες εμβέλειας της τεχνολογίας σταμάτησαν την ανάπτυξή της.



Εικόνα 1.4 Υποδομή LMD δικτύου

Στα τέλη της δεκαετίας του 1990, μία από τις πιο σημαντικές υλοποιήσεις της ασύρματης ευρυζωνικότητας παρουσιάστηκε στη συχνότητα υπηρεσιών πολλαπλών καναλιών κατανομής πολλαπλών σημείων (MMDS) στη συχνότητα των 2.5 GHz. Η μπάντα MMDS παραδοσιακά χρησιμοποιείται για να παρέχει ασύρματες, καλωδιακές υπηρεσίες μετάδοσης βίντεο, ειδικά σε αγροτικές περιοχές όπου δεν διατίθενται υπηρεσίες καλωδιακής τηλεόρασης. Η έλευση της καλωδιακής τηλεόρασης κατέστρεψε τις επιχειρήσεις που εφαρμόζαν ασύρματη καλωδιακή τεχνολογία και οι παροχείς υπηρεσιών αναζητούσαν εναλλακτικούς τρόπους για να χρησιμοποιήσουν αυτό το φάσμα. Μερικοί παροχείς ξεκίνησαν να προσφέρουν υπηρεσίες μονόδρομης ασύρματης πρόσβασης στο Internet, χρησιμοποιώντας την τηλεφωνική

γραμμή ως επιστροφή. Τον Σεπτέμβριο του 1998, η Αμερικανική Επιτροπή Επικοινωνιών (FCC) χαλάρωσε τους κανονισμούς για την ζώνη συχνοτήτων MMDS στις Ηνωμένες Πολιτείες ώστε να επιτρέψει την εφαρμογή υπηρεσιών αμφίδρομης επικοινωνίας, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερο ενδιαφέρον σε αυτήν τη ζώνη. Οι εταιρείες MCI WorldCom και Sprint κατέβαλαν περίπου 1 δισεκατομμύριο δολάρια για να αγοράσουν άδειες χρήσης της ζώνης MMDS και αρκετές εταιρείες ξεκίνησαν να αναπτύσσουν σταθερές ασύρματες λύσεις υψηλών επιδόσεων για αυτήν τη ζώνη.



**Εικόνα 1.5 Αναμεταδότης MMD**

Η πρώτη γενιά αυτών των λύσεων ασύρματης ευρυζωνικότητας αναπτύχθηκαν πάνω στους ίδιους πύργους που εξυπηρετούσαν τους συνδρομητές της ασύρματης καλωδιακής τεχνολογίας. Αυτοί οι πύργοι είχαν συνήθως ύψος αρκετών εκατοντάδων μέτρων και κάλυπταν αποστάσεις LOS έως και 50 χιλιόμετρα, χρησιμοποιώντας πομπούς υψηλής τάσης. Τα συστήματα MMDS πρώτης γενιάς απαιτούσαν από τους συνδρομητές να εγκαθιστούν στην έδρα τους εξωτερικές κεραίες αρκετά ψηλές οι οποίες θα έδειχναν προς τον πύργο που θα παρείχε καθαρή LOS διαδρομή μετάδοσης. Οι Sprint και MCI ήταν οι πρώτες εταιρείες που παρείχαν υπηρεσίες αμφίδρομης ασύρματης ευρυζωνικότητας χρησιμοποιώντας συστήματα MMDS πρώτης γενιάς σε μερικές αγορές στις αρχές του 2000. Οι απαιτήσεις για την εξωτερική κεραία και την τεχνολογία οπτικής επαφής LOS

αποδείχθηκαν σημαντικά εμπόδια. Εκτός από αυτό, επειδή μία σχετικά μεγάλη περιοχή εξυπηρετούνταν από έναν μόνο πύργο, η χωρητικότητα αυτών των συστημάτων ήταν σχετικά περιορισμένη. Παρόμοια συστήματα LOS πρώτης γενιάς αναπτύχθηκαν διεθνώς στη ζώνη των 3.5 GHz.

### **1.5 Δεύτερης γενιάς ευρυζωνικά συστήματα**

Τα δεύτερης γενιάς συστήματα ασύρματης ευρυζωνικότητας κατάφεραν να ξεπεράσουν το θέμα LOS και να παρέχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα. Αυτό έγινε μέσω της χρήσης κυψελωτής αρχιτεκτονικής και υλοποίησης προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας σήματος για τη βελτίωση της σύνδεσης και των επιδόσεων του συστήματος σε συνθήκες φαινομένου πολλαπλών διαδρομών. Αρκετές νέες επιχειρήσεις ανέπτυξαν προηγμένες ιδιωτικές λύσεις που παρείχαν σημαντικά οφέλη στην απόδοση σε σχέση με τα συστήματα πρώτης γενιάς. Τα περισσότερα από αυτά τα νέα συστήματα μπορούσαν να αποδώσουν πολύ καλά σε συνθήκες χωρίς οπτική επαφή, με τις κεραιές των πελατών να τοποθετούνται συνήθως στο γείσο ή ακόμα χαμηλότερα. Πολλοί έλυσαν το πρόβλημα NLOS χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως ορθογώνια πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας (OFDM), πολλαπλή πρόσβαση διαχωρισμού κώδικα (CDMA) και επεξεργασία πολλαπλών κεραιών. Μερικά συστήματα, όπως εκείνα που αναπτύχθηκαν από τις εταιρείες SOMA Networks και Navini Networks, παρουσίασαν ικανοποιητικές επιδόσεις σύνδεσης σε τερματικά συνδρομητών διάσπαρτα για κάποια χιλιόμετρα χωρίς την ανάγκη εγκατάστασης κεραιάς εκτός κτιρίου. Με τα δεύτερης γενιάς συστήματα σταθερής ασύρματης ευρυζωνικότητας επιτεύχθηκε η μετάδοση μερικών megabits ανά δευτερόλεπτο σε ακτίνα κελιού ορισμένων χιλιομέτρων.

## 1.6 IEEE Working Group Standardization Bodies

Η ανάπτυξη των μεγάλων αγορών για τις υπηρεσίες ασυρμάτων υπηρεσιών δεν εξαρτάται μόνο από τη διαθεσιμότητα του επαρκούς φάσματος στο συγκεκριμένο εύρος ζώνης συχνοτήτων, αλλά επίσης και από τη διαθεσιμότητα των πρωτοκόλλων (standards) που υπάρχουν. Ο κύριος λόγος γιατί οι μεγάλες αγορές δεν είναι εφικτές χωρίς τα πρωτόκολλα, είναι επειδή οι μεγάλοι πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών θέλουν να έχουν την επιλογή της αγοράς εξοπλισμού από πολλαπλούς προμηθευτές και όχι από μία μόνο εταιρεία.

Με την απουσία των πρωτοκόλλων, οι μεγάλοι πάροχοι υπηρεσιών απλά απέχουν από τη χρήση της υπάρχουσας τεχνολογίας. Η ύπαρξη των πρωτοκόλλων επίσης βοηθάει τις μικρές επιχειρήσεις της τεχνολογίας να εισέλθουν στην αγορά, μειώνοντας τα ρίσκα που συνδέονται με την προμήθεια προϊόντων όπως τα chipsets ημιαγωγών, λογισμικό, firmware κτλ.

Τα πρωτόκολλα φαίνονται σαν εθελοντικές συμφωνίες μεταξύ εταιρειών ημιαγωγών και τεχνολογίας, κατασκευαστών εξοπλισμού και παρόχων υπηρεσιών. Μέχρι και αρκετά χρόνια πριν, δεν υπήρχε κανένα πρωτόκολλο για ασύρματες επικοινωνίες δεδομένων. Η ολική αγορά ήταν μικρή, κατακερματισμένη και κυριαρχούμενη από αρκετές ιδιοκτησιακές τεχνολογίες. Η δραματική αύξηση της αγοράς είναι ένα άμεσο αποτέλεσμα της ανάγκης αρκετών πρωτοκόλλων, όπως τα IEEE 802.11a™, 802.11b™ και 802.11g™. Τα πρωτόκολλα επιτρέπουν εξοπλισμό από διαφορετικές εταιρείες να συνεργάζονται σε ένα δίκτυο. Τα πρωτόκολλα δημιουργούν μαζικές αγορές για εξοπλισμό, ο οποίος δημιουργεί οικονομία κλιμάκωσης για τους κατασκευαστές. Η οικονομική συνέπεια των πρωτοκόλλων είναι ακόμα πιο σημαντική από την απελευθέρωση της αγοράς. Η αγορά για προϊόντα τυποποιημένα κατά ένα πρωτόκολλο χαρακτηρίζεται από σημαντικό ανταγωνισμό, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές. Για να υπερκεράσουν αυτήν την τάση, πολλές εταιρείες ψάχνουν για τρόπους ώστε να διαφοροποιηθούν μέσα στην αγορά, αλλά παράλληλα να προσφέρουν τα τυποποιημένα κατά το πρωτόκολλο προϊόντα.

Γενικά, τα πρωτόκολλα δίχως άλλο, προωθούν τη δημιουργικότητα, την καινοτομία και την επιχειρηματικότητα. Επειδή τα πρωτόκολλα ευνοούν τις

μαζικές αγορές, η πνευματική ιδιοκτησία που απαιτείται για τη δημιουργία ενός πρωτοκόλλου αξιολογείται πολύ ψηλά. Άλλωστε, αρκετές από τις πιο υψηλές πατέντες για πνευματική ιδιοκτησία στον κόσμο είναι αυτές που καλύπτουν ένα τέτοιο πρωτόκολλο ή μέρος του. Έτσι, η πολιτική πνευματικής ιδιοκτησίας κατά τη δημιουργία ενός πρωτοκόλλου είναι πολύ σημαντική. Οι ανοιχτοί οργανισμοί, όπως οι οργανισμοί που αναπτύσσουν πρωτόκολλα, σχηματίζονται για να αναπτύσσουν τα πρωτόκολλα, έτσι ώστε να μην ευνοούν καμία εταιρεία, αλλά έχουν ως σκοπό να ωφελήσουν το κοινό καλό.

	Personal Area Network (PAN)	Local Area Network (LAN)	Metropolitan Area Network (MAN)	Wide Area Network (WAN)
Τεχνολογία	Bluetooth Ultra-wideband	802.11b 802.11a 802.11g Wi-Fi	802.16 802.16a 802.16e WiMAX	GSM GPRS CDMA 3.5G
Ρυθμοί Μετάδοσης	1 ~ 2 Mbps	11 ~ 54 Mbps	~ 268 Mbps	~ 2.4 Mbps
Εύρος	3m	100m	50Km	Global

**Πίνακας 1.1 Εξέλιξη των προτύπων**

Η IEEE είναι ένα ανοιχτό σώμα ανάπτυξης πρωτοκόλλων. Πριν ένα IEEE πρωτόκολλο υιοθετηθεί, ζητείται από εταιρείες που είναι γνωστό ότι διαθέτουν απαραίτητες πατέντες γι' αυτό μια επιβεβαίωση ότι η εν λόγω εταιρεία είτε δε θα ενδυναμώσει κάποια από τις τωρινές είτε τις μελλοντικές πατέντες τις (ή μέρος τους) εμποδίζοντας κάποια άλλη εταιρεία, είτε ότι θα διαθέσει άδειες με αποζημίωση ή σε λογικές τιμές σε διάφανη βάση. Δεν υπάρχει εγγύηση από την IEEE ότι ένα πρωτόκολλο δεν παραβιάζει την πνευματική περιουσία τρίτων, ακόμη και αν οι τρίτοι αυτοί δε θέλουν να μοιραστούν τα πνευματικά δικαιώματα. Τώρα, πως ακριβώς οριοθετούνται οι όροι “λογικός” και “διαφανής” είναι θέμα μόνο ενός δικαστηρίου.

Ειδικότερα στην IEEE, τα πρωτόκολλα για τις επικοινωνίες δεδομένων αναπτύσσονται από την κοινότητα IEEE 802, που αποκαλείται επίσης και

Επιτροπή Πρωτοκόλλων Τοπικών και Μητροπολιτικών Δικτύων (Local and Metropolitan Area Networks Standards Committee – LMSC) και χορηγείται από την IEEE Computer Society. Η IEEE 802 έχει την ευθύνη της ανάπτυξης και συντήρησης παγκοσμίων πρωτοκόλλων και προτεινόμενων πρακτικών για επικοινωνίες υπολογιστών. Μερικά από τα επιτυχημένα πρωτόκολλα της IEEE 802 είναι:

- IEEE 802.3™ ή Ethernet standard
- IEEE 802.5™ ή Token Ring standard
- IEEE 802.11™ ή Wi-Fi standard.

Όλα τα παραπάνω έχουν υιοθετηθεί από την ISO/IEC Joint Technical Committee 1 (JTC1) ως International Standards.

Αν και η IEEE έχει την έδρα της στις Η.Π.Α., υπάρχει τεράστια παγκόσμια αναγνώριση και στήριξη, ειδικά στις διάφορες συνεδριάσεις που οργανώνει και πολλά πρωτόκολλα που εισάγονται από την IEEE αναγνωρίζονται ως παγκόσμια standards. Η κοινότητα IEEE 802 αποτελείται από πολλές ομάδες εργασίας, που οργανώνονται γύρω από σημαντικές εφαρμογές. Τα πρωτόκολλα της IEEE 802 σχετίζονται με το φυσικό στρώμα και το στρώμα διασύνδεσης δεδομένων, όπως αυτά ορίζονται στο ISO open systems interconnections (OSI) reference Μοντέλο.

Τα πρωτόκολλα της IEEE 802 χωρίζει το στρώμα σύνδεσης δεδομένων σε 2 υποστρώματα, το logical link control (LLC) και το medium access control (MAC). Το LLC εισήχθη στο 802.2™ και είναι κοινό για όλα τα 802 MACs. Στη δεκαετία του '90 δραστηριοποιήθηκε η ομάδα εργασίας του 802.11™ με εντυπωσιακά αποτελέσματα, καθώς ήταν το πρώτο πρωτόκολλο με τόσο μεγάλη απήχηση στον κόσμο και φυσικά την αγορά της ασύρματης τεχνολογίας. Η τεχνολογία, όμως, δε μένει στάσιμη και εφόσον το εμπορικό ενδιαφέρον ήταν μεγαλύτερο από ποτέ άλλοτε σχετικά με τις ασύρματες τεχνολογίες, το 1999 2 ακόμα ομάδες εργασίες δημιουργήθηκαν.

Η IEEE 802.15™ που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα προσωπικά δίκτυα και η IEEE 802.16™ που δραστηριοποιήθηκε στα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα και στη λεγόμενη ασύρματη κάλυψη ευρείας ζώνης. Η συμμετοχή στις ομάδες αυτές είναι ανοιχτή σε όποιον θέλει να συμμετάσχει με οποιονδήποτε ωφέλιμο τρόπο. Δεν επιτρέπεται σε εταιρείες να συμμετέχουν.

Μόνο μεμονωμένα πρόσωπα έχουν τη δυνατότητα να ψηφίσουν και να αποφασίσουν. Οι τελευταίοι προέρχονται συνήθως από τις ΗΠΑ, τον Καναδά, την Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Αυστραλία. Τα πρωτόκολλα που προκύπτουν από τη μελέτη της ομάδας εργασίας πρώτα γίνονται πρωτόκολλα της IEEE και έπειτα προτείνονται στην επιτροπή της ISO/IEC για αναγνώριση ως παγκόσμιου πρωτοκόλλου. Η εμπορική επιτυχία των 802.11™ και 802.15™, όπως και οι εργασίες για το 802.16 έχουν αναδείξει την IEEE το πλέον αναγνωρίσιμο σώμα δημιουργίας ασύρματων πρωτοκόλλων.

Το ότι ένα παγκόσμιο πρωτόκολλο υπάρχει, δε σημαίνει απαραίτητα και ότι θα επιτύχει στην αγορά της τεχνολογίας. Η επιτυχία αυτή εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα τα τεχνολογίας, αλλά επίσης και από εταιρικούς και πολιτικούς λόγους. Έτσι, πρέπει να υπάρχει μια συγκεκριμένη συμπόρευση μεταξύ των ενδιαφερομένων εταιρειών και των αντίστοιχων πολιτικών θεμάτων ώστε να υπάρξει ευτυχής έκβαση.

Στη βιομηχανία, η συμπόρευση αυτή είναι ευκολότερο να επιτευχθεί. Για να γίνει λοιπόν πραγματικότητα η επιτυχία του πρωτοκόλλου, οι εταιρείες δημιουργούν άλλες μορφές βιομηχανικών, αυτή τη φορά, οργανισμών για τα πρωτόκολλα. Τέτοιοι οργανισμοί συνδεόμενοι με τα πρωτόκολλα 802.11™ και 802.16™ είναι οι Wi-Fi και WiMAX. Το εγχείρημα των οργανισμών αυτών περιλαμβάνει δοκιμές για να διαπιστωθεί η διαλειτουργικότητα (interoperability) ανάμεσα στα προϊόντα από διαφορετικές εταιρείες και την προώθηση των προϊόντων που είναι τυποποιημένα κατά το συγκεκριμένο πρωτόκολλο στην αγορά.

### **1.7 Το WiMAX και άλλες τεχνολογίες ασύρματης ευρυζωνικότητας.**

Το WiMAX δεν αποτελεί τη μοναδική λύση στην παροχή ασύρματων ευρυζωνικών υπηρεσιών. Μέχρι σήμερα υπάρχουν στην αγορά αρκετές ιδιωτικές λύσεις και ιδιαίτερα για σταθερές εφαρμογές. Μερικές ιδιωτικές λύσεις που υποστηρίζουν κινητές εφαρμογές είναι η τεχνολογία I-Burst της ArrayComm και η Flash-OFDM της Flarion. Εκτός από τις ιδιωτικές λύσεις,

υπάρχουν και λύσεις εναλλακτικές που βασίζονται σε πρότυπα και επικαλύπτονται εν μέρει από το WiMAX, ιδιαίτερα σε φορητές και κινητές εφαρμογές. Στο εγγύς μέλλον, οι πιο σημαντικές από αυτές τις εναλλακτικές λύσεις θα είναι τα κυψελωτά συστήματα τρίτης γενιάς και συστήματα Wi-Fi που θα βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.11. Σε αυτήν την ενότητα συγκρίνουμε τις διάφορες ασύρματες ευρυζωνικές τεχνολογίες που βασίζονται σε πρότυπα και θα τονίσουμε τις διαφορετικές πτυχές του WiMAX.



---

## 2. WiMAX

---

### 2.1 Εισαγωγή στο WiMAX

Τα τελευταία χρόνια, ύστερα από μία πορεία ραγδαίας ανάπτυξης αλλά και αβεβαιότητας, αναδύεται μία διαλειτουργική λύση για την ασύρματη ευρυζωνική δικτύωση, η οποία βασίζεται σε πρότυπα. Μία ευρεία βιομηχανική συνεργασία, το WiMAX Forum (Παγκόσμια Διαλειτουργικότητα για Μικροκυματική Πρόσβαση) έχει ξεκινήσει να πιστοποιεί ασύρματα ευρυζωνικά προϊόντα για διαλειτουργικότητα και συμμόρφωση με ένα πρότυπο. Το WiMAX βασίζεται σε πρότυπα ασύρματης μητροπολιτικής δικτύωσης (WMAN) που αναπτύχθηκαν από την ομάδα IEEE 802.16 και υιοθετήθηκαν από το IEEE και την ομάδα ETSI HiperMAN. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζουμε μία περιεκτική τεχνική επισκόπηση της αναδυόμενης λύσης WiMAX για την ασύρματη ευρυζωνική δικτύωση. Ο σκοπός είναι να δοθεί μία υψηλού επιπέδου περίληψη πριν προχωρήσουμε σε μία πιο λεπτομερή έκθεση του WiMAX στα επόμενα κεφάλαια.

Στην αρχή του κεφαλαίου παρουσιάζεται μία σύνοψη των δραστηριοτήτων της ομάδας IEEE 802.16 και της σχέσης της με το WiMAX. Ακολουθεί η παρουσίαση των κύριων γνωρισμάτων του WiMAX και μία σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών του φυσικού επιπέδου και του επιπέδου MAC του WiMAX. Θα γίνει, επίσης, αναφορά σε θέματα υπηρεσιών, όπως είναι η ποιότητα υπηρεσιών, η ασφάλεια και η κινητικότητα, ενώ θα παρουσιαστεί ακόμα η αρχιτεκτονική ενός δικτύου αναφοράς. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με μία σύντομη συζήτηση για την προσδοκώμενη απόδοση του WiMAX.

## 2.2 Τα πρότυπα IEEE 802.16 και ETSI HiperMAN

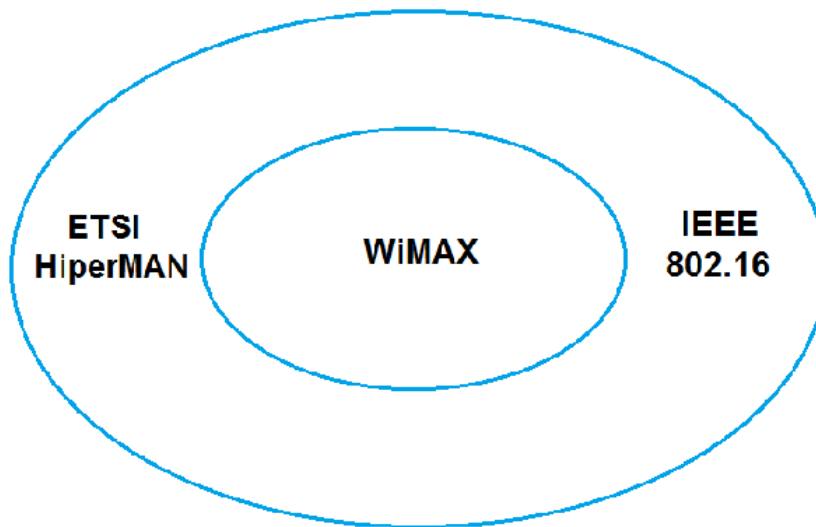
Η πρόσβαση στο διαδίκτυο και η μετάδοση δεδομένων ψηφιακής μορφής (φωτογραφίες, βίντεο, αρχεία ήχου ,κ.α.) έκανε γρήγορα εμφανή την ανάγκη πρόσβασης σε αυτές τις υπηρεσίες και με ασύρματο τρόπο, γρήγορα, αποτελεσματικά και με τήρηση συγκεκριμένων εχεγγύων ποιότητας.

Στις πρώτες προσπάθειες προς αυτήν την κατεύθυνση οι κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού ανέπτυξαν δικούς τους μηχανισμούς και πολλές, διαφορετικές τεχνολογίες, βασισμένες σε ετερογενείς πλατφόρμες και διαφορετικές φιλοσοφίες εξέλιξης, με έμφαση σε διαφορετικούς τομείς. Υπήρξε έτσι αρχικά κατακερματισμός της αγοράς, το κόστος κατασκευής παρέμενε πολύ υψηλό, ενώ τα χαρακτηριστικά, που παρείχε ο κάθε κατασκευαστής εξοπλισμού ασύρματης πρόσβασης, διαφοροποιούνταν αρκετά μεταξύ τους, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.

Η ανάγκη για τυποποίηση οδήγησε την IEEE και το ETSI, στην παράλληλη ανάπτυξη των προτύπων IEEE 802.16 και ETSI HiperMAN, ως τεχνολογίες Μητροπολιτικών Δικτύων Ασύρματης Ευρυζωνικής Πρόσβασης, με στόχο τη μείωση του κόστους, την αύξηση της αξιοπιστίας και των ποιοτικών χαρακτηριστικών του εξοπλισμού και την επίτευξη συμβατότητας εξοπλισμού μεταξύ των κατασκευαστών.

Αρκετοί κατασκευαστές υποστήριξαν και συμμετείχαν ενεργά στην εξέλιξη του ενός ή του άλλου προτύπου. Ωστόσο, τα δύο πρότυπα διέφεραν σε μερικά σημεία, μη παρέχοντας ένα ενιαίο πλαίσιο ανάπτυξης.

Δημιουργήθηκε έτσι το πρότυπο WiMAX ( Worldwide Interoperability for Microwave Access), βασισμένο κυρίως στο IEEE 802.16, με ενσωμάτωση όμως και κάποιων χαρακτηριστικών του ευρωπαϊκού προτύπου ETSI HiperMAN (Σχήμα 2.1).



**Εικόνα 2.1 WiMAX σε αλληλεπίδραση με ETSI HiperMAN και IEEE 802.16**

Την εξέλιξη του προτύπου WiMAX ξεκίνησε, και συνεχίζει να προωθεί, το WiMAX Forum, έχοντας επιτύχει τη συσπείρωση του συνόλου, σχεδόν, των κατασκευαστών εξοπλισμού ασύρματων μητροπολιτικών ευρυζωνικών δικτύων. Έχει υποστηρίξει, μέσα από μία τεχνολογική εξελικτική διαδικασία, δύο βασικά πρότυπα, το πρότυπο IEEE 8002.16-2044 (d) ή Fixed WiMAX, για την παροχή υπηρεσιών Σταθερής Ασύρματης Ευρυζωνικής Πρόσβασης και το πρότυπο IEEE 802.16-2005(e) ή Mobile WiMAX, για την παροχή υπηρεσιών Κινητής Ασύρματης Ευρυζωνικής Πρόσβασης. Η εξελικτική διαδικασία του προτύπου 802.16 φαίνεται συνοπτικά στον πίνακα 2.1.

Πρότυπο IEEE	Περιγραφή	Έτος Κυκλοφορίας	Προδιαγραφόμενη Συχνοτική Περιοχή
802.16	Αρχική Έκδοση Προτύπου	2002	10 GHz-66 GHz
802.16a	Επέκταση/τροποποίηση του 802.16	2003	2 GHz-11 GHz
802.16b	Wireless High-Speed Unlicensed MAN	2003	5 GHz-6 GHz
802.16c	Wireless MAN Single Carrier	2003	10 GHz-2 GHz
802.16d	Σταθερή Πρόσβαση	2003	2 GHz-11 GHz
802.16-2004	Σταθερή Πρόσβαση(Συνολικό)	2004	2 GHz-2 GHz
802.16-2005	Σταθερή και Κινητή Πρόσβαση	2005	2 GHz-11 GHz
802.16-2009	Αναθεώρηση του 802.16-2004	2009	2 GHz-66 GHz
802.16m	Εξέλιξη του 802.16e-2005	Αναμένεται	Πιθανόν<6 GHz

**Πίνακας 2.1 Ασύρματα πρότυπα IEEE**

Το WiMAX Forum, στο σταθερό πρότυπο του WiMAX, δίνει έμφαση στο φυσικό επίπεδο και το επίπεδο ζεύξης δεδομένων, μέχρι και το υπο-επίπεδο MAC (Media Access Control). Τα ανώτερα επίπεδα, σε αντιστοιχία με το πρότυπο δικτυακής διαστρωμάτωσης OSI, δεν προδιαγράφονται αναλυτικά, αλλά δίνονται σχετικές κατευθύνσεις, σύμφωνα με τις οποίες θα πρέπει να αναπτύσσουν οι κατασκευαστές τα προϊόντα. Μεγαλύτερη έμφαση στην προτυποποίηση και ανώτερων επιπέδων έχει δοθεί στην έκδοση του προτύπου, στο οποίο βασίζεται το κινητό WiMAX.

Το WiMAX Forum, έχει δημιουργήσει δομές και διαδικασίες πιστοποίησης εξοπλισμού (Σταθμοί Βάσης ή Τερματικές συσκευές), τόσο για το σταθερό, όσο και για το κινητό πρότυπο, σε διαφορετικές συχνότητες λειτουργίας. Ο εξοπλισμός κάποιου κατασκευαστή, που ολοκληρώνει επιτυχώς τη διαδικασία πιστοποίησης, λαμβάνει σχετικό πιστοποιητικό, στο οποίο αναγράφεται η υποκατηγορία πιστοποίησης, βάσει του οποίου βεβαιώνεται υλοποιούνται τα υποχρεωτικά και κάποια από τα προαιρετικά χαρακτηριστικά του προτύπου.

Επομένως, η χρήση πιστοποιημένου εξοπλισμού διασφαλίζει ελάχιστη στάθμη απόδοσης, διαλειτουργικότητας, εγγύηση της ποιότητας των υπηρεσιών και αξιοπιστία.

Το πρότυπο IEEE 8002.16-2004 (d) προδιαγράφει τη δομή και λειτουργία του εξοπλισμού για την υλοποίηση ενός ασύρματου ευρυζωνικού μητροπολιτικού δικτύου σταθερής πρόσβασης, αλλά και τη διαλειτουργικότητά του, στο φυσικό επίπεδο και στο επίπεδο ζεύξης δεδομένων (κοινό υπο-επίπεδο MAC και Convergence). Παγιώθηκε το 2004, ενώ τα πρώτα πιστοποιημένα εμπορικά προϊόντα εμφανίστηκαν το 2006.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του προτύπου περιγράφονται στον Πίνακα 2.2.

Ο αντίστοιχος εξοπλισμός μπορεί να παρέχει υπηρεσίες σταθερής ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, σε μία περιοχή μητροπολιτικών διαστάσεων, με ακτίνα πρόσβασης πρακτικά έως και 30 km (και θεωρητική εμβέλεια έως και πάνω από τα 50 km ), με ρυθμούς μετάδοσης που υπερβαίνουν τα 10 Mbits/s σε κανάλι λειτουργίας 3,5 MHz.

Ολοκλήρωση Προτυποποίησης	2004
Συνθήκη Διάδοσης	LOS, OLOS, NLOS
Ενδεικτικός Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης	Έως και 26,2 Mbit/s σε διάυλο 7 MHz
Διαμόρφωση	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Κινητότητα	OXI (Σταθερή ή Νομαδική Πρόσβαση).
Εύρος Διαύλου	3,5 MHz, 7 MHz
Αριθμός Υποφερόντων	256
Ενδεικτική Εμβέλεια Πρόσβασης	Έως 30 Km (θεωρητικά έως 50 Km)
Φασματική Απόδοση	Έως 3,75 bps/Hz
Κλάσεις Υπηρεσιών	UGS, rtPS, nrtPS, BE
Υποστήριξη προσαρμοστικών κεραιοσυστημάτων	OXI
Υποστήριξη MIMO	OXI
Μέθοδος Πολυπλεξίας/Πρόσβασης	OFDM
Ζώνες Συχνοτήτων	2,5 GHz, 3,5 GHz, 5,8 GHz
Αμφίδρομη Μετάδοση	FDD, TDD
Συνήθεις Τύποι Τερματικών	Εξωτερικής εγκατάστασης, Εσωτερικής –επιτραπέζια
Κρυπτογράφηση	DES, 3DES, AES
Λειτουργία Εξοικονόμησης Ενέργειας	OXI

**Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά συστημάτων Σταθερού WiMAX**

Η διαυλοποίηση ακολουθεί κατάτμηση σε πολλαπλάσια των 3,5 MHz (3,5 MHz, 7 MHz). Τα συστήματα υιοθετούν τεχνική αμφίδρομης μετάδοσης TDD (Time Division Duplexing), δηλαδή αμφίπλευρη μετάδοση με διαχωρισμό στο χρόνο ή FDD (Frequency Division Duplexing), δηλαδή αμφίπλευρη μετάδοση με διαχωρισμό στη συχνότητα.

Το πρότυπο προβλέπει παροχή υπηρεσίας, τόσο με οπτική επαφή μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικού, όσο και με μη οπτική επαφή, για μικρότερες αποστάσεις. Ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης, η ανοχή στο θόρυβο και η εξασφάλιση συγκεκριμένης ποιότητας υπηρεσιών επιτυγχάνεται με

καινοτόμες τεχνικές, τόσο στη ραδιοεπαφή, όσο και στο επίπεδο MAC. Τέτοιες τεχνικές είναι: Πολυπλεξία Ορθογωνικής Διάρθρωσης Συχνότητας (OFDM), εξελιγμένες τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, δυνατότητα προσαρμοστικής διαμόρφωσης, κυκλικό πρόθεμα πλαισίου και τεχνικές κατανομής των πόρων του σταθμού. Επίσης, ενσωματώνονται Ροές και Κλάσεις (κατηγορίες) Υπηρεσιών και τεχνικές κρυπτογράφησης και απόδοσης προτεραιοτήτων.

Η τεχνολογία σταθερού WiMAX εντάσσεται στις τεχνολογίες δικτύων πρόσβασης νέας γενιάς (NGA), καθώς η αρχιτεκτονική του βασίζεται στη διεπαφή Ethernet, στο σταθμό βάσης, στο τερματικό του χρήστη και στη διασύνδεση με το δίκτυο κορμού IP. Παρέχονται έτσι μέσω της τεχνολογίας αυτής όλες οι νέες υπηρεσίες, όπως πρόσβαση στο διαδίκτυο, IP τηλεφωνία (VoIP), υπηρεσίες πραγματικού χρόνου ή υπηρεσίες που απαιτούν ελάχιστο εγγυημένο εύρος ζώνης και συγκεκριμένα εχέγγυα ποιότητας υπηρεσίας – QoS (latency, jitter)(π.χ. video ή ήχος σε πραγματικό χρόνο, VPN- Virtual Private Network, μισθωμένοι δίαυλοι κλπ).

Το πρότυπο IEEE 802.16 -2005 (e) αποτελεί εξέλιξη του σταθερού προτύπου. Το βασικό πρόσθετο χαρακτηριστικό είναι η κινητικότητα, αρχικά σε απλή μορφή και με απώτερο στόχο την υλοποίηση πλήρους κινητότητας, αντίστοιχη με εκείνη της κινητής τηλεφωνίας. Επιτυγχάνεται δηλαδή η παροχή ασύρματης ευρυζωνικότητας σε κινητά τερματικά και μάλιστα σε ρυθμούς παρεμφερείς με το σταθερό WiMAX, αν και σε πιο περιορισμένη εμβέλεια. Τα βασικά χαρακτηριστικά του Κινητού WiMAX (Mobile WiMAX) περιγράφονται στον Πίνακα 2.3

Όλα τα συστήματα του προτύπου αυτού υιοθετούν τεχνική TDD (Time Division Duplexing), ενώ η διαυλοποίηση υλοποιείται, σύμφωνα με το πρότυπο, με διαύλους των 5 MHz και 10 MHz. Οι τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης αναβαθμίζονται με την SOFDMA και γίνονται πιο ευέλικτες, γρήγορες και αποδοτικές, υποστηρίζοντας περισσότερες υπηρεσίες και χρήστες ανά σταθμό βάσης.

Ενσωματώνονται ισχυρότερες τεχνικές κρυπτογράφησης και πιστοποίησης ταυτότητας χρηστών, διαδικασίες μεταπομπής από τον οικείο σταθμό σε άλλο, ενώ παρέχεται πλέον διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε εξοπλισμό δικτύου και τερματικά συνδρομητών διαφορετικών κατασκευαστών.

Ολοκλήρωση Προτυποποίησης	2005
Συνθήκη Διάδοσης	LOS, OLOS, NLOS
Ενδεικτικός Μέγιστος Ρυθμός Μετάδοσης	30,0 Mbps σε δίαυλο 10 MHz (μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί αναλόγως της τεχνικής υλοποίησης)
Διαμόρφωση	QPSK, 16QAM, 64QAM
Κινητότητα	NAI (σταθερή ή νομαδική πρόσβαση, φορητότητα, απλή κινητότητα, σταδιακή υλοποίηση πλήρους κινητότητας)
Εύρος Διαύλου	5,0 MHz, (7,0 MHz σε μερικές υλοποιήσεις), 10,0 MHz
Αριθμός Υποφερόντων	512, 1024
Ενδεικτική Εμβέλεια Πρόσβασης	Έως 8 -16 Km (μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με διάφορες τεχνικές)
Ενδεικτική Μέση Φασματική Απόδοση	3,000 bps/Hz μπορεί να διαφοροποιηθεί ανάλογα με την υλοποίηση διαφόρων τεχνικών π.χ MIMO κ.α.).
Κλάσεις Υπηρεσιών	UGS, rtPS, ErtPS, nrPS, BE
Υποστήριξη προσαρμοστικών κεραιοσυστημάτων	NAI
Υποστήριξη MIMO	NAI
Μέθοδος Πολλαπλής Πρόσβασης	OFDMA, SOFDMA
Ζώνες Συχνοτήτων	2,5 GHz, 3,5 GHz, 5,8 GHz
Αμφίδρομη Μετάδοση	TDD
Συνήθεις Τύποι Τερματικών	Εξωτερικής εγκατάστασης, εσωτερικής –επιτραπέζια, PCMCIA Cards, USB dongles, Embedded Chipsets (PDA, laptops, netbooks, smartphones)
Κρυπτογράφηση	3DES, AES
Λειτουργία Εξοικονόμησης Ενέργειας	NAI

**Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά συστημάτων Κινητού WiMAX**



Ακόμα, εισάγονται νέες τεχνολογίες στη ραδιοεπαφή, οι οποίες αφορούν, τόσο τα κεραιο-συστήματα όσο και τους πομποδέκτες (έξυπνα και προσαρμοστικά κεραιο-συστήματα, δυναμική διαμόρφωση λοβών ακτινοβολίας, τεχνικές MIMO – πολλαπλών εισόδων και εξόδων, Space – Time Coding, Diversity κ.α).

Εισάγονται, επίσης, άλλες καινοτομίες στη διαχείριση της ισχύος από τα τερματικά και στο είδος των τερματικών (εκτός των outdoor και desktop που προϋπήρχαν εισάγονται τερματικά τύπου USB dongles, PCMCIA cards, embedded).

Τα πρώτα συστήματα, που ακολουθούν το πρότυπο αυτό πιστοποιήθηκαν από το WiMAX Forum και άρχισαν να διατίθενται στην αγορά το 2008, ενώ ήδη το πλήθος τους έχει ξεπεράσει τα αντίστοιχα πιστοποιημένα συστήματα σταθερής πρόσβασης.

## **2.3 Αρχιτεκτονική του δικτύου WiMAX**

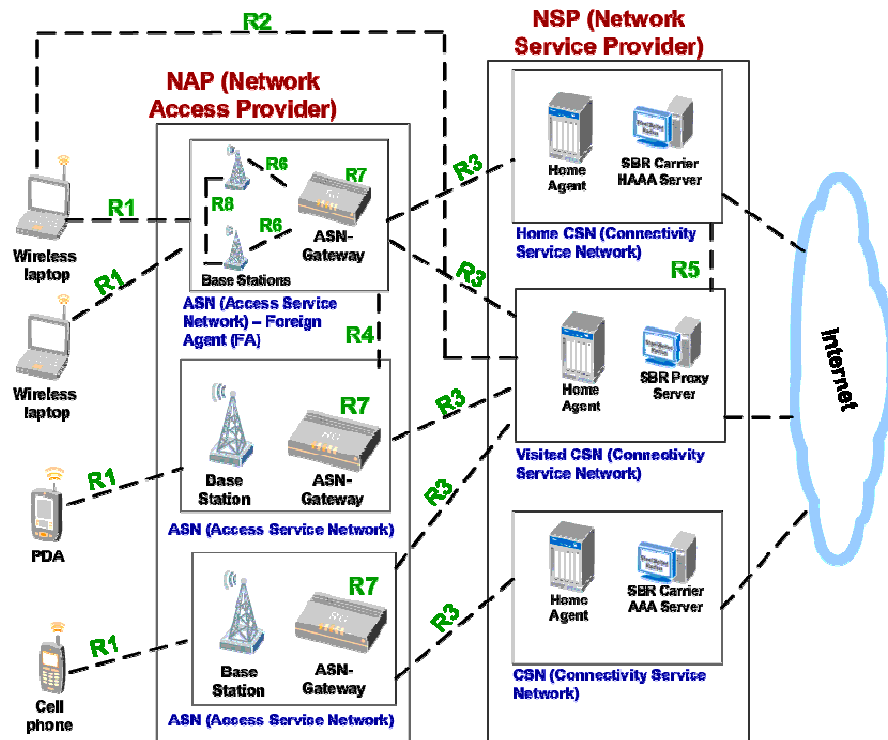
Η τεχνολογία WiMAX παρέχει την απαιτούμενη τεχνική ευελιξία, ώστε να χρησιμοποιείται αυτόνομα ή σε συνδυασμό με άλλες ασύρματες ή ενσύρματες υποδομές, σε μια πληθώρα διαφορετικών τοπολογιών και αρχιτεκτονικών δικτύου. Δικτυακές παραλλαγές στην υλοποίηση της τεχνολογίας WiMAX μπορεί να αφορούν τον τύπο της πρόσβασης, τον τερματικό εξοπλισμό, καθώς και τη διασύνδεση του με άλλες υποδομές πρόσβασης.

### **2.3.1 Τοπολογία σταθερού WiMAX**

Η υλοποίηση μιας τοπολογίας σταθερής ασύρματης πρόσβασης με WiMAX μπορεί να βασιστεί σε υφιστάμενες τοπολογίες P2MP παλαιότερων συστημάτων σταθερής πρόσβασης και σε τοπολογίες υλοποιήσεων ασύρματου ζευκτικού δικτύου.

Ξεκινώντας από το πλησιέστερο σημείο, που μπορεί να προσφέρει επαρκή ευρυζωνική διασύνδεση μπορούν να δημιουργηθούν σημεία παρουσίας σταθμών βάσης WiMAX, με απευθείας διασύνδεση σε υφιστάμενες ενσύρματες ή ασύρματες υποδομές μετάδοσης. Το WiMAX

μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί και ως τεχνολογία ζευκτικού δικτύου μεταξύ σταθμών βάσης.



Εικόνα 2.2 Τοπολογία δικτύου WiMAX

Από ένα σταθμό βάσης WiMAX σταθερής πρόσβασης, η υπηρεσία μπορεί να παρέχεται στους συνδρομητές με διαφορετικούς τρόπους. Ο απλούστερος τρόπος συνίσταται στη χρήση κατάλληλου τερματικού εξοπλισμού WiMAX σε κάθε συνδρομητή. Ο τερματικός εξοπλισμός WiMAX μπορεί να είναι εξωτερικού ή εσωτερικού χώρου

Όσον αφορά τη σύγκριση της υποδομής WiMAX με τα παλαιότερης τεχνολογίας συστήματα ΣΑΡ, πέραν της ευρυζωνικότητας και των, νέου τύπου, υπηρεσιών που δεν υποστηρίζουν τα παλαιότερα δίκτυα, τα συστήματα WiMAX διαθέτουν πλήθος άλλων συγκριτικών πλεονεκτημάτων και συγκεκριμένα :

- Η τυποποίηση της τεχνολογίας WiMAX έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους των σταθμών βάσης.
- Η αρχιτεκτονική των παλαιότερων συστημάτων, επέβαλε τη χρήση σταθμών τριών διαφορετικών κατηγοριών, δηλαδή κεντρικού αναμεταδότη και τερματικού σταθμού. Με χρήση της

τεχνολογίας WiMAX όλοι οι σταθμοί καθίστανται ισοδύναμες οντότητες, που εγκαθίστανται στις θέσεις των άλλοτε κεντρικών ή αναμεταδοτών σταθμών, ενώ στη τώρα στη θέση των παλαιών τοποθετούνται απλά τερματικά WiMAX με πολύ χαμηλότερο κόστος κτήσης.

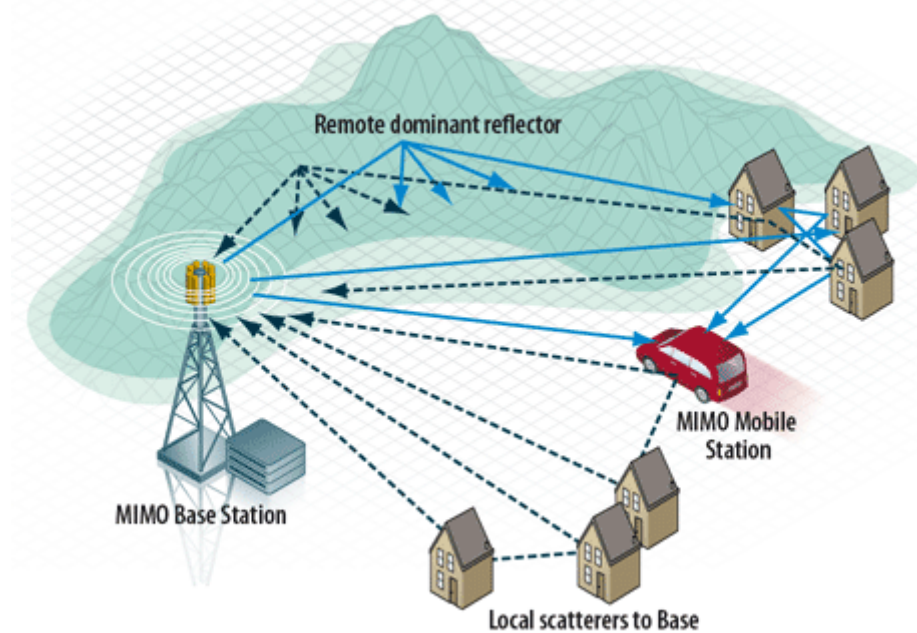
- Οι διεπαφές Ethernet μειώνουν το κόστος εξοπλισμού διασυνδέσεων με άλλες υποδομές απλουστεύοντας έτσι τη μορφή και τη λειτουργικότητα των δικτύων πρόσβασης και μετάδοσης.

### **2.3.1 Τοπολογία κινητού WiMAX**

Η χρήση εξοπλισμού συμβατού με το IEEE 802.16-2005 (Mobile WiMAX) επιτρέπει την υλοποίηση τοπολογιών, που είναι αντίστοιχες με εκείνες για σταθερή πρόσβαση. Στην περίπτωση αυτή εκτός από σταθερή και νομαδική πρόσβαση, παρέχονται και υπηρεσίες με κινητικότητα και φορητότητα.

Παρά το γεγονός ότι η γενική μορφή της τοπολογίας πρόσβασης δεν αλλάζει θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό η ανάγκη υλοποίησης δικτύου μεγαλύτερης πυκνότητας, καθώς και ανάγκη για κινητικότητα, αλλά και η γενικότερη υλοποίηση του προτύπου προϋποθέτει μικρότερη εμβέλεια σταθμού βάσης και κινούμενων τερματικών.

Η κινητή πρόσβαση WiMAX βρίσκει επιπλέον πεδία εφαρμογής, σε υπηρεσίες ασφάλειας (όπως τράπεζες, νοσοκομεία, αστυνομικά κέντρα), σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, σε στόλους οχημάτων (περιπολικά), ασθενοφόρα, μέσα μαζικής μεταφοράς) ακόμη και σε μεγάλες διοργανώσεις (ολυμπιακούς αγώνες, αγώνες υψηλής ταχύτητας οχημάτων ). Επιπλέον, η εγκατάσταση ενός δικτύου κινητού WiMAX κρίνεται τελικά τόσο από οικονομικής άποψης όσο και από τεχνικής περισσότερο συμφέρουσα σε δίκτυα με ημιαστικό και αστικό περιβάλλον και όχι τόσο σε αγροτικές περιοχές.



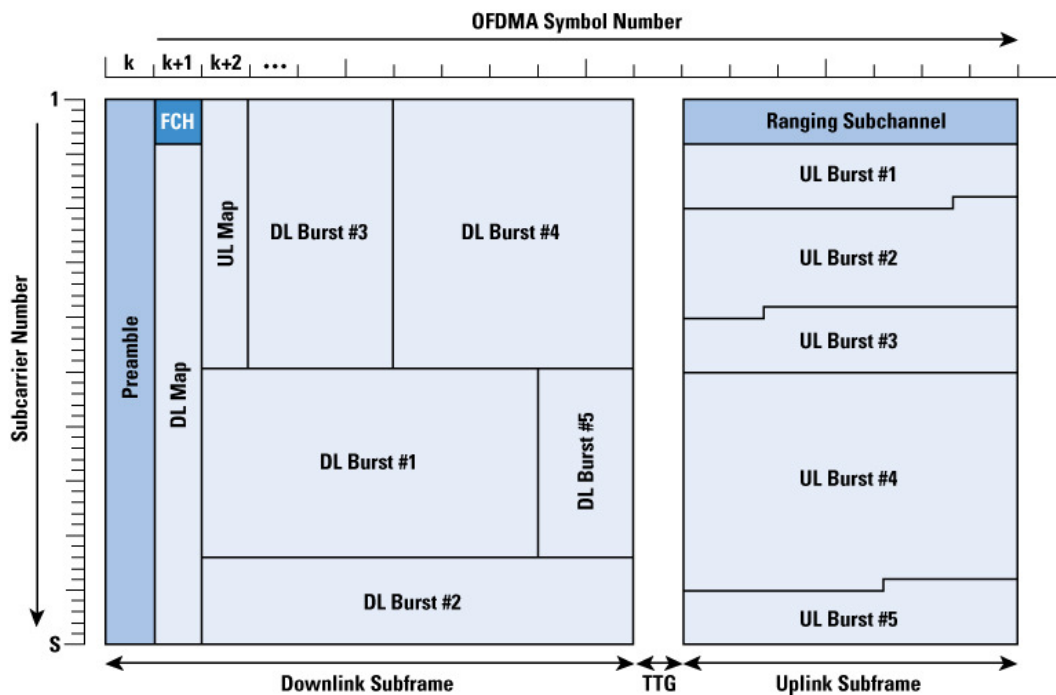
**Εικόνα 2.3 Δίκτυο κινητού WiMAX**

## 2.4 Φυσικό επίπεδο του WiMAX

Το φυσικό επίπεδο του WiMAX βασίζεται στην ορθογώνια πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας. Το OFDM είναι ένα σύστημα μετάδοσης που προτιμάται από τη βιομηχανία για επικοινωνίες δεδομένων, βίντεο και πολυμέσων σε υψηλές ταχύτητες και χρησιμοποιείται από πλήθος εμπορικών ευρυζωνικών συστημάτων, όπως DSL, Wi-Fi. Το OFDM είναι ένα καλοσχεδιασμένο και ικανό σύστημα για μετάδοση δεδομένων με υψηλό ρυθμό, σε ένα περιβάλλον χωρίς οπτική επαφή ή με πολλαπλές διαδρομές. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί η βασική θεωρία του OFDM και μία επισκόπηση του φυσικού επιπέδου του WiMAX.

### 2.4.1 Βασική θεωρία του OFDM

Το OFDM ανήκει σε μία οικογένεια συστημάτων μετάδοσης που ονομάζεται διαμόρφωση πολλαπλού φορέα, η οποία βασίζεται στη διαίρεση μίας δεδομένης ροής δεδομένων με υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε αρκετά παράλληλες ροές μετάδοσης με χαμηλότερο ρυθμό και στην διαμόρφωση κάθε ροής σε ξεχωριστούς φορείς, οι οποίοι συχνά ονομάζονται υποφορείς ή τόνοι. Η διαμόρφωση πολλαπλού φορέα εξαλείφει ή ελαχιστοποιεί τη διασυμβολική παρεμβολή (ISI),μεγαλώνοντας το χρόνο συμβόλου, ώστε οι καθυστερήσεις που προκαλούν τα κανάλια (η εξάπλωση της καθυστέρησης είναι ένα καλό μέτρο υπολογισμού σε ασύρματα κανάλια) να είναι ένα αμελητέο κλάσμα (συνήθως, <10%) της διάρκειας συμβόλου. Κατά συνέπεια, σε συστήματα με υψηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, Όπου η διάρκεια συμβόλου είναι μικρή, αντιστρόφως ανάλογη με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ο διαχωρισμός της ροής δεδομένων σε πολλές παράλληλες ροές αυξάνει τη διάρκεια συμβόλου κάθε ροής, ώστε η εξάπλωση της καθυστέρησης να είναι μόνο ένα μικρό κλάσμα της διάρκειας συμβόλου.



**Εικόνα 2.4: OFDM WiMAX**

Το OFDM είναι μία πολύ αποτελεσματική φασματικά έκδοση της διαμόρφωσης πολλαπλού φορέα, όπου οι υποφορείς επιλέγονται έτσι, ώστε

να είναι όλοι ορθογώνιοι μεταξύ τους κατά τη διάρκεια ενός συμβόλου, αποφεύγοντας έτσι την ανάγκη για μη επικαλυπτόμενα κανάλια υποφορέων προκειμένου να εξαλείφεται η παρεμβολή μεταξύ των φορέων. Η επιλογή του πρώτου υποφορέα γίνεται έτσι, ώστε να έχει μία συχνότητα που του δίνει έναν ακέραιο αριθμό κύκλων σε μία περίοδο συμβόλου και ο ορισμός της απόστασης μεταξύ γειτονικών υποφορέων (εύρος ζώνης υποφορέα) έτσι, ώστε να είναι  $B_{SC} = B/L$ , όπου  $B$  το ονομαστικό εύρος ζώνης (ίσο με τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων) και  $L$  ο αριθμός των υποφορέων, εξασφαλίζει ότι όλοι οι τόνοι είναι ορθογώνιοι μεταξύ τους στην περίοδο συμβόλου. Μπορεί να αποδειχθεί ότι το σήμα OFDM είναι ισοδύναμο με τον αντίστροφο διακριτό μετασχηματισμό Fourier (IDFT) του μπλοκ της ακολουθίας δεδομένων, λαμβάνοντας  $L$  κάθε φορά. Γίνεται έτσι εξαιρετικά εύκολη η υλοποίηση πομπών και δεκτών OFDM σε διακριτό χρόνο χρησιμοποιώντας IFFT (αντίστροφος γρήγορος μετασχηματισμός Fourier) και FFT αντίστοιχα.

#### **2.4.2 Ομαδοποίηση Υποδιαύλων και Δομή Πλαισίου WiMAX**

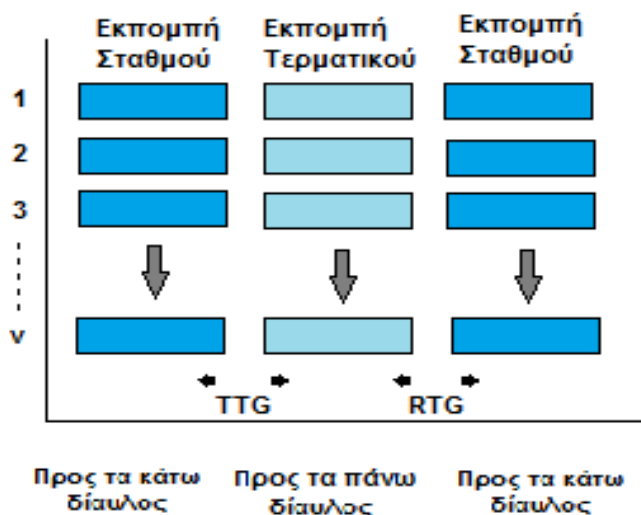
Το πλαίσιο μετάδοσης WiMAX αποτελείται από δύο υποπλαίσια:

- Το υποπλαίσιο για τη μετάδοση από το σταθμό βάσης προς τα τερματικά (DL subframe) και
- το υποπλαίσιο για τη μετάδοση από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης (UL subframe).

Στα περισσότερα συστήματα WiMAX, σε περίπτωση αμφίδρομης μετάδοσης TDD, παρέχεται ευελιξία όσον αφορά τον καθορισμό της δομής του πλαισίου, με δυνατότητα ανάθεσης διαφορετικού ποσοστού του πλαισίου στα DL ή UL υποπλαίσια. (π.χ. 70/30, 65/25, 60/40, 50/50 κλπ).

Μεταξύ των υποπλαισίων DL και UL μεσολαβεί ένα μικρό χρονικό διάκενο, που ονομάζεται διάκενο μετάβασης εκπομπής - λήψης (Transmit / receive Transition Gap-TTG). Όταν ολοκληρωθεί η εκπομπή του υποπλαισίου UL, μεσολαβεί ένα επιπλέον διάκενο, μέχρι την έναρξη του νέου υποπλαισίου

DL, που ονομάζεται διάκενο μετάβασης λήψης - εκπομπής (Receive / transmit Transition Gap-RTG). Η χρονική διάρκεια των TTG και RTG υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο, ως συνάρτηση τους εύρους του διαύλου και του χρόνου εκπομπής του συμβόλου OFDM. Τα υποπλαίσια DL και UL του πλαισίου WiMAX και τα διάκενα μετάβασης TTG και RTG απεικονίζονται στην εικόνα 2.5.



**Εικόνα 2.5 : Διάκενα Εκπομπής/Λήψης και Λήψης /Εκπομπής στο πλαίσιο TDD**

Η ομαδοποίηση υποφερόντων σε υποδιαύλους (Subchannelization) είναι ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό της δομής του πλαισίου WiMAX. Η Subchannelization παρέχει σε κάθε τερματικό συνδρομητή να καταλαμβάνει μόνο το απαραίτητο, κάθε φορά, εύρος ζώνης, για αποδοτικότερη χρήση του διαθέσιμου ραδιοφάσματος. Καθώς, κάθε σύμβολο OFDM μεταδίδεται πάνω από όλα τα υποφέροντα, εάν η συνολικά προσφερόμενη ρυθμοαπόδοση δεν ήταν δυνατό να κατατμηθεί, η μετάδοση δεδομένων από κάποιο τερματικό θα σήμαινε κατάληψη μεγάλου εύρους ζώνης (π.χ. 192 [υποφέροντα δεδομένων] x [6 bit/υποφέρων (για 64QAM)] = 1192 bit στο σταθερό WiMAX και [360 υποφέροντα δεδομένων] x [6 bit/υποφέρων] = 2160 bit για 64 QAM αντίστοιχα στο κινητό WiMAX).

Στο σταθερό WiMAX, η ομαδοποίηση υποφερόντων σε υποδιαύλους γίνεται μόνο στην εκπομπή από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης (UL),

όπου ορίζονται 16 υποδιαύλοι, που μπορούν να αποδοθούν σε ένα ή περισσότερα τερματικά, με την προϋπόθεση ότι μόνο ένα τερματικό μπορεί να εκπέμψει σε ένα συγκεκριμένο υποδιαύλο κάθε χρονική στιγμή. Αν θεωρήσουμε ότι έχουμε 192 υποφέροντα δεδομένων, κάθε υποδιαύλος διαθέτει προς μετάδοση  $192/16=12$  υποφέροντα. Συνεπώς, κάθε τερματικό μπορεί να εκπέμψει σε πολλαπλάσια του  $1/16$  του συνολικά διαθέσιμου ρυθμού μετάδοσης. Αντίστοιχα, κατά τη διάρκεια μετάδοσης ενός συμβόλου, 1, 2, 4, 8 έως και 16 τερματικά μπορούν να εκπέμψουν προς το σταθμό βάσης.

Στο κινητό WiMAX, η ομαδοποίηση υποφερόντων σε υποδιαύλους γίνεται τόσο στην εκπομπή από το σταθμό βάσης προς τερματικά (DL), όσο και στην εκπομπή από τα τερματικά προς το σταθμό βάσης (UL), επιτρέποντας κατά αυτόν τον τρόπο ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία. Επιπλέον, γίνεται χρήση σχημάτων δυναμικής αντιστοίχισης υποφερόντων σε υποδιαύλους.

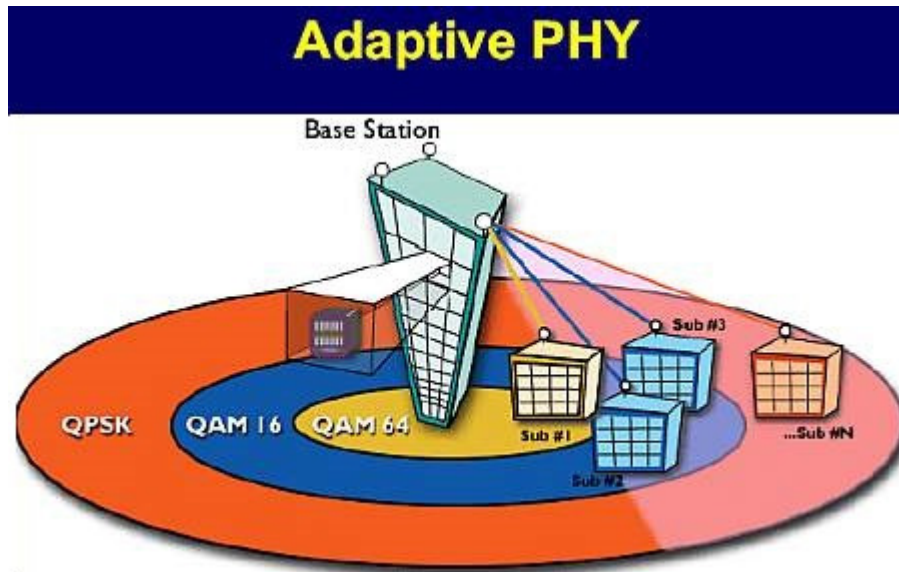
Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι η κατάτμηση σε υποδιαύλους επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στην εκπομπή πολύ μικρού ή πολύ μεγάλου όγκου δεδομένων, επιτυγχάνοντας μείωση της χρονοκαθυστερήσης μετάδοσης και της διακύμανσης αυτής, με ταυτόχρονη αύξηση της ρυθμοαπόδοσης.

### **2.4.3 Προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση στο WiMAX**

Το σύστημα WiMAX μπορεί να υποστηρίξει πολλά συστήματα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης και επιτρέπει την αλλαγή ενός συστήματος σε κάθε ριπή ανά σύνδεση, ανάλογα με τις συνθήκες καναλιού. Η κινητή συσκευή μπορεί να παρέχει στο σταθμό βάσης πληροφορίες για την ποιότητα του καναλιού λήψης, χρησιμοποιώντας την ένδειξη ποιότητας καναλιού. Ο σταθμός βάσης, για την αποστολή, μπορεί να αξιολογήσει την ποιότητα του καναλιού με κριτήριο την ποιότητα του σήματος που λαμβάνει. Κατά τη λειτουργία του χρονοπρογραμματισμού του σταθμού βάσης, μπορεί να ληφθεί υπόψη η ποιότητα του καναλιού για την αποστολή και τη λήψη κάθε χρήστη



και να εφαρμοστεί ένα σύστημα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης που μεγιστοποιεί την απόδοση για το διαθέσιμο σηματο-θορυβικό λόγο. Η προσαρμοστική διαμόρφωση και κωδικοποίηση επιτρέπει, σε πραγματικό χρόνο, συμβιβαστικές ρυθμίσεις μεταξύ της απόδοσης και της ανθεκτικότητας κάθε ζεύξης, με αποτέλεσμα να αυξάνει σημαντικά τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος.



**Εικόνα 2.6 Προσαρμοστική Διαμόρφωση του WiMAX**

Για την καθοδική ζεύξη, τα QPSK, 16 QAM και 64 QAM είναι υποχρεωτικά για το σταθερό και το κινητό WiMAX, ενώ το 64 QAM είναι προαιρετικό για την ανοδική ζεύξη. Η κωδικοποίηση FEC που χρησιμοποιεί κωδικούς συνέλιξης είναι υποχρεωτική. Οι κωδικοί συνέλιξης συνδυάζονται με έναν εξωτερικό κωδικό Reed-Solomon στην καθοδική ζεύξη για το OFDM-PHY. Το πρότυπο υποστηρίζει προαιρετικά κωδικούς διόρθωσης σφαλμάτων turbo (turbo codes) και κωδικούς ελέγχου ισότητας χαμηλής πυκνότητας (LDPC) σε διάφορους ρυθμούς μετάδοσης κωδικών. Στο WiMAX ορίζονται συνολικά 52 συνδυασμοί συστημάτων διαμόρφωσης και κωδικοποίησης ως προφίλ εκπομπής.

## 2.5 WiMAX Επίπεδο MAC

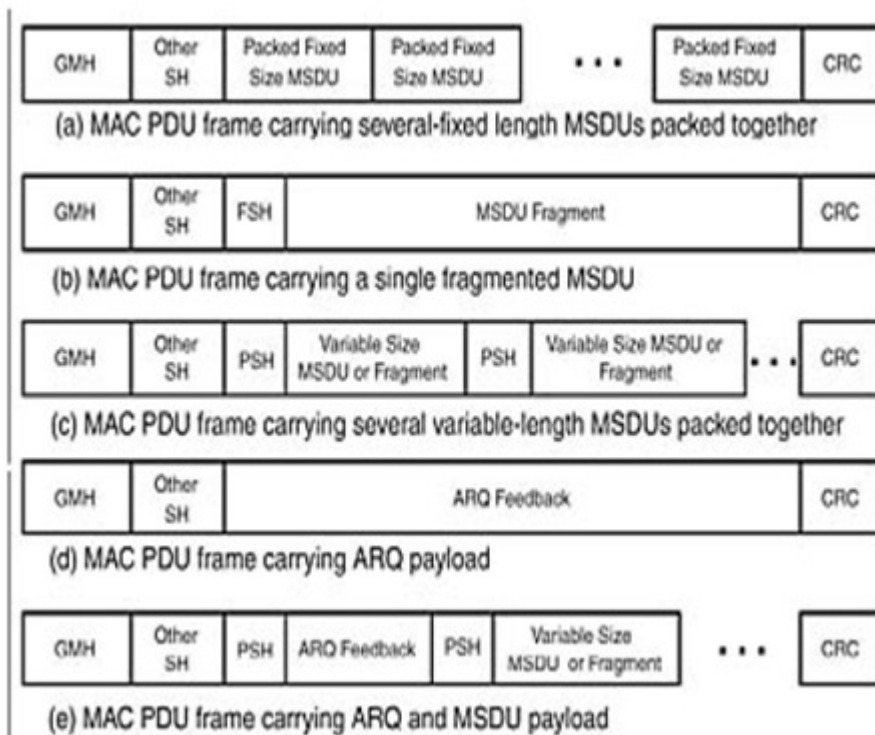
### 2.5.1 Επισκόπηση

Η κύρια αποστολή του WiMAX Mac layer είναι παρέχει τη διεπαφή μεταξύ των υψηλότερων επιπέδων των μεταφορών και του φυσικού στρώματος. Το επίπεδο Mac παίρνει πακέτα από το ανώτερο στρώμα-πρόκειται για τα πακέτα δεδομένων υπηρεσιών δεδομένων που ονομάζονται Mac μονάδες (MSDUs) και τα οργανώνει σε Mac πρωτόκολλα δεδομένων μονάδες (MPDUs) για μετάδοση μέσω του αέρα.

Το επίπεδο Mac κάνει το αντίθετο για τις εισερχόμενες μεταδόσεις. Στο IEEE 802.16-2004 και IEEE 802.16e-2005 MAC ο σχεδιασμός περιλαμβάνει ένα υπόστρωμα σύγκλισης που μπορεί να πετύχει διασύνδεση με μία ποικιλία υψηλότερων στρωμάτων πρωτοκόλλων, όπως ATM, TDM Voice, Ethernet, IP, καθώς και κάθε άγνωστο πρωτόκολλο. Αυτή τη στιγμή, το WiMAX Forum υποστηρίζει μόνο IP και Ethernet, καθώς αυτά έχουν επικρατήσει στον κλάδο. Το WiMAX MAC έχει σχεδιαστεί από το έδαφος, προκειμένου να στηρίξει λίγο πολύ υψηλές κορυφές των συντελεστών κατά την παράδοση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών παρόμοια με εκείνη των ATM και DOCSIS. Το WiMAX MAC χρησιμοποιεί ένα MPDU μεταβλητού μήκους και προσφέρει μεγάλη ευελιξία για να επιτρέψει την αποτελεσματική μετάδοση. Για παράδειγμα, πολλαπλές MPDUs του ίδιου ή διαφορετικού μήκους μπορούν να συγκεντρώνονται σε ένα για να αποθηκεύσουν το PHY overhead. Κατά τον ίδιο τρόπο, τα πολλαπλά MSDUs από την ίδια υπηρεσία υψηλότερων στρωμάτων μπορούν να συνενωθούν σε ένα ενιαίο MPDU. Αντιθέτως, τα μεγάλα MSDUs μπορούν να είναι κατακερματισμένα σε μικρότερα MPDUs και αποστέλλονται σε πολλά πλαίσια.

Στο γράφημα που ακολουθεί παρουσιάζονται παραδείγματα διαφόρων MAC PDU πλαισίων. Κάθε MAC πλαίσιο είναι το πρόθεμα με ένα γενικό MAC header (GMH) που περιέχει ένα αναγνωριστικό μήκος του πλαισίου, και πράγματα που πρέπει να τυχόν της παρουσίας CRC, subheaders, αν και το ωφέλιμο φορτίο είναι κρυπτογραφημένο. Το MAC ωφέλιμο φορτίο είναι είτε

μία μεταφορά ή ένα μήνυμα διαχείρισης. Εκτός από MSDUs, οι αιτήσεις εύρους ζώνης ή η αναμετάδοση των αιτήσεων μπορεί να περιέχουν τη μεταφορά ωφέλιμου φορτίου. Το είδος της μεταφοράς ωφέλιμου φορτίου, προσδιορίζεται από το subheader που αμέσως προηγείται. Το WiMAX MAC υποστηρίζει επίσης ARQ, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ζητήσει την αναμετάδοση των unfragmented MSDUs και θραύσματα MSDUs. Η μέγιστη διάρκεια είναι 2047 bytes, η οποία συμμετάσχει κατά 11bits στην GMH.



**Εικόνα 2.7: Παραδείγματα διαφόρων πλαισίων MAC PDU**

CRC: Cycle Redundancy Check.

FSH: Fragmentation Subheader.

GMH: Generic MAC Header.

PSH: Packing Subheader.

SH: Subheader.

## 2.5.2 Ποιότητα Υπηρεσιών

Το δίκτυο WiMAX υλοποιεί κλάσεις υπηρεσιών, οι οποίες πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις και περιορισμούς προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για παροχή εγγυημένης ποιότητας σε διαφορετικό τύπο υπηρεσιών. Συγκεκριμένα παρέχεται η δυνατότητα διαχωρισμού των υπηρεσιών, με βάση τις κλάσεις, με τον τύπο υπηρεσίας (Type of Service – ToS), βάσει της IP διεύθυνσης, καθώς επίσης βάσει της χρήσης εικονικών δικτύων (VLAN).

### **Κλάσεις Υπηρεσιών (Service Classes):**

Για το σταθερό WiMAX προβλέπονται συνολικά τέσσερις κλάσεις υπηρεσιών, ενώ για το κινητό WiMAX προβλέπονται πέντε κλάσεις .

**Καλύτερης Προσπάθειας – ΚΠ:** Πρόκειται για την πιο απλή κλάση υπηρεσιών, η οποία βασίζεται στη βέλτιστη προσπάθεια. Υποστηρίζει υπηρεσίες πλοήγησης στο διαδίκτυο, λήψη αποστολή e-mail και άλλες ασύμμετρες, κυρίως, υπηρεσίες δεδομένων. Πρόκειται για ροές δεδομένων για τις οποίες δεν απαιτείται ελάχιστη εγγυημένη ποιότητα και στις οποίες η ρυθμοποίηση κυμαίνεται χρονικά βάσει του φόρτου του δικτύου, καθώς κάθε χρήστης υπόκειται σε ανταγωνισμό με άλλους χρήστες που έχουν πρόσβαση στο ίδιο εύρος ζώνης. Σε αυτήν την κλάση ορίζεται μόνο το ανώτερο όριο του ρυθμού μετάδοσης, το οποίο μπορεί να διατεθεί στο χρήστη, χωρία να παρέχεται καμία εγγύηση ελάχιστου ορίου, ούτε της χρονοκαθυστέρησης (latency) και της διακύμανσής της. Είναι, ωστόσο, δυνατό να ορισθούν προτεραιότητες μεταξύ των χρηστών BE, βάσει των οποίων κάποιος χρήστης BE μπορεί να προηγείται έναντι άλλου με χαμηλότερη προτεραιότητα στη λήψη της υπηρεσίας.

**Υπηρεσία Σταθμοσκόπησης σε Μη Πραγματικό Χρόνο (ΥΣΜΠΧ):** η οποία υποστηρίζει υπηρεσίες δεδομένων που περιλαμβάνουν πακέτα δεδομένων μεταβλητού μεγέθους, ανεκτικές σε χρονικές καθυστερήσεις, αλλά απαιτούν ένα ελάχιστο εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Η υπηρεσία FTP αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού του είδους υπηρεσιών. Όταν παραμετροποιείται μία υπηρεσία nrtPS, ορίζεται ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης που μπορεί να παρέχεται στο χρήστη – εφόσον υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι - εκτός από τον ελάχιστο εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν και προτεραιότητες μεταξύ των χρηστών. Η διαφορά αυτής της κλάσης με τη BE έγκειται - πέρα από τον ελάχιστο εγγυημένου ρυθμό απόδοσης - στο ότι ο σταθμός βάσης εξετάζει περιοδικά τα τερματικά, τα οποία ανήκουν στην ίδια κλάση nrtPS, για αιτήματα χρήσης της υπηρεσίας και προγραμματίζει τη χρονική κατανομή των πόρων του, ωστόσο δεν υπάρχει εγγύηση χρονικής καθυστέρησης. Στην υπηρεσία nrtPS παρέχεται μεγαλύτερη προτεραιότητα από την υπηρεσία BE.

**Υπηρεσία Σταθμοσκόπησης σε Πραγματικό Χρόνο (ΥΣΠΧ):** η υπηρεσία σταθμοσκόπησης σε πραγματικό χρόνο είναι η επόμενη κλάση, η οποία υποστηρίζει υπηρεσίες δεδομένων πραγματικού χρόνου που απαρτίζονται από πακέτα μεταβλητού μεγέθους, τα οποία μεταδίδονται σε καθορισμένα, περιοδικά χρονικά διαστήματα. Οι υπηρεσίες ήχου και κινούμενης εικόνας (real time audio, real time video / audio streaming, video streaming) αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα των υπηρεσιών αυτής της κλάσης. Σε αυτές τις ροές δεδομένων παρέχεται εγγύηση ελάχιστου ρυθμού μετάδοσης και μέγιστης πιθανής χρονικής καθυστέρησης. Επίσης, ορίζονται τόσο ο μέγιστος επιτρεπτός ρυθμός, όσο και ο ελάχιστος εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης, που μπορεί να επιτύχει ο χρήστης. Υπάρχει, επιπλέον, η δυνατότητα ορισμού προτεραιότητας μεταξύ των χρηστών rtPS, οι οποίοι έχουν προτεραιότητα έναντι των χρηστών nrtPS και BE. Η ουσιώδης διαφορά της rtPS με τη nrtPS είναι η εγγύηση της μέγιστης πιθανής χρονικής καθυστέρησης. Αυτή η εγγύηση είναι εφικτή με τον ορισμό του μέγιστου χρόνου ζωής των αντίστοιχων πακέτων δεδομένων και την περιοδική, τακτική εξέταση των τερματικών των χρηστών, σχετικά με αιτήματα χρήσης των υπηρεσιών rtPS.

### 2.5.3 Λειτουργίες ασφάλειας

Το δίκτυο WiMAX, προκειμένου να ανταποκριθεί στην ανάγκη για ασφαλή πρόσβαση στα τερματικά των χρηστών αλλά και προστασία των δεδομένων, υιοθετεί κατάλληλες τεχνικές ασφάλειας και κρυπτογράφησης. Διαδικασίες όπως η εξουσιοδοτημένη πρόσβαση (authorization) και η πιστοποίηση ταυτότητας χρήστη (authentication) διασφαλίζουν την ασφάλεια, ελέγχοντας και επιτρέποντας ή όχι την εγγραφή ενός τερματικού και την πρόσβασή του στους πόρους του σταθμού βάσης. Η χρήση εξελιγμένων προτύπων κρυπτογράφησης υποστηρίζει, επίσης, την ασφάλεια των δεδομένων.

Για την εγγραφή ενός τερματικού σε σταθμό βάσης, απαιτείται η καταχώρησή του στο σύστημα διαχείρισης, προκειμένου να είναι δυνατή η ταυτοποίησή του από το δίκτυο. Η ταυτοποίηση γίνεται με διάφορους τρόπους, συνήθως με τη χρήση της διεύθυνσης MAC του τερματικού, η οποία είναι μοναδική για κάθε συσκευή, αποτυπώνεται σε κάθε μονάδα τερματικού εξοπλισμού και εκχωρείται σε αυτήν με μοναδικό τρόπο. Εάν ζητήσει πρόσβαση σε κάποιο συγκεκριμένο σταθμό ένα τερματικό με συγκεκριμένη MAC διεύθυνση, η οποία όμως δεν έχει καταχωρηθεί στο σύστημα διαχείρισης, τότε αυτό δε θα επιτρέψει την πρόσβαση.

Με το πέρας της επιτυχημένης εκχώρησης πρόσβασης και εγγραφής (δήλωσης) του τερματικού στο σταθμό βάσης, εκχωρούνται στο τερματικό συγκεκριμένοι λογικοί δίαυλοι για τα δεδομένα διαχείρισης και πληροφορίας, ώστε να αρχίσει η διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά κρυπτογραφούνται, με την ανταλλαγή κατάλληλων κλειδιών κρυπτογράφησης, προκειμένου να διασφαλίζεται η προστασία από πιθανές υποκλοπές. Εκτός από τα δεδομένα διαχείρισης, η κρυπτογράφηση εφαρμόζεται και στα δεδομένα πληροφορίας, με ξεχωριστές διαδικασίες και διαφορετικά συνήθως πρότυπα κρυπτογράφησης.

Ο αλγόριθμος κρυπτογράφησης 3-DES (Triple Data Encryption Standard) χρησιμοποιείται στις περισσότερες νέες υλοποιήσεις (κινητό WiMAX) για την κρυπτογράφηση των δεδομένων πληροφορίας χρήστη. Η κρυπτογράφηση των δεδομένων διαχείρισης, τα οποία ανταλλάσσονται

μεταξύ σταθμού βάσης και τερματικών, γίνεται με τον αλγόριθμο AES (Advanced Encryption Standard) των 128 bit. Σε παλαιότερες υλοποιήσεις εφαρμόζονταν οι κρυπτογραφήσεις DES και 3-DES αντίστοιχα. Οι προαναφερόμενοι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης, ιδιαίτερα ο AES, έχουν υιοθετηθεί παγκοσμίως από πολλές υπηρεσίες ασφαλείας, καθώς θεωρούνται από τους πλέον ασφαλείς.

#### 2.5.4 Υποστήριξη Κινητικότητας

Το δίκτυο WiMAX αντιμετωπίζει τέσσερα σενάρια χρήσης όσον αφορά την κινητικότητα, πέρα από τη σταθερή ευρυζωνική πρόσβαση:

- **Νομαδική:** Ένας σταθερός σταθμός συνδρομητών επιτρέπεται ανά χρήστη και υπάρχει η δυνατότητα επανασύνδεσης από διαφορετικό σημείο.

- **Φορητή:** Μία φορητή συσκευή (π.χ. μία κάρτα PC) επιτρέπει τη νομαδική πρόσβαση, με την προσδοκία μίας μεταπομπής βέλτιστης προσπάθειας.

- **Απλή κινητικότητα:** Ο συνδρομητής έχει τη δυνατότητα να κινείται σε ταχύτητες έως 60 χιλιόμετρα την ώρα με σύντομες διακοπές (λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο) κατά τη μεταπομπή.

- **Πλήρης κινητικότητα:** Παρέχεται στο συνδρομητή η δυνατότητα κίνησης έως 120 χιλιόμετρα την ώρα και απρόσκοπτης μεταπομπής (καθυστέρηση μικρότερη από 50 ms και απώλεια πακέτων < 1%).

Υπάρχει η πιθανότητα ανάπτυξης των δικτύων WiMAX, αρχικά, για σταθερές και νομαδικές εφαρμογές και στη συνέχεια για σταδιακή εξέλιξη ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν φορητότητα και πλήρη κινητικότητα.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 καθορίζει ένα πλαίσιο εργασίας για την υποστήριξη της διαχείρισης κινητικότητας. Συγκεκριμένα, ορίζονται από το πρότυπο μηχανισμοί ειδοποίησης για την παρακολούθηση των σταθμών συνδρομητών κατά τη μετακίνησή τους από την περιοχή κάλυψης ενός σταθμού βάσης σε άλλον, ενώ είναι ενεργοί, ή κατά τη μετακίνησή τους από μία ομάδα ειδοποίησης σε άλλη, όταν είναι αδρανείς. Υπάρχουν, επίσης, πρωτόκολλα που επιτρέπουν μία απρόσωπη μετεπομπή συνδέσεων που

βρίσκονται σε εξέλιξη από έναν σταθμό βάσης σε άλλον. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιείται από το WiMAX Forum έτσι ώστε να αναπτύξει περαιτέρω τη διαχείριση της κινητικότητας μέσα σε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αρχιτεκτονικής δικτύου. Η κινητικότητα σε επίπεδα IP υποστηρίζεται, επίσης, από την αρχιτεκτονική, χρησιμοποιώντας κινητό IP.

Το πρότυπο IEEE 802.16e-2005 υποστηρίζει τρεις μεθόδους μεταπομπής, από τις οποίες η μία είναι υποχρεωτική και οι άλλες δύο προαιρετικές. Σκληρή μεταπομπή (HHO) ονομάζεται η υποχρεωτική μέθοδος μεταπομπής η οποία πρέπει υποχρεωτικά να υλοποιηθεί από το κινητό WiMAX αρχικά. Σε αυτήν τη μέθοδο υπονοείται μία απότομη μεταφορά σύνδεσης από ένα σταθμό βάσης σε άλλον. Οι αποφάσεις που αφορούν στη μεταπομπή λαμβάνονται από το σταθμό βάσης, τον κινητό σταθμό ή άλλη οντότητα, βάσει αποτελεσμάτων μέτρησης που αναφέρονται από τον κινητό σταθμό. Ο κινητός σταθμός εκτελεί τακτικά μία σάρωση ραδιοκυματικών συχνοτήτων (RF) και υπολογίζει την ποιότητα σήματος των γειτονικών σταθμών βάσης. Η σάρωση εκτελείται κατά τη διάρκεια διαλειμμάτων σάρωσης που εκχωρούνται από το σταθμό βάσης. Κατά τη διάρκεια αυτών των διαλειμμάτων σάρωσης, είναι δυνατό να εκτελείται προαιρετικά από τον κινητό σταθμό ένας αρχικός συγχρονισμός και συσχετισμός με έναν ή περισσότερους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Μόλις υλοποιηθεί μία απόφαση μεταπομπής, ξεκινά από το κινητό σταθμό ο συγχρονισμός με τη γραμμή μεταφοράς λήψης (καθοδική ζεύξη-downlink) του σταθμού βάσης που τον ενδιαφέρει, εξετάζεται η περιοχή ενδιαφέροντος, αν αυτό δεν έγινε κατά τη σάρωση, και τερματίζεται η σύνδεση με τον προηγούμενο σταθμό βάσης. Τα MPDU που δεν παραδόθηκαν στο σταθμό βάσης διατηρούνται μέχρι τη λήξη ενός χρονομέτρη.

Η γρήγορη εναλλαγή σταθμών βάσης (FBSS) και η μεταπομπή εκτεταμένης ποικιλότητας (MDHO) είναι οι δύο προαιρετικές μέθοδοι που υποστηρίζονται από το πρότυπο IEEE 802.16e-2005. Σε αυτές τις δύο μεθόδους, ο κινητός σταθμός βάσης διατηρεί μία έγκυρη σύνδεση συγχρόνως με περισσότερους από έναν σταθμούς βάσης. Στην FBSS ο κινητός σταθμός διατηρεί μία λίστα από τους εμπλεκόμενους σταθμούς βάσης, η οποία ονομάζεται ενεργό σύνολο. Αυτή η λίστα παρακολουθείται διαρκώς από τον κινητό σταθμό ο οποίος εκτελεί συγχρονισμό και διατηρεί ένα έγκυρο ID



σύνδεσης με κάθε σταθμό βάσης. Ωστόσο, επικοινωνεί μόνο με έναν σταθμό βάσης ο οποίος ονομάζεται BS άγκυρας. Στην περίπτωση που απαιτείται αλλαγή του BS άγκυρας, η σύνδεση εναλλάσσεται μεταξύ σταθμών βάσης, χωρίς να είναι απαραίτητη η εκτέλεση ειδοποίησης μεταπομπής. Απλά, ο κινητός σταθμός αναφέρει τον επιλεγμένο BS άγκυρας στο CQICH.

Στην MDHO, η οποία είναι παρόμοια με τη FBSS, ο κινητός σταθμός βάσης επικοινωνεί στα κανάλια λήψης και αποστολής ταυτόχρονα με όλους τους σταθμούς βάσης που υπάρχουν στο ενεργό σύνολο και στη συγκεκριμένη περίπτωση ονομάζεται σύνολο ποικιλότητας. Στο κανάλι λήψης, πολλαπλά αντίγραφα που λαμβάνονται από τον κινητό σταθμό συνδυάζονται με κάποια από τις γνωστές τεχνικές συνδυασμού ποικιλότητας. Επιλογή ποικιλότητας για την ενεργοποίηση του καλύτερου καναλιού εκτελείται στο κανάλι αποστολής, όπου ο κινητός σταθμός στέλνει δεδομένα σε πολλαπλούς σταθμούς βάσης.

Τόσο η FBSS όσο και η MDHO παρέχουν απόδοση πολύ ανώτερη συγκρινόμενη με την HHO, αλλά απαιτούν το συγχρονισμό των σταθμών βάσης στο ενεργό σύνολο ή στο σύνολο ποικιλότητας, τη χρησιμοποίηση της ίδιας συχνότητας φορέα και των πληροφοριών που αφορούν στην είσοδο στο δίκτυο. Ωστόσο, τα δίκτυα WiMAX δεν έχουν αναπτύξει ακόμα πλήρως την υποστήριξη των μεθόδων FBSS και MDHO, ούτε αυτή αποτελεί μέρος του δικτύου του WiMAX Forum.

---

## 3. Αλγόριθμοι Πρόβλεψης

---

### 3.1 Εισαγωγή στην Πρόβλεψη

Η αναγνώριση προτύπων είναι ένα επιστημονικό πεδίο με ερευνητικό ενδιαφέρον που έχει ξεκινήσει από την δεκαετία του 1960, κατά την πρώτη περίοδο ανάπτυξης της πληροφορικής και συγκεκριμένα της τεχνητής νοημοσύνης. Ως στόχο έχει την ανάπτυξη αλγορίθμων για απόδοση κάποιας τιμής ή διακριτού στοιχείου σε εισαγόμενα δεδομένα.

Η ικανότητα του ανθρώπου να ταυτοποιεί πραγματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας την αντιληπτική του ικανότητα και τις αισθήσεις τον έχει οδηγήσει στην λήψη των κατάλληλων αποφάσεων για την επιβίωση του. Στο ίδιο μήκος κύματος και μια μηχανή όπως ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, πρέπει να εκπαιδευτεί κατάλληλα ώστε να έχει την δυνατότητα να αναγνωρίζει πρότυπα και να τα κατηγοριοποιεί αυτόματα σε κατηγορίες. Η μηχανική μάθηση αναφέρεται στον σχεδιασμό αλγορίθμων για τη δημιουργία ενός αυτόματου συστήματος που θα αποκτά γνώση βασιζόμενο σε εμπειρικά δεδομένα. Έχοντας ως δεδομένο μια υπάρχουσα συλλογή δεδομένων για τα οποία είναι γνωστή η κατηγορία στην οποία ανήκουν, στόχος είναι να βρεθεί μια συνάρτηση μεταβλητών που θα περιγράψει το μοντέλο τη κλάσης και η επιτυχία της θα μπορεί να αξιολογηθεί μέσω ενός νέου συνόλου δεδομένων. Οι αλγόριθμοι για την αναγνώριση προτύπων εξαρτώνται από τον τύπο της εξόδου, σχετικά με το εάν η υπό επίβλεψη μάθηση είναι στατιστικά ή μη στη φύση. Οι στατικοί αλγόριθμοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω ως παραγωγικοί ή διακριτικοί.

Στην σημερινή εποχή οι αλγόριθμοι πρόβλεψης βρίσκουν εφαρμογή σε πολλές επιστήμες όπως για παράδειγμα στην πληροφορική στον τομέα της μηχανικής όρασης ή της ρομποτικής, στην επιστήμη της ιατρικής στον τομέα της βιοϊατρικής τεχνολογίας, στην ανάλυση δεδομένων DNA- RNA και άλλες εφαρμογές της βιοπληροφορικής. Ένας ακόμα τομέας που παίζει ιδιαίτερα

σημαντικό ρόλο η πρόβλεψη είναι αυτός της επιχείρησης καθώς η πρόβλεψη της ζήτησης διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο για την οργάνωση μιας επιχείρησης. Τα τρία εργαλεία που θα αναπτύξουμε παρακάτω αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την πρόβλεψη της ζήτησης και συγκεκριμένα επειδή αναφερόμαστε σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα πρόσβασης WiMAX στόχος μας με την χρήση αυτών των εργαλείων είναι να προβλέψουμε τη ζήτηση των χρηστών του δικτύου ώστε να μπορούμε να αντιμετωπίσουμε αποτελεσματικά με διάφορες τεχνικές την περίοδο υψηλού φόρτου κίνησης.

Συγκεκριμένα τα εργαλεία που επιλέξαμε για το σκοπό αυτό είναι η παρεκτροπή, τα αυτόματα εκμάθησης και οι κρυφές αλυσίδες Μαρκόβ τα οποία αποτελούν δοκιμασμένα εργαλεία πρόβλεψης σε πολλούς κλάδους και επιστήμες τα τελευταία χρόνια. Για τον λόγο αυτό έγινε και οι επιλογή των εν λόγω αλγορίθμων καθώς θέλαμε να μελετήσουμε τις αποκρίσεις τους και την συμπεριφορά τους για δεδομένα που προκύπτουν από φόρτο κίνησης ενός δικτύου WiMAX και πραγματοποιήσουμε μια περεταίρω σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων ως προς την ακρίβεια τις πρόβλεψης, τον χρόνο προσομοίωσης και να μελετήσουμε παράγοντες που τους επηρεάζουν.

### 3.2 Εισαγωγή Στην Παρεμβολή (Interpolation)

Με την συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας και την ολοένα αυξανόμενη χρήση αριθμών και υπολογιστών βλέπουμε πως σταδιακά όλα γύρω μας αναπαρίστανται ψηφιακά. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πόσο σημαντικός είναι ο χειρισμός ή η γνώση δεδομένων πληροφοριών για να αναγνωρίσουμε ποιά σχέση τα συνδέει μεταξύ τους ή κάποιο μοτίβο που αυτά ακολουθούν. Σε πολλά προβλήματα δε γνωρίζουμε τη συνάρτηση στην αναλυτική της μορφή. Γνωρίζουμε την τιμή της μόνο σε ορισμένα σημεία και αναζητούμε έστω προσεγγιστικά την τιμή της συνάρτησης σε όλα τα σημεία που μας ενδιαφέρει. Στην περίπτωση της συνάρτησης μιας μεταβλητής το πρόβλημα τίθεται ως εξής :

Έστω η συνάρτηση  $f(x) \in C[a, b]$  για την οποία δίνονται οι τιμές σε  $n+1$  σημεία ως εξής :

$$f_i = f(x_i) ; i = 0, 1, \dots, n \quad (3.1)$$

Θέλουμε να προσεγγίσουμε τη συνάρτηση  $f$  με μία αναλυτική συνάρτηση  $P(x)$  τέτοια ώστε

$$|f(x) - P(x)| < \varepsilon \text{ για κάθε } x \in [a, b] \quad (3.2)$$

όπου ο πραγματικός αριθμός  $\varepsilon$  εκφράζει την επιθυμητή ακρίβεια.

Είναι προφανές ότι:

$$P(x_i) = f_i ; i = 0, 1, \dots, n \quad (3.3)$$

Η μορφή των συναρτήσεων που θα αναζητήσουμε στη συνέχεια, είναι αλγεβρικά πολυώνυμα της μορφής:

$$P(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (3.4)$$

όπου  $m$  φυσικός αριθμός και  $a_0, a_1, \dots, a_m$  είναι πραγματικοί αριθμοί. (Θα δούμε παρακάτω ότι τελικά  $m=n$ ).

Ένας από τους λόγους που χρησιμοποιούνται αυτά τα πολυώνυμα είναι ότι δημιουργούν προσεγγίσεις ομαλώς μεταβαλλόμενων συνεχών συναρτήσεων.

### 3.2.1 Πολυωνυμική προσέγγιση Lagrange

Έστω η συνάρτηση όπως ορίζεται στην (3.1).

Ένας τρόπος προσέγγισης με πολυώνυμα της μορφής (3.4) που ικανοποιεί την εξίσωση (3.3) είναι:

$$P(x) = a_0P_0(x) + a_1P_1(x) + \dots + a_kP_k(x) + \dots + a_nP_n(x) \quad (3.5)$$

Η σχέση (3.3) ικανοποιείται εάν:

$$P_k(x_k) = 1 \quad (3.6\alpha)$$

$$P_k(x_m) = 0 \text{ για } m \neq k \quad (3.6\beta)$$

$$a_k = f(x_k) \quad (3.6\gamma)$$

Η εξίσωση υποδεικνύει ότι το πολυώνυμο  $P_k(x)$  είναι  $n$  βαθμού με  $n$  ρίζες  $x_0, x_1, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n$ . Γνωρίζουμε ότι το πολυώνυμο αυτό μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$P_k(x) = A(x - x_0)(x - x_1)\dots(x - x_{k-1})(x - x_{k+1})\dots(x - x_n)$$

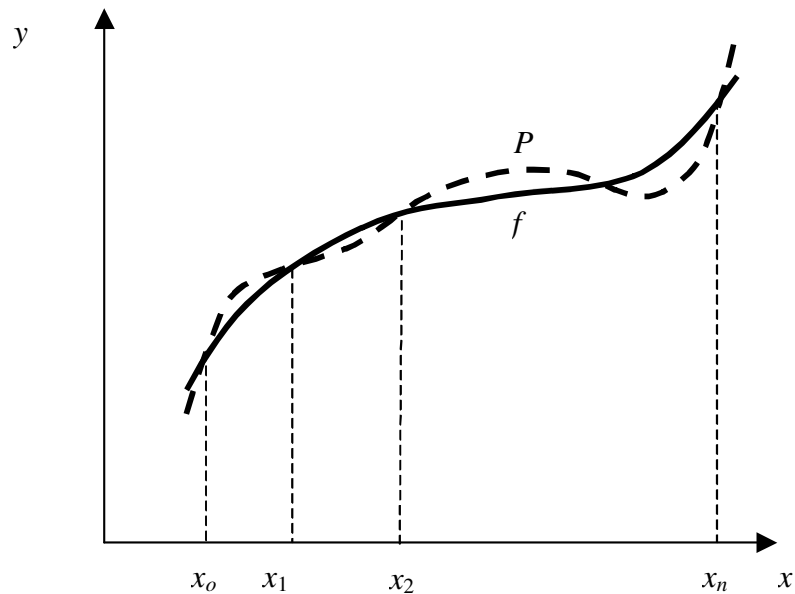
Η σταθερά  $A$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.6α)

$$A = 1/(x_k - x_0)(x_k - x_1)\dots(x_k - x_{k-1})(x_k - x_{k+1})\dots(x_k - x_n)$$

Έτσι το πολυώνυμο  $P_k(x)$  μπορεί να γραφεί:

$$P_k(x) = \prod_{\substack{i=0, \\ i \neq k}}^n \frac{(x - x_i)}{(x_k - x_i)} \quad (3.7)$$

Τα πολυώνυμα  $P_k(x)$  λέγονται πολυώνυμα Lagrange (συνήθως συμβολίζονται με  $L_k(x)$ ).



Συνοψίζοντας, η πολυωνυμική προσέγγιση  $P(x)$  της συνάρτησης  $f$  είναι ένα πολυώνυμο  $n$  βαθμού που δίνεται από τη σχέση:

$$P(x) = \sum_{k=0}^n f(x_k) \prod_{\substack{i=0, \\ i \neq k}}^n \frac{(x-x_i)}{(x_k-x_i)} \quad (3.8)$$

Η εξίσωση λέγεται πολυώνυμο παρεμβολής Lagrange.

**Θεώρημα.:** Εάν  $x_0, x_1, \dots, x_n$  είναι διακριτοί αριθμοί στο διάστημα  $[a, b]$  και  $f \in C^{n+1}[a, b]$ , τότε για κάθε  $x$  στο  $[a, b]$  υπάρχει ένας αριθμός  $\xi(x)$  στο  $(a, b)$  τέτοιος ώστε :

$$f(x) = P(x) + \frac{f^{(n+1)}(\xi(x))}{(n+1)!} (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n) \quad (3.9)$$

**Απόδειξη:** Ορίζουμε πρώτα τη συνάρτηση  $g(t)$  :

$$g(t) = f(t) - P(t) - [f(x) - P(x)] \prod_{i=0}^n \frac{(t-x_i)}{(x-x_i)} \quad (3.10)$$

Είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι η συνάρτηση  $g(t)$  έχει ρίζες τις τιμές  $x, x_0, x_1, \dots, x_n$ .

Σύμφωνα με το γενικό θεώρημα του Rolle υπάρχει αριθμός  $\xi$  στο  $(a,b)$  για τον οποίο  $g^{(n+1)}(\xi) = 0$ .

Εάν παραγωγίσουμε την (4.10) ως προς  $t$  και πάρουμε την τιμή της παραγώγου στην θέση  $\xi$  θα έχουμε:

$$0 = g^{(n+1)}(\xi) = f^{(n+1)}(\xi) - P^{(n+1)}(\xi) - [f(x) - P(x)] \frac{1}{\prod_{i=0}^n (x - x_i)} \frac{d^{(n+1)}}{dt^{(n+1)}} \prod_{i=0}^n (t - x_i)$$

Εάν λάβουμε υπόψη ότι  $P^{(n+1)}(\xi) = 0$  αφού το πολυώνυμο  $P(x)$  είναι  $n -$  βαθμού, και

$$\frac{d^{(n+1)}}{dt^{(n+1)}} \prod_{i=0}^n (t - x_i) = (n+1)!$$

τότε καταλήγουμε στη σχέση (3.9).

Η σχέση (3.9) δίνει το σφάλμα της πολυωνυμικής προσέγγισης.

### 3.2.2 Παραδείγματα με παρεμβολή πολυωνύμου Lagrange

#### Παράδειγμα 1<sup>ο</sup>:

Μας δίνεται το πολυώνυμο  $p = 0.05x^2 - 0.425x + 1.15$  και τα  $x_0=2$ ,  $x_1=2.5$  και  $x_2=4$  καθώς και η  $f(x)=1/x$ . Θέλουμε να υπολογίσουμε την  $f(3)$ .

Από τον τύπο της γραμμικής παρεμβολής έχουμε  $L_{n,k} = \prod_{i=0}^n \frac{x - x_i}{x_k - x_i}$

$$L_0(x) = \frac{(x-2.5)(x-4)}{(2-2.5)(2-4)} = (x-6.5)x+10$$

$$L_1(x) = \frac{(x-2)(x-4)}{(2.5-2)(2.5-4)} = \frac{(-4x+24)x-32}{3}$$

$$L_2(x) = \frac{(x-2)(x-2.5)}{(4-2)(4-2.5)} = \frac{(x-4.5)x+5}{3}$$

Έχουμε  $F(x_0)=f(2)=0.5$ ,  $f(x_1)=f(2.5)=0.4$  και  $f(x_2)=f(4)=0.25$

Από τον τύπο  $P(x) = \sum_{k=0}^2 f(x_k)L_k(x)$  έχουμε

$$= 0.5((x-6.5)x+10) + 0.4 \frac{(-4x+24)x-32}{3} + 0.25 \frac{(x-4.5)x+5}{3}$$

$$= (0.05x - 0.425)x + 1.15$$

Για  $x=3$  έχουμε  $f(3)=P(3)=0.325$

Άρα από την αναλυτική μας έχουμε την τιμή 0.325.



## Παράδειγμα 2<sup>ο</sup>:

Ο παρακάτω πίνακας Πίνακας 3.1 απαριθμεί τις τιμές της συνάρτησης σε διάφορα σημεία. Θα υπολογίσουμε την τιμή της  $f(x)$  για  $x=1.5$  χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή.

x	F(x)
1.0000	0.7652
1.3000	0.6201
1.6000	0.4554
1.9000	0.2818
2.2000	0.1104

Πίνακας 3.1 Παρουσίαση των τιμών της  $f(x)$

Αφού το  $x = 1.5$  βρίσκεται μεταξύ του 1.3 και του 1.6 το πιο κατάλληλο γραμμικό πολυώνυμο χρησιμοποιεί για  $x_0=1.3$  και  $x_1=1.6$ . Η τιμή του παρεμβαλλόμενου πολυωνύμου για  $x=1.5$  είναι :

$$P_1(1.5) = \frac{(1.5-1.6)}{(1.3-1.6)}(0.6200860) + \frac{(1.5-1.3)}{(1.6-1.3)}(0.4554022) = 0.5102968$$

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2 πολυώνυμα δευτέρου βαθμού με  $x_0=1.3$  και  $x_1=1.6$  και  $x_2=1.9$

$$P_2(1.5) =$$

$$\frac{(1.5-1.6)(1.5-1.9)}{(1.3-1.6)(1.3-1.9)}(0.6200860) + \frac{(1.5-1.3)(1.5-1.9)}{(1.6-1.3)(1.6-1.9)}(0.4554022) + \frac{(1.5-1.3)(1.5-1.6)}{(1.9-1.3)(1.9-1.6)} =$$

$$= 0.5112857$$

Θα υπολογίσουμε και το πολυώνυμο τρίτου βαθμού που χρησιμοποιεί για  $x_0=1.3$  και  $x_1=1.6$  και  $x_2=1.9$  και  $x_3=2.2$  που είναι  $P_3(1.5) = 0.5118302$  καθώς και το πολυώνυμο τετάρτου βαθμού που χρησιμοποιεί όλα τα στοιχεία του πίνακα με  $x_0=1.0$ ,  $x_1=1.3$ ,  $x_2=1.6$ ,  $x_3=1.9$  και  $x_4=2.2$  όπου  $P_4(1.5) = 0.5118302$ .

Περιμένουμε το  $P_4(1.5)$  να είναι ο πιο ακριβής υπολογισμός επειδή χρησιμοποιεί τα περισσότερα από τα στοιχεία του πίνακα που μας δίνονται. Επειδή όμως η συνάρτηση που υπολογίσουμε είναι γνωστή (Bessel function) γνωρίζουμε ότι η τιμή της  $f(x)$  για  $x = 1.5$  είναι 0.5118277 με βάση αυτό διαπιστώνουμε ότι η πιο ακριβής υπολογισμός είναι ο  $P_3(1.5)$ . Αν όμως δεν το γνωρίζαμε θα δεχόμασταν την  $P_4(1.5)$  σαν την πιο ακριβή.

### 3.2.3 Παρεμβολή με συναρτήσεις Σφήνα (Spline)

Μέχρι τώρα προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε τη συνάρτηση  $f$  με ένα ενιαίο πολυώνυμο παρεμβολής. Αυτή η μέθοδος δε δίνει πάντα ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Μία εναλλακτική λύση είναι να χρησιμοποιούμε τμηματικά πολυώνυμα κάποιου συγκεκριμένου βαθμού που περιγράφουν τη συνάρτηση μόνο στο διάστημα  $[x_i, x_{i+1}]$  και να είναι συμβατά με τα αντίστοιχα πολυώνυμα των γειτονικών διαστημάτων.

Το πλέον σύνηθες τμηματικό πολυώνυμο είναι η λεγόμενη κυβική συνάρτηση σφήνα (cubic spline function).

Η κυβική συνάρτηση σφήνα είναι πολυώνυμο τρίτου βαθμού και ορίζεται στο διάστημα  $[x_i, x_{i+1}]$  ως εξής:

$$S_i(x) = f_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad ; \quad \forall i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (3.11\alpha)$$

Με την ίδια λογική η κυβική συνάρτηση σφήνα στο διάστημα  $[x_{i+1}, x_{i+2}]$  θα είναι:

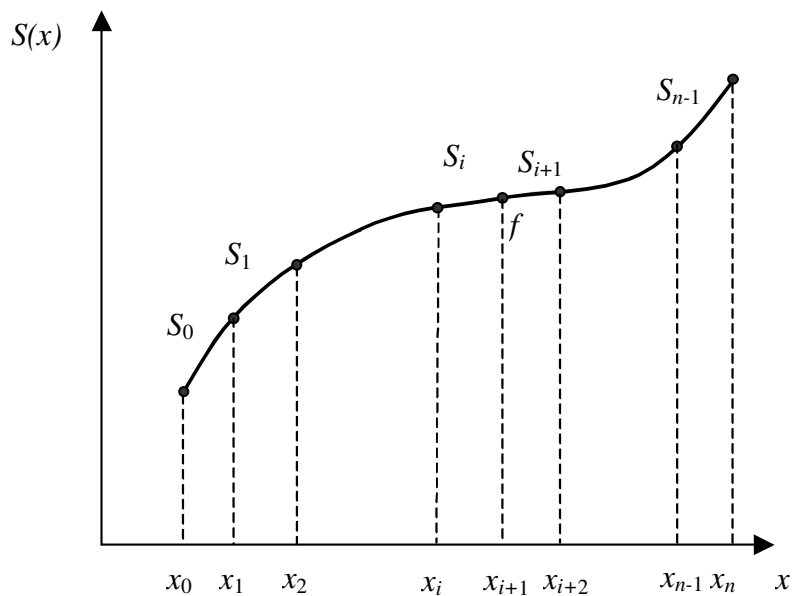
$$S_{i+1}(x) = f_{i+1} + b_{i+1}(x - x_{i+1}) + c_{i+1}(x - x_{i+1})^2 + d_{i+1}(x - x_{i+1})^3 \quad (3.11\beta)$$

Η συνάρτηση αυτή καθεαυτή καθώς και η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος είναι συνεχής στα όρια:  $x_{i+1}$ :

$$S_i(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1}) \quad ; \quad \forall i = 0, 1, \dots, n-2 \quad (3.12\alpha)$$

$$S_i'(x_{i+1}) = S_{i+1}'(x_{i+1}) \quad ; \quad \forall i = 0, 1, \dots, n-2 \quad (3.12\beta)$$

$$S_i''(x_{i+1}) = S_{i+1}''(x_{i+1}) \quad ; \quad \forall i = 0, 1, \dots, n-2 \quad (3.12\gamma)$$



Σχετικά με τις οριακές συνθήκες στα άκρα  $x_0$  και  $x_n$ , εάν δεν γνωρίζουμε την πρώτη και τη δεύτερη παράγωγο της συνάρτησης  $f$ , είναι εύλογο να υποθέσουμε

$$S''(x_0) = S''(x_n) = 0 \quad (3.13)$$

Η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος έχει ως εξής:

$$\begin{aligned} S'_i(x) &= b_i + 2c_i(x - x_i) + 3d_i(x - x_i)^2 \\ S''_i(x) &= 2c_i + 6d_i(x - x_i) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Η σχέση δίνει:

$$c_0 = c_n = 0 \quad (3.15)$$

Για λόγους απλότητας ορίζουμε:

$$h_i = x_{i+1} - x_i \quad (3.16)$$

Η οριακή συνθήκη δίνει :

$$f_{i+1} = f_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3 \quad (3.17)$$

Η οριακή συνθήκη δίνει :

$$b_{i+1} = b_i + 2c_i h_i + 3d_i h_i^2$$

Η οριακή συνθήκη δίνει :

$$c_{i+1} = c_i + 3d_i h_i \quad (3.18)$$

Εάν λύσουμε ως προς  $d_i$  την (3.18) και αντικαταστήσουμε στις εξ. (3.16) και (3.17) καταλήγουμε αντίστοιχα:

$$b_i = \frac{1}{h_i} \Delta f_i - \frac{h_i}{3} (2c_i + c_{i+1}) \quad \Delta f_i = f_{i+1} - f_i \quad (3.19)$$

$$b_{i+1} = b_i + h_i (c_i + c_{i+1}) \quad (3.20)$$

Προσπαθώντας να απαλείψουμε τον άγνωστο  $b$  από το σύστημα των εξ. δημιουργούμε τη διαφορά  $b_{i+1} - b_i$  όπως προκύπτουν από τις δύο αυτές εξισώσεις:

Από την εξίσωση έχουμε:

$$b_{i+1} - b_i = h_i (c_i + c_{i+1}) \quad (3.21)$$

Από την εξίσωση η διαφορά δημιουργείται αφού πρώτα εκφράσουμε την εξίσωση για  $i+1$  αντί για  $i$  και μετά αφαιρέσουμε την έκφραση:

$$b_{i+1} - b_i = \frac{1}{h_{i+1}} \Delta f_{i+1} - \frac{h_{i+1}}{3} (2c_{i+1} + c_{i+2}) - \frac{1}{h_i} \Delta f_i + \frac{h_i}{3} (2c_i + c_{i+1}) \quad (3.22)$$

Εξισώνοντας τα δεύτερα μέρη και χωρίζοντας γνωστούς από αγνώστους καταλήγουμε:

$$h_i c_i + 2(h_i + h_{i+1})c_{i+1} + h_{i+1}c_{i+2} = \frac{3}{h_{i+1}} \Delta f_{i+1} - \frac{3}{h_i} \Delta f_i$$

Για λόγους ευκολότερου χειρισμού αντικαθιστούμε  $i-1$  αντί για  $i$ :

$$h_{i-1}c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_i c_{i+1} = \frac{3}{h_i} \Delta f_i - \frac{3}{h_{i-1}} \Delta f_{i-1} \quad (3.23)$$

Την εξίσωση την χρησιμοποιούμε ως έχει για την λύση των συντελεστών

$c_2, c_3, \dots, c_{n-2}$ , δηλ.

$$h_{i-1}c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i)c_i + h_i c_{i+1} = \frac{3}{h_i} \Delta f_i - \frac{3}{h_{i-1}} \Delta f_{i-1}; i = 2, \dots, n-2 \quad (3.24\alpha)$$

Για τους αγνώστους  $c_1$  και  $c_{n-1}$  αξιοποιούμε τις οριακές συνθήκες.

Για τον άγνωστο  $c_1$  θέτουμε  $i=1$ , οπότε έχουμε:

$$2(h_0 + h_1)c_1 + h_1c_2 = \frac{3}{h_1}\Delta f_1 - \frac{3}{h_0}\Delta f_0 \quad (3.24\beta)$$

Για τον άγνωστο  $c_{n-1}$  θέτουμε στην εξ. (4.55)  $i=n-1$ , οπότε έχουμε:

$$h_{n-2}c_{n-2} + 2(h_{n-2} + h_{n-1})c_{n-1} = \frac{3}{h_{n-1}}\Delta f_{n-1} - \frac{3}{h_{n-2}}\Delta f_{n-2} \quad (3.24\gamma)$$

Το σύστημα των εξισώσεων (3.24α,β,γ) είναι ένα σύστημα  $n-1$  εξισώσεων με  $n-1$  αγνώστους και έχει κατά κανόνα μία και μοναδική λύση που δίνει τις τιμές των συντελεστών  $c_i; (i = 1, 2, \dots, n-1)$ .

Οι συντελεστές  $b_i; (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$  υπολογίζονται από τη σχέση (3.19).

Οι συντελεστές  $d_i; (i = 0, 1, 2, \dots, n-1)$  υπολογίζονται από τη σχέση (3.20).

### 3.2.4 Παρεκτροπή (Extrapolation) Richardson's

Η παρεκτροπή του Richardson χρησιμοποιείται για τη παραγωγή αποτελεσμάτων ακριβής ακρίβειας χρησιμοποιώντας φόρμουλες χαμηλής τάξης. Η παρεκτροπή μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις περιπτώσεις που είναι γνωστό ότι οι προσεγγιστικές τεχνικές έχουν έναν όρο σφάλματος με προβλέψιμη μορφή, ο οποίος εξαρτάται από μια παράμετρο, που είναι συνήθως το βήμα  $h$ . Υποθέτουμε ότι για κάθε αριθμό  $h \neq 0$  υπάρχει μια φόρμουλα  $N(h)$  που προσεγγίζει την άγνωστη τιμή  $M$  και το σφάλμα αποκοπής που σχετίζεται με την προσέγγιση αυτή έχει τη μορφή:

$$M - N(h) = K_1h + K_2h^2 + K_3h^3 + \dots$$

Για μια σειρά άγνωστων σταθερών  $K_1, K_2, K_3, \dots$

Εφόσον το σφάλμα αποκοπής είναι το  $O(h)$  αναμένουμε να έχουμε :

$$M - N(0.1) \approx 0.1K_1, \quad M - N(0.01) \approx 0.01K_1$$

Γενικεύοντας έχουμε,  $M - N(h) \approx K_1h$  εκτός αν υπάρχει μια μεγάλη διακύμανση στο μέγεθος των σταθερών  $K_1, K_2, K_3, \dots$

Ο σκοπός της παρεκτροπής (extrapolation) είναι να βρεθεί ένας εύκολος τρόπος για να συνδυαστούν οι μάλλον ανακριβείς  $O(h)$  προσεγγίσεις με έναν

τρόπο ώστε να παράγονται φόρμουλες με υψηλής τάξης σφάλματος αποκοπής. Ας υποθέσουμε, για παράδειγμα, ότι συνδυάζουμε τις  $N(h)$  φόρμουλες ώστε να παράγουν  $O(h^2)$  προσεγγίσεις  $N(\hat{h})$ , με  $M$ .

$$M - N(\hat{h}) = \hat{K}_2 h^2 + \hat{K}_3 h^3 + \dots,$$

Για μια σειρά άγνωστων σταθερών  $\hat{K}_1, \hat{K}_2, \hat{K}_3, \dots$ . Τότε θα έχουμε :

$$M - \hat{N}(0.1) \approx 0.01 \hat{K}_2, \quad M - \hat{N}(0.01) \approx 0.001 \hat{K}_2$$

Εάν οι σταθερές  $K_1$  και  $\hat{K}_2$  είναι περίπου του ίδιου μεγέθους, τότε οι προσεγγίσεις  $N(\hat{h})$  θα ήταν προτιμότερο να χρησιμοποιηθούν αντί των  $N(h)$  προσεγγίσεων. Η παρεκτροπή (extrapolation) συνεχίζεται με το συνδυασμό των  $N(\hat{h})$  προσεγγίσεων με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγονται φόρμουλες  $O(h^3)$  με σφάλματα αποκοπής και ούτω καθεξής.

Για να καταλάβουμε ακριβώς πως μπορούν να δημιουργηθούν αυτές η υψηλής τάξης φόρμουλες, θεωρούμε την φόρμουλα με την προσέγγιση του  $M$  που έχει τη μορφή:

$$M = N(h) + K_1 h + K_2 h^2 + K_3 h^3 + \dots, \quad (3.25)$$

Εφόσον η παραπάνω φόρμουλα κρατάει όλα τα θετικά  $h$ , τότε αν αντικαταστήσουμε το  $h$  με τη μισή τιμή του τότε προκύπτει η φόρμουλα

$$M = N\left(\frac{h}{2}\right) + K_1 \left(\frac{h}{2}\right) + K_2 \left(\frac{h}{2}\right)^2 + K_3 \left(\frac{h}{2}\right)^3 + \dots,$$

αφαιρώντας την **(3.25)** δύο φορές, η εξίσωση καταργεί τον όρο  $K_1$  και έχουμε:

$$M = \left[ N\left(\frac{h}{2}\right) + \left( N\left(\frac{h}{2}\right) - N(h) \right) \right] + K_2 \left( \frac{h^2}{2} - h^2 \right) + K_3 \left( \frac{h^3}{4} - h^3 \right) + \dots$$

Για να διευκολυνση θεωρούμε  $N_1(h) \equiv N(h)$  και :

$$N_2(h) = N_1\left(\frac{h}{2}\right) + \left[ N_1\left(\frac{h}{2}\right) - N_1(h) \right].$$

Τότε έχουμε την  $O(h^3)$  προσεγγιστική φόρμουλα για το  $M$  :

$$M = N_2(h) - \frac{k_2}{2} h^2 - \frac{3k_3}{4} h^3 - \dots \quad (3.26)$$

Εάν τώρα αντικαταστήσουμε το  $h$  με  $h/2$  σε αυτή τη φόρμουλα τότε θα έχουμε:

$$M = N_2\left(\frac{h}{2}\right) - \frac{k_2}{8} h^2 - \frac{3k_3}{32} h^3 - \dots \quad (3.27)$$

Αυτό μπορεί να συνδυαστεί με την εξίσωση (3.26) για να εξαλείψουμε τον όρο  $h^2$  συγκεκριμένα έχουμε :

$$3M = 4N_2\left(\frac{h}{2}\right) - N_2(h) + \frac{3k^3}{8} h^3 + \dots ,$$

Και διαιρώντας με το 3 έχουμε έχουμε μια  $O(h^3)$  φόρμουλα για να προσεγγίσουμε το  $M$  :

$$M = \left[ N_2\left(\frac{h}{2}\right) + (N_2\left(\frac{h}{2}\right) - N_2(h))/3 \right] + \frac{3k^3}{8} h^3 + \dots .$$

Γενικά εάν το  $M$  μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$M = N(h) + \sum_{j=1}^{m-1} k_j h^j + O(h^m) ,$$

Τότε για κάθε  $j = 2, 3, \dots, m$  , έχουμε μια  $O(h^j)$  προσέγγιση της μορφής :

$$N_j(h) = N_{j-1}\left(\frac{h}{2}\right) + [ N_{j-1}\left(\frac{h}{2}\right) - N_{j-1}(h) ] / 2^{j-1} - 1 \quad (3.28)$$

Η παρεκτροπή μπορεί να εφαρμοστεί όποτε το σφάλμα αποκοπής για τη φόρμουλα έχει τη μορφή :

$$\sum_{j=1}^{m-1} K_j h^{a_j} + O(h^{a_m}) ,$$

Για μια συλλογή σταθερών  $K_j$  και όταν  $\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3 < \dots < \alpha_m$  . Στο επόμενο παράδειγμα έχουμε  $a_j = 2_j$  .

### Παράδειγμα Παρεκτροπή Richardson's

**Παράδειγμα 1<sup>ο</sup>:** Η κυρίως διαφορά της φόρμουλα στην εξίσωση κατά προσέγγιση στο  $f'(x_0)$  μπορεί να εκφραστεί με μία φόρμουλα λάθους:

$$f'(x_0) = \frac{1}{2h} [f(x_0 + h) - f(x_0 - h)] - \frac{h^2}{6} f'''(x_0) - \frac{h^4}{120} f^{(5)}(x_0) - \dots ,$$

Καθώς αυτή η φόρμουλα λάθους περιέχει μόνο δυνάμεις του  $h$ , η παρέκταση είναι περισσότερη αποτελεσματική από ό τι υπογραμμίστηκε στην αρχική συζήτηση. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε την προσέγγιση  $O(h^2)$  :

$$f'(x_0) = N_1(h) - \frac{h^2}{6} f''' - \frac{h^4}{120} f^{(5)}(x_0) - \dots , \quad (3.29)$$

**όπου:**  $N_1(h) = N(h) = \frac{1}{2h} [f(x_0 + h) - f(x_0 - h)]$ .

Αντικαθιστώντας το  $h$  με  $h/2$  σε αυτήν τη φόρμουλα δίνει την προσέγγιση:

$$f'(x_0) = N_1\left(\frac{h}{2}\right) - \frac{h^2}{24} f'''(x_0) - \frac{h^4}{1920} f^{(5)}(x_0) - \dots$$

Αφαιρώντας 4 φορές αυτή η εξίσωση ελαχιστοποιεί το  $O(h^2)$  όριο το οποίο συνεπάγεται το  $f'''(x_0)$  και δίνει:

$$3 f'(x_0) = 4 N_1\left(\frac{h}{2}\right) - N_1(h) + \frac{h^4}{160} f^{(5)}(x_0) + \dots,$$

Διαιρώντας με το 3 παρέχει μία φόρμουλα  $O(h^4)$

$$f'(x_0) = N_2(h) + \frac{h^4}{480} f^{(5)}(x_0) + \dots,$$

όπου:

$$N_2(h) = N_1\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{N_1(h/2) - N_1(h)}{3}$$

Συνεχίζοντας αυτήν τη διαδικασία δίνει ,για κάθε  $j = 2, 3, \dots$ , μία προσέγγιση  $O(h^2)$

$$N_j(h) = N_{j-1}\left(\frac{h}{2}\right) + \frac{N_{j-1}(h/2) - N_{j-1}(h)}{4^{j-1} - 1}$$

Παρατηρούμε ότι ο παρονομαστής του πηλίκου είναι  $4^{j-1} - 1$  αντί για  $2^{j-1} - 1$  αφού τώρα απαλείφουμε τις δυνάμεις του  $h^2$  αντί για τις δυνάμεις του  $h$ . Αφού  $(h/2)^2 = h^2/4$ , οι πολλαπλασιαστές τώρα απαλείφουν τις δυνάμεις του  $h^2$  που είναι 4 αντί για 2. Ας υποθέσουμε ότι το  $x_0 = 2.0$ ,  $h = 0.2$  και  $f(x) = xe^x$ . Τότε έχουμε :

$$N_1(0.2) = N(0.2) = \frac{1}{0.4} [f(2.2) - f(1.8)] = 22.414160,$$

$$N_1(0.1) = N(0.1) = 22.228786,$$

Και

$$N_1(0.05) = N(0.05) = 22.182564$$

Ο πίνακας παρεκτροπής που προκύπτει φαίνεται στο παρακάτω πίνακα. Η τιμή της  $f'(x) = xe^x + e^x$  στο σημείο  $x_0$  είναι 22.167168 μέχρι 6 δεκαδικά ψηφία ώστε να είναι ακριβώς ίδια με τα ψηφία του  $N_3(0.2)$  ακόμα και αν η καλύτερη αρχική μας προσέγγιση για το  $N_1(0.05)$  έχει μόνο ένα δεκαδικό μέρος.



$N1(0.2) = 22.414160$		
$N1(0.1) = 22.228786$	$N2(0.2) = N1(0.1) + \frac{N1(0.1) - N1(0.2)}{3}$ $= 22.166995$	
$N1(0.05) = 22.182564$	$N2(0.1) = N1(0.05) + \frac{N1(0.05) - N1(0.1)}{3} = 22.167157$	$N3(0.2) = N2(0.1) + \frac{N2(0.1) - N2(0.2)}{315} = 22.167168$

Πίνακας 3.2 Πίνακας παρεκτροπής

### 3.3 Αυτόματα Εκμάθησης (Learning Automata)

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Τα συστήματα εκμάθησης και προσαρμογής συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο ελκυστικών περιοχών έρευνας στο πεδίο του μηχανικού ελέγχου. Έχει αποδειχτεί ότι τα συστήματα εκμάθησης είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για το χειρισμό ενός μεγάλου αριθμού προβλημάτων της μηχανικής. Πρόκειται για συστήματα επεξεργασίας πληροφοριών των οποίων η αρχιτεκτονική και η συμπεριφορά είναι εμπνευσμένες από τη δομή των βιολογικών συστημάτων (ο οργανισμός γεννιέται με σχετικά λίγη αρχική γνώση και μαθαίνει κατάλληλες δράσεις με τη μέθοδο της δοκιμής και του λάθους). Το λεξιλόγιο και το concept που σχετίζονται με τα Αυτόματα Εκμάθησης είναι δανεισμένα από τη Βιολογία και τη Ψυχολογία. Τα πειράματα του Skinner απλά απεικονίζουν τη συμπεριφορά του αυτόματου εκμάθησης με ανταμοιβή/ αντίδραση. Ένα περιστέρι βρίσκεται σε ένα κλουβί και ένας κόκκινος δίσκος τοποθετείται σε έναν από τους τοίχους. Αν κατά τύχη, το περιστέρι χτυπήσει με το ράμφος τον κόκκινο δίσκο, παίρνει μια συγκεκριμένη ποσότητα σιταριού. Αν όμως χτυπήσει αλλού, τότε δεν παίρνει καμιά ανταμοιβή. Πολύ σύντομα το περιστέρι συσχετίζει το χτύπημα του κόκκινου

δίσκου με την ανταμοιβή της τροφής. Υπάρχουν, επίσης, μυριάδες άλλα παραδείγματα στα οποία αυτή η απλή μορφή μάθησης αποδεικνύεται με την τροποποίηση της συμπεριφοράς.

Οι μέθοδοι ελέγχου προσαρμογής γενικά χειρίζονται το πρόβλημα του ελέγχου των συστημάτων με άγνωστες παραμέτρους αλλά γνωστή δομή. Στις στρατηγικές ελέγχου προσαρμογής, η συμπεριφορά του συστήματος βελτιώνεται ελαφρά σε κάθε δειγματική περίοδο υπολογίζοντας σε πραγματικό χρόνο τις παραμέτρους (μοντέλου ή κανόνα ελέγχου) ώστε να επιτευχθεί ο αντικειμενικός σκοπός ελέγχου. Στα Αυτόματα εκμάθησης, η κατανομή πιθανότητας ( $p_n$ ) ενημερώνεται αναδρομικά για τη βελτιστοποίηση κάποιου μαθησιακού στόχου. Τα Αυτόματα εκμάθησης έχουν προσελκύσει αξιοσημείωτο ενδιαφέρον τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της δυνητικής χρησιμότητας σε μία ποικιλία προβλημάτων μηχανικής, τα οποία χαρακτηρίζονται από μία μη γραμμικότητα και από υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας. Στην πραγματικότητα, οι κατοπινές εξελίξεις στη θεωρία στοχαστικού ελέγχου συνυπολόγισαν αβεβαιότητες οι οποίες μπορεί να εμφανιστούν σε μία δεδομένη διαδικασία ο στοχαστικός έλεγχος έγινε υποθέτοντας ότι τα πιθανολογικά χαρακτηριστικά των αβεβαιοτήτων είναι γνωστά. Συχνά, οι αβεβαιότητες είναι ανώτερης τάξης, και ακόμα και τα πιθανολογικά χαρακτηριστικά όπως οι συναρτήσεις κατανομής μπορεί να μην είναι εντελώς γνωστά. Σε αυτήν την περίπτωση απαιτούνται επιπλέον πληροφορίες.

Γενικά, τα αυτόματα εκμάθησης μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: ντετερμινιστικά, σταθερής δομής και μεταβλητής δομής. Στα ντετερμινιστικά αυτόματα, η μετάβαση και οι παραγόμενες μήτρες είναι ντετερμινιστικά. Ένα αυτόματο σταθερής δομής είναι εκείνο του οποίου η αλλαγή και οι παραγόμενες λειτουργίες είναι χρονικά αμετάβλητες. Τα αυτόματα μεταβλητής στοχαστικής δομής κατέχουν αλλαγή και παραγόμενες λειτουργίες οι οποίες αναπτύσσονται καθώς προχωρά η διαδικασία εκμάθησης. Η δομή του αυτόματου αλλάζει καθώς το σύστημα μαθαίνει τις πληροφορίες. Η χρήση αυτομάτων μεταβλητής στοχαστικής δομής οδηγεί σε μείωση των καταστάσεων σε σύγκριση με τα ντετερμινιστικά αυτόματα. Ένα σύστημα εκμάθησης αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και μαθαίνει την βέλτιστη δράση την οποία προσφέρει το περιβάλλον. Οι αποφάσεις του συστήματος

βασίζονται στις πληροφορίες που αποκτώνται με την επιλογή των δράσεων, προσέχοντας αν η επιλογή ανταμείβεται, και τότε ενημερώνεται η κατανομή των πιθανοτήτων. Αυτός ο κύκλος συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί η διαδικασία εκμάθησης. Το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από τις δικές του πιθανότητες κυρώσεων. Ένα περιβάλλον θεωρείται σταθερό αν οι πιθανότητες κυρώσεων είναι σταθερές. Σε αντίθετη περίπτωση είναι ασταθές.

Ας σημειωθεί ότι ο όρος «εκμάθηση» χρησιμοποιείται από αρκετούς συγγραφείς στα νευρωνικά δίκτυα σε συνάρτηση με τεχνικές στοχαστικής προσέγγισης.

Αρκετά θεωρητικά αποτελέσματα αναφέρονται στη σύγκλιση και την εκτίμηση του ποσοστού σύγκλισης και συζητούν τις εύλογες λεπτομέρειες μερικών εφαρμογών των αυτομάτων εκμάθησης. Οι περισσότερες από τις διαθέσιμες μελέτες αναφέρονται στη συμπεριφορά των συστημάτων εκμάθησης σε σταθερά περιβάλλοντα. Το πρόβλημα σχετικά με τη συμπεριφορά των συστημάτων εκμάθησης σε ασταθή περιβάλλοντα είναι δύσκολο, και λίγα αποτελέσματα είναι γνωστά. Οι Baba και Mogani έχουν δείξει ότι μια διευρυμένη μορφή του σχεδίου που προτάθηκε από τους Thathacher και Ramakrishan εξασφαλίζει απόλυτη σκοπιμότητα σε ένα ασταθές περιβάλλον έχοντας την ιδιότητα ότι υπάρχει ένα μοναδικό μονοπάτι το οποίο λαμβάνει το μικρότερο αριθμό κυρώσεων υπό την έννοια της μαθηματικής προσδοκίας.

Οι Poznyak και Najim έχουν μελετήσει τη συμπεριφορά των αυτομάτων εκμάθησης σε ασυμπτωματικά σταθερά περιβάλλοντα. Αρκετά θεωρητικά αποτελέσματα αφορούν τις ιδιότητες του σχεδίου ενίσχυσης, την αντίδραση του κανονικού περιβάλλοντος και τη βέλτιστη συμπεριφορά διαφορετικών αυτομάτων εκμάθησης. Ένα ασταθές περιβάλλον προκύπτει έμμεσα σε σχέση με ένα ιεραρχημένο σύστημα αυτομάτων εκμάθησης. Έχει αποδειχτεί ότι η χρήση ιεραρχημένου συστήματος αυτομάτων εκμάθησης επιταχύνει τη διαδικασία εκμάθησης. Εξετάζονται, επίσης, μερικές εφαρμογές της ιεραρχημένης δομής των αυτομάτων εκμάθησης. Το συμβατικό μοντέλο αυτόματου ενός συστήματος εκμάθησης αποτελείται από ένα αυτόματο στοχαστικής λειτουργίας σε ένα ενιαίο περιβάλλον. Ωστόσο, ένα αυτόματο μπορεί να δημιουργηθεί για να λειτουργεί σε περισσότερα από ένα τυχαίο μέσο. Ο Baba έχει εισαγάγει την ιδέα μιας μέσης σταθμικής ανταμοιβής και

διάφορους κανόνες (σκοπιμότητα, e-βελτιστοποίηση) των συμπεριφορών εκμάθησης των αυτομάτων εκμάθησης σε ένα πολύ-εκπαιδευτικό περιβάλλον. Έχει, επίσης, προτείνει μια κατηγορία σχεδίων ενίσχυσης τα οποία χρησιμοποιούν κατευθείαν τις αντιδράσεις του πολύ-εκπαιδευτικού περιβάλλοντος (τον αριθμό των ανταμοιβών).

Ένα σύστημα εκμάθησης είναι μία διαδοχική μηχανή που χαρακτηρίζεται από μία σειρά δράσεων, μία κατανομή πιθανοτήτων και ένα σχέδιο ενίσχυσης. Εκτεταμένη βιβλιογραφία έχει αφιερωθεί στη συμπεριφορά των αυτομάτων εκμάθησης με σταθερό σύνολο δράσεων. Η ιδέα της συμπεριφοράς αυτομάτων των οποίων ο αριθμός των διαθέσιμων δράσεων κάθε φορά είναι χρονικά μεταβαλλόμενος έχει μελετηθεί από τους Thathachar και συνεργάτες. Τα αποτελέσματα της σύγκλισης έχουν μελετηθεί για τις αντιδράσεις δυαδικού περιβάλλοντος. Μια ενδιαφέρουσα όψη της σύγκλισης που δεν έχει ληφθεί υπόψη είναι το ποσοστό της σύγκλισης το οποίο αναφέρεται στην ταχύτητα της λειτουργίας του αυτόματου. Τα αυτόματα εκμάθησης με μεταβαλλόμενο αριθμό δράσεων είναι σχετικά με τη μοντελοποίηση διαφόρων προβλημάτων (CPU προγραμματισμό εργασίας, βέλτιστο μονοπάτι στα στοχαστικά δίκτυα κλπ). Τα αυτόματα εκμάθησης με συνεχείς εισαγωγές (περιβάλλον S-Μοντέλο) των οποίων ο αριθμός των αυτόματων δράσεων μεταβάλλεται σε πραγματικό χρόνο έχουν εξεταστεί από τους Rozhnak και Najim. Τα αυτόματα εκμάθησης με συνεχείς εισαγωγές και μεταβαλλόμενο αριθμό δράσεων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση συγκεκριμένων σκοπών.

Η ανάλυση και η δήλωση των ιδιοτήτων σύγκλισης των συστημάτων εκμάθησης συνήθως προέρχονται χρησιμοποιώντας την προσέγγιση Lyapunov και τη θεωρία Martin-Gale.

### 3.3.2 Αυτόματο Εκμάθησης

Ένα αυτόματο Εκμάθησης μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα το οποίο τροποποιεί τη στρατηγική ελέγχου στη βάση της δικής του εμπειρίας, προκειμένου να πετύχει καλές επιδόσεις ελέγχου, ανεξαρτήτως των απρόβλεπτων αλλαγών του περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί. Με άλλα λόγια, ένα Αυτόματο Εκμάθησης θα πρέπει, με τη συλλογή και την επεξεργασία των τρεχουσών πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον, να έχει τη δυνατότητα να αλλάζει τη δομή τους και τις παραμέτρους με την πάροδο του χρόνου για να επιτευχθεί ο επιδιωκόμενος σκοπός και η επιθυμητή επίδοση (κατά μία έννοια). Ένα αυτόματο εκμάθησης είναι μία προσαρμοζόμενη διακριτή μηχανή που περιγράφεται από:

$$\{ \Xi, U, R, \{\xi_n\}, \{u_n\}, \{p_n\}, T \}$$

**Όπου:**

- (i)  $\Xi$  είναι ένα οριοθετημένο σύνολο εισαγωγών του αυτομάτου.
- (ii)  $U$  υποδηλώνει το σύνολο  $\{u(1), u(2), \dots, u(N)\}$  των δράσεων του αυτομάτου.
- (iii)  $R = (\Omega, F, P)$  διάστημα πιθανοτήτων.
- (iv)  $\{\xi_n\}$  είναι μια διαδοχή εισαγωγών στο αυτόματο (αντίδραση του περιβάλλοντος,  $\xi_n \in \Xi$ ) που παρέχεται από το περιβάλλον σε μία δυαδική (P-Μοντέλο περιβάλλον) ή συνεχή (S-Μοντέλο περιβάλλον) μορφή.
- (v)  $\{u_n\}$  είναι μία ακολουθία εισαγωγών (δράσεις) στο αυτόματο.
- (vi)  $P_n = [p_n(1), p_n(2), \dots, p_n(N)]^T$  είναι η κατανομή πιθανοτήτων σε χρόνο  $n$   
 $P_n(i) = P\{\omega: u_n = u(i) / F_{n-1}\}$  και  $\sum_{i=1}^N p_n(i) = 1$ , για κάθε  $n$ .  
 Όπου  $F_n = \sigma(\xi_1, u_1, p_1, \dots, \xi_n, u_n, p_n)$ .
- (vii)  $C_n = [c_n(1), c_n(2), \dots, c_n(N)]^T$  είναι το προσδοκώμενο διάνυσμα των αντιδράσεων του περιβάλλοντος (σε χρόνο  $n$ ).
- (viii)  $T$  αναπαριστά το σχέδιο ενίσχυσης (σχέδιο ενημέρωσης) το οποίο αλλάζει το διάνυσμα πιθανοτήτων  $p_n$  σε  $p_{n+1}$ :

$$p_{n+1} = p_n + \gamma_n T_n(p_n; \{\xi_t\}_{t=1, \dots, n}; \{u_t\}_{t=1, \dots, n})$$

$$p_i(i) > 0 \text{ για κάθε } i=1, \dots, N$$

όπου  $\gamma_n$  είναι ένας συντελεστής διόρθωσης και το διάνυσμα:

$T_n(\cdot)=[T_n^1(\cdot), \dots, T_n^N(\cdot)]^T$  ικανοποιεί τις ακόλουθες συνθήκες ( για διατήρηση της πιθανότητας):

$$\sum_{i=1}^N T_n^i(\cdot)=0, \text{ για κάθε } n$$

$$P_n(i)+ \gamma_n T_n^1(\cdot) \in [0,1] \text{ για κάθε } n, \text{ για κάθε } i=1, \dots, N$$

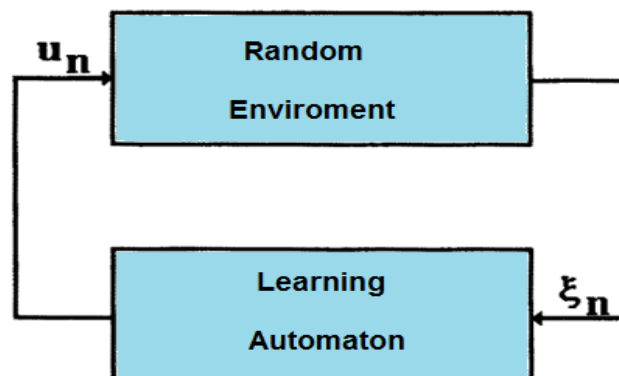
Αυτή είναι η καρδιά ενός αυτόματου εκμάθησης. Διαφορετικά σχέδια ενίσχυσης έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Ένα σχέδιο ενίσχυσης μπορεί να είναι γραμμικό ή μη γραμμικό. Μερικές φορές είναι επωφελής η ενημέρωση του  $\rho_n$  σύμφωνα με το διαφορετικό σχέδιο ανάλογα με τα διαστήματα στα οποία βρίσκεται η τιμή του  $\rho_n$ .

Η συνάρτηση απώλειας  $\Phi_n$  που σχετίζεται με το αυτόματο εκμάθησης δίνεται από:

$$\Phi_n = 1/n \sum_{t=1}^n \xi_t$$

Είναι ένα χρήσιμο ποσό για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς ενός αυτόματου εκμάθησης.

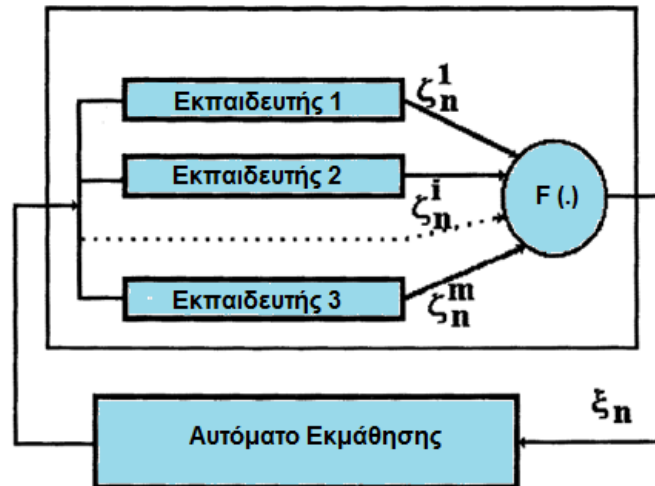
Ένα σύστημα εκμάθησης είναι ένα αυτόματο στοχασμού συνδεδεμένο σε ένα βρόγχο ανατροφοδότησης με ένα τυχαίο περιβάλλον όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.1



**Εικόνα 3.1 : Αλληλεπίδραση Αυτόματου – Περιβάλλοντος**

### 3.3.3 Περιβάλλον

Τα συστήματα εκμάθησης είναι μηχανές προσαρμογής οι οποίες αλληλεπιδρούν με ένα περιβάλλον και μαθαίνουν δυναμικά τη βέλτιστη δράση που προσφέρει το περιβάλλον. Ο ρόλος του περιβάλλοντος είναι να εδραιώσει τη σχέση μεταξύ των δράσεων του αυτόματου και των σημάτων που λαμβάνονται κατά τις εισαγωγές του. Το περιβάλλον είναι ένας όρος που μπορεί να καλύψει σχεδόν οτιδήποτε. Περιλαμβάνει όλες τις εξωτερικές συνθήκες και επιδράσεις. Το περιβάλλον παράγει τυχαίες αντιδράσεις των οποίων τα στατιστικά εξαρτώνται από το τρέχων ερέθισμα ή εισαγωγή. Προσφέρει στο αυτόματο ένα πεπερασμένο σύνολο αντιδράσεων και αυτό περιορίζεται να επιλέξει μία από αυτές. Το περιβάλλον λέγεται *Μοντέλο P* αν η αντίδρασή του ανήκει στο σύνολο  $\{0,1\}$  (δυαδική εισαγωγή). Λέγεται *Μοντέλο S* όταν η αντίδρασή του παίρνει μία αυθαίρετη τιμή στο κλειστό διάστημα  $[0,1]$  (συνεχιζόμενη αντίδραση). Στο Μοντέλο Q περιβάλλον το προϊόν μπορεί να πάρει ένα πεπερασμένο αριθμό τιμών στο διάστημα  $[0,1]$ . Στον αυτόματο έλεγχο, το περιβάλλον ανταποκρίνεται στη διαδικασία του ελέγχου ή της βελτιστοποίησης (εισαγωγή σήματος ελέγχου σε ένα σύστημα σημαίνει σύνδεση του συστήματος με το περιβάλλον του. Το περιβάλλον χαρακτηρίζεται από τις δικές του πιθανότητες κυρώσεων  $c_i$ . Ένα περιβάλλον θεωρείται σταθερό αν οι πιθανότητες κυρώσεων είναι σταθερές. Στην αντίθετη περίπτωση θεωρείται ασταθές. Εκτός από το απλό περιβάλλον, υπάρχουν και το πολλαπλά περιβάλλοντα. Η λειτουργία ενός τυπικού αυτόματου εκμάθησης απεικονίζεται στην Εικόνα 3.2. Περιλαμβάνει ένα σύνολο «εκπαιδευτών». Κάθε εκπαιδευτής αντιδρά στην απάντηση του αυτόματου.



**Εικόνα 3.2 : Πολλαπλό Περιβάλλον**

Αυτές οι αντιδράσεις (απαντήσεις) σε χρόνο  $n$ , σημειώνονται με  $\zeta_n^j$  ( $j=1, \dots, m$ ). Μπορεί να είναι δυαδικές ( $P$ -Μοντέλο) ή συνεχιζόμενες ( $S$ -Μοντέλο). Η εισαγωγή  $\xi_n = F(\zeta_n^1, \dots, \zeta_n^m)$  είναι κατασκευασμένη στη βάση αυτών των αντιδράσεων. Τα πολλαπλά περιβάλλοντα έχουν πολύ ενδιαφέρουσες εγγενείς ιδιότητες, γεγονός που τα καθιστά ενδιαφέροντα. Στην πραγματικότητα παρέχουν απλά μέσα για την απεικόνιση μερικών προβλημάτων μηχανικής. Για παράδειγμα, κατά τη διαδικασία ελέγχου, κάθε εκπαιδευτής μπορεί να συσχετισθεί με ένα στάδιο της διαδικασίας που ελέγχεται. Σε προβλήματα περιορισμένης βελτιστοποίησης, ένας εκπαιδευτής μπορεί να συνδεθεί με τη λειτουργία κόστους και ο άλλος με διαφορετικούς περιορισμούς.

### 3.3.4 Σχέδια ενίσχυσης

Τα σχέδια ενίσχυσης αρχικά προτάθηκαν σε μία προσπάθεια μοντελοποίησης της μάθησης των ζώων και έκτοτε έχουν βρει επιτυχημένη εφαρμογή στο πεδίο των αυτομάτων εκμάθησης. Ένα σχέδιο ενίσχυσης μπορεί να συγκριθεί με την αναδρομική εκτίμηση που χρησιμοποιείται στον έλεγχο προσαρμογής. Το σχέδιο ενίσχυσης (αλγόριθμος εκμάθησης ή



ενημέρωσης) παράγει  $p_{n+1}$  από  $p_n$ . Έχουν προταθεί αρκετοί αλγόριθμοι για τη ρύθμιση των πιθανοτήτων μετά από κάθε περίοδο δειγματοληψίας (αλληλεπίδραση με το περιβάλλον). Βασίζονται σε οριακές αλλαγές στις πιθανότητες. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι που απασχολούν έναν γραμμικό αλγόριθμο έχουν προταθεί από τους Bush και Mosteller. Όλα τα σχέδια ενίσχυσης που περιγράφονται στη βιβλιογραφία μπορούν να θεωρηθούν ως λύσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Ακολουθεί η μέση συνάρτηση ποινής:

$$J = \sum_{i=1}^N \{ \Phi_i(p_n) E_i[1-\xi_i] - \Psi_{ii}(p_n) E_i[\xi_i] \}$$

Όπου οι λειτουργίες  $\Phi_i(p_n)$  και  $\Psi_i(p_n)$  αναπαριστούν αντίστοιχα το ποσοστό της αλλαγής στον παράγοντα πιθανότητα με ανταμοιβή ( $\xi_i=0$ ) και ποινή ( $\xi_i=1$   $\xi_i (i=1,2)$  που ανταποκρίνεται στις αντιδράσεις του περιβάλλοντος στην ανταμοιβή και την ποινή. Το ενδιαφέρον εδώ έγκειται στην ελαχιστοποίηση. Σύμφωνα με τη μέθοδο προσέγγισης των Kiefer-Wolfowitz, παράγεται το σχέδιο ενίσχυσης το οποίο ελαχιστοποιεί τη λειτουργία  $J$  ρυθμίζοντας την κλίση του  $J$  σε ίση με το μηδέν.

Γενικά, τα υπάρχοντα σχέδια εκμάθησης διαφέρουν στη δομή (γραμμικά, μη γραμμικά, κλπ) αλλά εμπίπτουν στο γενικό πλαίσιο. Οι λειτουργίες που συνδέονται με τα σχέδια ενίσχυσης των Bush-Mosteller, Shapiro-Narendra και Varshavskii-Vorontsova δίνονται στο πίνακα 3.3.

Συγγραφείς	Λειτουργία $\Phi(P_n)$	Λειτουργία $\Psi(P_n)$
Bush-Mosteller	$P_n(i) - \frac{1}{2} p_n(i)^2$	$p_n(i)^2$
Varshavskii και	$cte - \frac{1}{2} p_n(i)^2 - \frac{1}{3} p_n(i)^3$	$\Phi(i)$
Vorontsova		
Shapiro-Narendra	$P_n(i) - \frac{1}{2} p_n(i)^2$	0

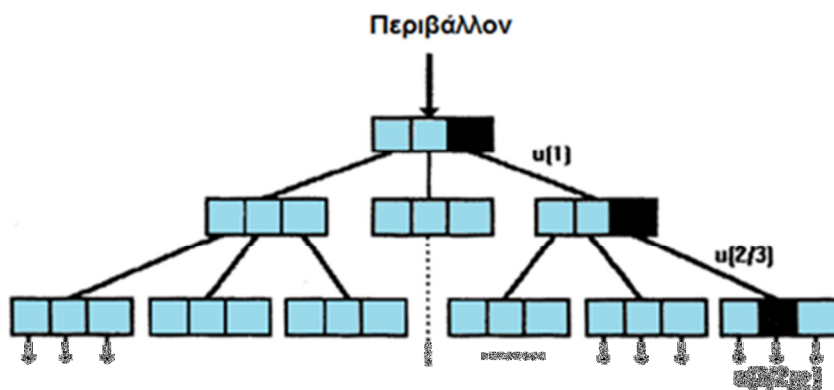
**Πίνακας 3.3 Διαφορετικά Σχέδια Ενίσχυσης και η ανταπόκριση των συναρτήσεων  $\Phi(\cdot)$  και  $\Psi(\cdot)$**

Τα σχέδια ενίσχυσης των Bush-Mosteller και Shapiro-Narendra είναι γραμμικά, ενώ εκείνα των Varshavskii-Vorontsova είναι μη γραμμικά. Αυτά τα σχέδια είναι γενικά πολύ γενικά και θα μπορούσαν να υιοθετηθούν αποτελεσματικά για χρήση σε συγκεκριμένο περιβάλλον (S-Μοντέλο, ασυμπτωματικά σταθερά περιβάλλοντα, κτλ.). Έχει παρουσιαστεί μια περισσότερο γενική μέθοδος για την κατασκευή σχεδίων εκμάθησης.

Όταν ο αριθμός των δράσεων αυξάνεται, η συμπεριφορά του αυτόματου θα είναι αργή και η απαιτούμενη χωρητικότητα της μνήμης υπολογισμού και η εκτέλεση του συστήματος εκμάθησης επίσης θα αυξάνονται. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να παρακαμφθούν χρησιμοποιώντας μία ιεραρχημένη δομή από αυτόματα.

### 3.3.5. Ιεραρχημένη Δομή Αυτομάτων Εκμάθησης

Μια ιεραρχημένη δομή Αυτομάτων Εκμάθησης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Δομείται σε διαφορετικά επίπεδα απλών αυτόματων με περιορισμένο αριθμό δράσεων. Το πρώτο επίπεδο της ιεραρχίας περιλαμβάνει ένα απλό αυτόματο με  $N$  δράσεις. Το δεύτερο επίπεδο δομείται από  $N$  απλά αυτόματα (με  $N$  δράσεις το καθένα) και το  $k^{\text{th}}$  επίπεδο σχηματίζεται από  $N^{k-1}$  αυτόματα. Το τελευταίο επίπεδο της ιεραρχίας περιλαμβάνει  $N^N$  απλά αυτόματα. Η ιεραρχημένη δομή των αυτόματων λειτουργεί όπως παρακάτω. Το πρώτο επίπεδο επιλέγει τυχαία μία δράση ( $u(1)$ ). Αυτή ενεργοποιεί το ανταποκρινόμενο αυτόματο στο δεύτερο επίπεδο (κάθε δράση του αυτόματου που περιλαμβάνεται στο πρώτο επίπεδο, συσχετίζεται με ένα αυτόματο που ανήκει στο δεύτερο επίπεδο) το οποίο επιλέγει μία δράση ( $u(2/3)$ ). Αυτή με τη σειρά της ενεργοποιεί ένα αυτόματο στο τρίτο επίπεδο της ιεραρχίας. Στο τελευταίο επίπεδο η δράση που επιλέγεται ( $u(3/2/2)$ ) αλληλεπιδρά με το περιβάλλον.



Εικόνα 3.3: Ιεραρχική δομή αυτόματου

Η ιεραρχημένη δομή ενός αυτόματου εκμάθησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς (βελτιστοποίηση, πολύ-κτιριακή ανάλυση κτλ.).

Το **μέτρο** της **πιθανότητας**  $\sum_{i=1}^N p(i) = 1$ .

Δεν διασφαλίζεται όταν η αντίδραση του περιβάλλοντος δεν ανήκει στο διάστημα  $\{0;1\}$ . Σε αυτήν την περίπτωση είναι απαραίτητη η εισαγωγή κάποιας διαδικασίας για τη διατήρηση του μέτρου της πιθανότητας. Συνήθως χρησιμοποιούνται δύο λύσεις: προβολή και ομαλοποίηση.

Η επόμενη ενότητα αφορά σε αυτές τις διαδικασίες για το μετασχηματισμό της αντίδρασης του περιβάλλοντος και την πιθανότητα «Διαβάθμισης».

### 3.3.6. Ομαλοποίηση και προβολή

Σε αυτήν την ενότητα η έμφαση δίνεται κυρίως στις διαδικασίες ομαλοποίησης και προβολής. Όταν η πιθανότητα δεν ανήκει στο διάστημα διακύμανσης  $\{0,1\}$ , είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση κάποιας διαδικασίας (χειρισμός ή μετασχηματισμός) η οποία εγγυάται ότι η μέτρηση της

πιθανότητας παραμένει ικανοποιητική σε χρονική στιγμή. Η διαδικασία ομαλοποίησης επεξεργάζεται τα προϊόντα του περιβάλλοντος (αντιδράσεις) ενώ η προβολή επενεργεί στις πιθανότητες.

### 3.3.6.1 Διαδικασία Ομαλοποίησης

Η Διαδικασία Ομαλοποίησης έχει εισαχθεί από τους Najim και Roznyak και χρησιμοποιείται στο γενικό πλαίσιο των αυτόματων εκμάθησης με συνεχείς εισαγωγές (S-Μοντέλο) για πολυτροπικές λειτουργίες βελτιστοποίησης. Θα παρουσιάσουμε μία πολύ απλή διαδικασία ομαλοποίησης. Ας θεωρήσουμε το πολύ-εκπαιδευτικό περιβάλλον στην Εικόνα 3.2., και υποθέτουμε ότι η αντίδραση του κάθε εκπαιδευτή είναι δυαδική, π.χ.

$$z_n^j \in \{0,1\}, \quad (j=1,\dots,m)$$

Η αντίδραση του ομαλοποιημένου περιβάλλοντος  $\xi_n^-$  (εισαγωγή αυτόματου) μπορεί να κατασκευαστεί ως εξής:

$$\xi_n = \frac{\sum_{j=1}^m z_n^j}{m} \in [0,1]$$

Αυτή η διαδικασία ομαλοποίησης διασφαλίζει ότι η εισαγωγή του αυτόματου ανήκει στο τμήμα της μονάδας  $[0,1]$ .

### 3.3.6.2 Αλγόριθμος Προβολής

Η διαδικασία προβολής μπορεί να εφαρμοστεί σε δυαδικές και μη δυαδικές αντιδράσεις περιβάλλοντος. Πρόκειται για χρήσιμη διαδικασία όταν οι πιθανότητες δεν εκτείνονται πέρα από το διάστημα  $[0,1]$ .

Ο συντελεστής προβολής  $\Pi(\cdot)$  χαρακτηρίζεται από την ακόλουθη ιδιότητα:

$$\| p_n - \Pi(q) \| \leq \| p_n - q \|$$

Το simplex  $S$  ορίζεται ως εξής:

$$S = \{ p_n : \sum_{i=1}^N p_n(i) = 1, p_n(i) \geq 0 \}, i=1, \dots, N$$

Αποτελείται από :

$$C_N^1 = N \text{ κορυφές } \Gamma_1^j$$

$$C_N^2 = \frac{1}{2} N (N-1) \text{ γωνίες } \Gamma_2^j$$

..

$$C_N^{N-1} = N (N-1) \Gamma_{N-1}^j$$

Το σημείο στο οποίο οι συντεταγμένες είναι ίσες με το μηδέν ( εκτός από το  $j^{\text{th}}$  που είναι ίσο με 1) είναι το  $\Gamma_1^j$ . Η κορυφή  $\Gamma_1^j$  ( $m \geq 2$ ) είναι το υποσύνολο

$$\Gamma_m^j = \{ P : X \in D_m, p(i) \geq 0 \}$$

Ενός από το υπερ-επίπεδο  $D_n$  το οποίο ορίζεται ως εξής

$$D_n = \{ p_n : \sum_{i=1}^N p_n(i) = 1, p_n \geq 0, i=1, \dots, N \}$$

Η προβολή του  $p_n$  ορίζεται ως εξής:

$$\Pi(p_n) = p_n^* \text{ όπου } \| p_n - p_n^* \| = \min_{\psi \in S} \| p_n - \psi \|$$

$\psi \in S$

Είναι φανερό ότι  $p_n^* \in \Gamma_k^j$  για ένα συγκεκριμένο  $k$ .

Ας σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του  $p_n^* = \Pi(p_n)$  είναι ισοδύναμος με τον υπολογισμό του σημείου στο  $S$  το οποίο είναι πλησιέστερα στην προβολή  $p_n$  ( $D_n$ ) του σημείου  $p_n$  πάνω στο  $D_n$ .

Από τον ορισμό, προκύπτει ότι :

$$\min \| \psi - p_n^* \| = \min \| (\psi - p_n(D_n)) + (p_n(D_n) - p_n^*) \| =$$

$$= \| (p_n(D_n) - p_n^*) \|^2 + \| (\psi - p_n(D_n)) \|^2$$

Το ακόλουθο λήμμα παρέχει το εργαλείο για τον υπολογισμό της προβολής  $\Pi(p_n)$  του  $p_n$ .

Λήμμα 1. Η όψη  $\Gamma_{N-1}$  πλησιέστερα στο σημείο  $p_n(D_n)$  έχει ένα ορθογώνιο διάνυσμα

$$\alpha_{N-1} = (\underbrace{1, 1, \dots, 1}_j, 0, \dots, 1)$$

Ο δείκτης  $j$  ανταποκρίνεται στη μικρότερη συνιστώσα του διανύσματος σημείο  $p_n(D_n)$ , π.χ.

$$j = (i : (p_n(D_n))_i = \min (p_n(D_n))_i) \quad (1)$$

#### Απόδειξη:

Η απόσταση  $V$  μεταξύ ενός δοσμένου σημείου  $z=(z_1, z_2, \dots) \in D_n$  και το διάνυσμα

$$\Gamma_1^k = \{\underbrace{0, 0, \dots, 0}_k, 1, 0, \dots, 0\}$$

είναι ίσο με:

$$V^2(z, \Gamma_1^k) = (z_k - 1)^2 + \sum_{i \neq k}^N (z_i)^2 = \sum_{i=1}^N (z_i)^2 + (1 - 2z_k)$$

Τότε,

$$V^2(z, \Gamma_1^k) - V^2(z, \Gamma_1^l) = 2(z_l - z_k)$$

Π.χ. Το πιο κοντινό διάνυσμα ανταποκρίνεται στο μικρότερο στοιχείο.

$$P_n(k) = \min_l p_n(l)$$

Συνεπώς, η όψη  $\Gamma_{N-1}$  η οποία βρίσκεται απέναντι από το διάνυσμα και βρίσκεται πλησιέστερα στο σημείο  $z$  έχει ένα ορθογώνιο διάνυσμα  $\alpha_{N-1}$ .

Η προβολή του  $p_n(D_m)$  πάνω στο υπερ-επίπεδο  $p_n(D_m)$  ( $1 \leq m \leq N$ ) είναι εφικτή σύμφωνα με

$$(p_n(D_m))_j = \left( p_n(j) + \frac{1 + \sum_{i=1}^N a(i)p_n(j)}{m} \right) \alpha(j), (j=1, \dots, m) \quad (2)$$

Όπου  $\alpha(j)$  είναι τα στοιχεία του διανύσματος το οποίο είναι ορθογώνιο στο υπερ-επίπεδο  $D_m$ .

Παρατηρούμε ότι η διαδικασία της προβολής επιτυγχάνεται σε έναν αριθμό βημάτων που δεν υπερβαίνουν το  $N$ .

Η προβολή πάνω στο simplex  $S_\varepsilon$  ορίζεται από

$$S_\varepsilon \equiv \{ p_n : \sum_{i=1}^N p_n(i) = 1, p_n(i) > \varepsilon, i=1, \dots, N \}$$

Μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια της αλλαγής των μεταβλητών

$$p_n(i) = p_n^*(i) + \varepsilon$$

Η δομή του διαχειριζόμενου αλγόριθμου προβολής παρουσιάζεται παρακάτω.

Αν  $p_n$  δεν ανήκει στο  $S$  τότε,

1. Βρίσκουμε το  $p_n(D_m)$  σύμφωνα με (2) για  $m=N$ .
2. Αν  $p_n(D_m)$  δεν ανήκει στο  $S$ , τότε βρίσκουμε το μικρότερο στοιχείο του διανύσματος το οποίο είναι ορθογώνιο στην πλησιέστερη όψη  $\Gamma_1^k$  (1).

Πέντε περιπτώσεις ( $P(i), i=a, b, c, d, e$ ) έχουν εξεταστεί. Οι συντεταγμένες του κάθε σημείου  $P$  είναι οι πιθανότητες  $p_n(1)$  και  $p_n(2)$ . Οι λεπτές γραμμές αναπαριστούν τη συμπεριφορά του χειριστή της προβολής. Αποκτούμε την ακόλουθη χαρτογράφηση.

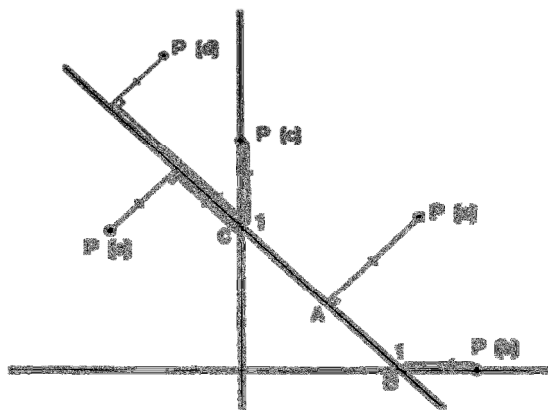
$$P(a) \rightarrow A, P(b) \rightarrow B, P(c) \rightarrow C, P(d) \rightarrow D, P(e) \rightarrow C$$

Για παράδειγμα, οι συντεταγμένες ( $\chi_\alpha, \psi_\alpha$ ) του σημείου  $A$  ανταποκρίνονται στην προβολή του  $P(a)$ . Σύμφωνα με το Σχήμα 3.2 ο χειριστής προβολής μπορεί να εκληφθεί ως ο χάρτης ο οποίος συνδέει με κάθε σημείο  $P(\cdot)$  του επιπέδου ένα σημείο, το οποίο ανήκει στο τμήμα  $BC$ .

Η ομαλοποίηση και η προβολή έχουν πολύ καλές ιδιότητες. Είναι χρήσιμες στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης και παρέχουν στο χρήστη μεγαλύτερη ευελιξία. Το μειονέκτημα της προβολής είναι ότι είναι χρονοβόρα. Με άλλα λόγια, η χρήση των αποτελεσμάτων του χειριστή της προβολής προκαλεί μία σχετικά υποτονική συμπεριφορά του συστήματος εκμάθησης.

Για την αντιμετώπιση αριθμητικών προβλημάτων τα οποία οφείλονται σε λάθη στρογγυλοποίησης, το διάνυσμα της πιθανότητας μπορεί να κλιμακωθεί με:

$$S_p = \sum_{i=1}^N p_n(i)$$



Σχήμα 3.4 Γραφική ερμηνεία της διαδικασίας προβολής

### 3.3.7 Συμπέρασμα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάστηκε μία εισαγωγή στα αυτόματα εκμάθησης και δόθηκαν διάφορες έννοιες και ορισμοί. Προσδιορίστηκαν τα αυτόματα, τόσο με απλή, όσο και με ιεραρχημένη δομή και αποδείχτηκε ότι διάφορα σχέδια ενίσχυσης μπορούν να συσχετιστούν με την ελαχιστοποίηση μερικών λειτουργιών. Για τη διατήρηση του μέτρου της πιθανότητας, έχουν εισαχθεί η διαδικασία της ομαλοποίησης και ο χειριστής της προβολής. Καταλήγοντας, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι πολλά από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο είναι βασικά για το θεωρητικό υπόβαθρο και τη συμπεριφορά των αυτόματων εκμάθησης σε διαφορετικά είδη τυχαίου περιβάλλοντος (σταθερό, μη σταθερό κλπ.).

## 3.4 Εισαγωγή στις κρυφές Αλυσίδες Markov (Hidden Markov Chains)

### 3.4.1 Στοχαστικές Διαδικασίες και Αλυσίδες Markov

Η θεωρητική μελέτη ενός πραγματικού συστήματος γίνεται με τη χρησιμοποίηση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου. Το μοντέλο αυτό είναι μια προσομοίωση του συστήματος, όπου οι σημαντικές σχέσεις μεταξύ των



στοιχείων του έχουν αντικατασταθεί από αντίστοιχες μαθηματικές, ενώ οι μη σημαντικές έχουν αγνοηθεί. Οι στοχαστικές διαδικασίες είναι τα κατάλληλα μαθηματικά μοντέλα (στοχαστικά μοντέλα) για την περιγραφή και μελέτη στοχαστικών συστημάτων, δηλαδή συστημάτων που η λειτουργία τους επηρεάζεται σημαντικά από τον παράγοντα τύχη και επομένως η μελλοντική τους συμπεριφορά δεν μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς, αλλά μόνο πιθανοθεωρητικά. Κάθε οικογένεια τυχαίων μεταβλητών  $\{X(t): t \in T\}$ , ορισμένων των στον ίδιο χώρο πιθανοτήτων  $(P)$ , ονομάζεται στοχαστική ανέλιξη. Η παράμετρος  $t$  αναφέρεται ως χρόνος. Αν ο παραμετρικός χώρος  $T$  είναι αριθμήσιμο σύνολο, η στοχαστική διαδικασία αναφέρεται ως συνεχούς χρόνου και συμβολίζεται με  $\{X_n : n \in \mathbb{N}_0\}$ , ενώ αν ο  $T$  είναι υπεράριθμο σύνολο, αυτή αναφέρεται ως συνεχούς χρόνου και συμβολίζεται με  $\{X(t): t \geq 0\}$ . Κάθε δυνατή τιμή των τυχαίων μεταβλητών  $X(t)$ , λέγεται κατάσταση διαδικασίας. Ο χώρος καταστάσεων  $S = \{x | x \text{ κατάσταση της σ.δ.}\}$  αναφέρεται ως διακριτός αν είναι πεπερασμένο ή αριθμήσιμο σύνολο και συνεχής αν είναι υπεράριθμο σύνολο. Συνδυάζοντας τις παραπάνω περιπτώσεις προκύπτουν τέσσερις κατηγορίες στοχαστικών διαδικασιών. Στοχαστικές διαδικασίες διακριτού χρόνου, με διακριτό χώρο καταστάσεων.

Κάθε σ.δ  $\{X(t): t \in T\}$  ορισμένη στο χώρο πιθανοτήτων, είναι στην ουσία μια συνάρτηση  $X: T \times \Omega \rightarrow S$ ,  $(t, \omega) \rightarrow X(t, \omega) \in S$ . Ως μεταβατική κατανομή σ.δ  $\{X(t): t \in T\}$  ορίζεται η οικογένεια  $\{F_t(x) \in T\}$  των κατανομών των αντίστοιχων τυχαίων μεταβλητών, ενώ το όριο αυτής, καθώς  $t$  τείνει στο άπειρο, αναφέρεται ως η αντίστοιχη οριακή κατανομή.

Μια σ.δ  $\{X(t)\}$  είναι πλήρως ορισμένη όταν δίνονται : i) ο παραμετρικός χώρος  $T$ , ii) ο χώρος καταστάσεων  $S$  και iii) η στοχαστική εξάρτηση των μελών της, δηλαδή η από κοινού συνάρτηση κατανομής  $F_{t_1, t_2, \dots, t_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(X(t_i) \leq x_i, i=1, 2, \dots, n)$ , κάθε πεπερασμένης υποοικογένειας  $(X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n))$  της  $\{X(t)\}$ . Στοχαστικές διαδικασίες των οποίων τα τρία αυτά χαρακτηριστικά συμπίπτουν, λέγονται στοχαστικά ισοδύναμες. Επίσης, δύο σ.δ  $\{X(t)\}, \{Y(t)\}$  λέγονται στοχαστικά ανεξάρτητες αν για κάθε ζεύγος πεπερασμένων υποοικογενειών τους,  $X = (X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n))$  και  $Y = (Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_m))$ , οι τ.μ  $X, Y$  είναι στοχαστικά ανεξάρτητες.

Ανάλογα με τη μορφή της στοχαστικής εξάρτησης των μελών της  $\{X(t)\}$ , υπάρχουν διάφορες κατηγορίες στοχαστικών διαδικασιών με σημαντικότερη αυτή των Μαρκοβιανών διαδικασιών.

Μαρκοβιανή διαδικασία καλείται κάθε σ.δ  $\{X(t):t \in T\}$  με τη Μαρκοβιανή ιδιότητα, δηλαδή με την ιδιότητα ότι, δεδομένης της τιμής της τ.μ  $X(t)$  (παρόν), οι τ.μ  $\{X(u):u>t\}$  (μέλλον), είναι στοχαστικά ανεξάρτητες από τις τ.μ  $\{X(s):s<t\}$  (παρελθόν). Ισοδύναμα η πιθανότητα οποιασδήποτε μελλοντικής εξέλιξης της διαδικασίας, όταν είναι γνωστή η παρούσα της κατάσταση, δεν μεταβάλλεται από επιπλέον πληροφορίες σχετικά με την παρελθούσα ιστορία της. Οι Μαρκοβιανές διαδικασίες που έχουν διακριτό χώρο καταστάσεων αναφέρονται ειδικότερα ως Μαρκοβιανές αλυσίδες.

### 3.4.2 Εισαγωγή στις κρυφές Αλυσίδες Markov

Το θεμελιώδες θεώρημα των αλυσίδων Markov είναι γνωστό σε μαθηματικούς και μηχανικούς για τουλάχιστον 100 χρόνια, αλλά μόλις τις τελευταίες δεκαετίες έχει εφαρμοστεί για την επίλυση προβλημάτων. Ας υποθέσουμε ότι μας δίνεται το ακόλουθο πρόβλημα. Το πραγματικό περιβάλλον παράγει μια ακολουθία από παρατηρήσιμα σύμβολα. Αυτά τα σύμβολα μπορεί να είναι διακριτά (όπως είναι τα αποτελέσματα από τη ρίψη ενός νομίσματος, οι χαρακτήρες ενός πεπερασμένου αλφάβητου, κα.) ή συνεχή (δείγματα φωνής, διανύσματα αυτοσυσχέτισης, ένα διάνυσμα συντελεστών γραμμικής πρόβλεψης, κα.). Το ζητούμενο είναι η δημιουργία ενός μοντέλου που να εξηγεί και να χαρακτηρίζει τα σύμβολα που παρατηρούνται. Εάν μπορεί να δημιουργηθεί ένα τέτοιο μοντέλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αργότερα για τον προσδιορισμό και την αναγνώριση άλλων ακολουθιών συμβόλων.

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος πρέπει να ληφθούν κάποιες σημαντικές αποφάσεις καθοδηγούμενες τη θεωρία των σημάτων και συστημάτων. Για παράδειγμα, πρέπει να αποφασιστεί η φόρμα που θα έχει το μοντέλο, αν θα είναι γραμμικό ή μη γραμμικό, αν θα εξαρτάται από τον χρόνο ή όχι, αν θα είναι ντετερμινιστικό ή στοχαστικό. Ανάλογα με τις αποφάσεις

που θα ληφθούν για αυτά τα ζητήματα μπορούν να δημιουργηθούν ορισμένα πιθανά μοντέλα.

Για καλύτερη εμπέδωση του ζητήματος ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να μοντελοποιήσουμε μια απλή κυματομορφή. Αν τα σύμβολα που παρατηρούμε προέρχονται από αυτή την απλή κυματομορφή τότε το μόνο που χρειάζεται για να τη μοντελοποιήσουμε είναι η μέτρηση του πλάτους, της συχνότητας και η φάση στην οποία βρίσκεται. Τώρα ας υποθέσουμε ένα πιο πολύπλοκο σήμα όπως μια κυματομορφή με ενσωματωμένο θόρυβο. Τα στοιχεία του θορύβου καθιστούν τη μοντελοποίηση του προβλήματος πιο περίπλοκη. Συνεπώς, για να γίνει μια σωστή εκτίμηση των παραμέτρων της κυματομορφής (πλάτος, συχνότητα, φάση) θα πρέπει συμπεριληφθούν και τα χαρακτηριστικά των στοιχείων του θορύβου. Στα παραπάνω παραδείγματα θεωρήσαμε τη κυματομορφή ως στατική (μη εξαρτώμενη από το χρόνο). Αν για παράδειγμα μια άγνωστη διαδικασία παράγει μια κυματομορφή με ποικίλα πλάτη, τότε ένα μη-γραμμικό μοντέλο θα ήταν πιο ταιριαστό.

### **3.4.3 Μοντέλα γραμμικών συστημάτων**

Η βασική ιδέα των παραπάνω παραδειγμάτων έχει υπάρξει αντικείμενο μελέτης στη κλασική θεωρία της επικοινωνίας. Η ποικιλία όμως, των τύπων που παράγει το πραγματικό περιβάλλον δεν τελειώνει εδώ. Τα μοντέλα γραμμικών συστημάτων αποτελούν μια άλλη σημαντική κατηγορία μοντελοποίησης και έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, τα μικρά κομμάτια σωμάτων ομιλίας μπορούν να μοντελοποιηθούν ιδιαίτερα αποτελεσματικά. Η τεχνική μοντελοποίησης του σήματος σε αυτή την περίπτωση περιλαμβάνει και τον προσδιορισμό των γραμμικών συντελεστών φίλτρου. Όπως είναι φανερό και η φασματική ανάλυση άλλων ειδών ανήκουν σε αυτή την κατηγορία. μπορεί κανείς να ενσωματώσει περαιτέρω διακυμάνσεις του σήματος στο γραμμικό μοντέλο του συστήματος, επιτρέποντας το συντελεστή φίλτρου να αλλάζει με την πάροδο του χρόνου. Στην πραγματικότητα πολλές διαδικασίες που παράγει

το περιβάλλον δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν χωρίς να ληφθεί υπόψη η χρονική μεταβολή. Τα σήματα ομιλίας είναι ένα παράδειγμα αυτών των διαδικασιών. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για την αντιμετώπιση της μοντελοποίησης σημάτων με χρονικές μεταβολές. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως στα μικρά χρονικά διαστήματα ορισμένα φυσικά σήματα, όπως η ομιλία, μπορούν να μοντελοποιηθούν ικανοποιητικά από ένα γραμμικό μη χρονικά εξαρτώμενο σύστημα με το κατάλληλο ερέθισμα. Ο ευκολότερος τρόπος για την αντιμετώπιση της χρονικά μεταβαλλόμενης διαδικασίας είναι να αντιμετωπιστεί ως ένα σύνολο μικρότερων χρονικών κομματιών, όπου κάθε ένα από αυτά τα κομμάτια μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα μοντέλο γραμμικού συστήματος. Με άλλα λόγια, το ολοκληρωμένο μοντέλο αποτελείται από μια ακολουθία συμβόλων, όπου το κάθε σύμβολο είναι ένα μοντέλο γραμμικού συστήματος που αναπαριστά ένα μικρό κομμάτι της διαδικασίας.

#### **3.4.4 Χρονικά Εξαρτώμενες Διαδικασίες**

Η μοντελοποίηση χρονικά εξαρτώμενων διαδικασιών με την παραπάνω προσέγγιση προϋποθέτει ότι μικρό χρονικό διάστημα της παρατήρησης είναι μια μονάδα με προκαθορισμένη διάρκεια. Γενικά, όμως, δεν υπάρχει μια ακριβής διαδικασία που να αποφασίζει πόσο θα είναι η χρονική διάρκεια της κάθε μονάδας ώστε τόσο η χρονική αμεταβλητότητα να παραμένει όσο και το μοντέλο γραμμικού συστήματος να είναι ουσιώδες. Στα περισσότερα φυσικά συστήματα, η διάρκεια των μικρών χρονικά διαστημάτων καθορίζεται με βάση την εμπειρία. Ωστόσο, σε πολλές διαδικασίες δεν αναμένουμε οι ιδιότητες των διαδικασιών να αλλάζουν ταυτόχρονα με τη διάρκεια των χρονικών μονάδων ούτε, να παρατηρήσουμε δραστικές αλλαγές από κάθε χρονική μονάδα στην επόμενη εκτός από ορισμένες περιπτώσεις. Η αντιμετώπιση των χρονικών μεταβολών ως τυπικό ή μη φαινόμενο οδηγεί σε περεταίρω υποθέσεις για την σχέση μεταξύ των συνεχόμενων χρονικά μοντέλων. Αυτή η προσέγγιση μοντελοποίησης του σήματος έχει αποδειχθεί αρκετά χρήσιμη και έχει αποτελέσει τη βάση μια μεγάλης ποικιλίας συστημάτων αναγνώρισης φωνής.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως αυτή η τεχνική έχει υπάρξει ιδιαίτερα χρήσιμη αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματική (από άποψη υπολογισμού, χωρητικότητας, παραμέτρων, κα.) τεχνική όσον αφορά την αναπαράσταση. Πολλές διαδικασίες περιβάλλοντος φαίνεται να εκδηλώνουν αλλαγή συμπεριφοράς σταδιακά. Τα στοιχεία της διαδικασίας συνήθως παραμένουν σταθερά, εκτός συγκεκριμένων περιπτώσεων, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο (ή μετά το πέρας ορισμένων χρονικών μονάδων που αναφέραμε νωρίτερα) και μεταβάλλουν σταδιακά η απότομα το σύνολο των ιδιοτήτων τους. Μπορούμε να έχουμε την ευκαιρία για καλύτερη εκμετάλλευση μοντελοποίησης αν πρώτα εντοπίσουμε αυτά τα διαστήματα σταθερής συμπεριφοράς και μετά να υποθέσουμε αν αυτά τα διαστήματα είναι κατά κάποιο τρόπο στατιστικά. Μια πιο επιτυχής αναπαράσταση μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιήσουμε τα μικρά χρονικά μοντέλα για κάθε ένα από αυτά τα σταθερά διαστήματα μαζί με κάποιο χαρακτηρισμό για το πώς εξελίσσεται η κάθε περίοδος στην επόμενη. Με αυτό τον τρόπο προκύπτουν κρυφά μοντέλα Markov (HMM). Προκύπτουν έτσι 3 βασικά προβλήματα που πρέπει να διευθετηθούν. 1) Πως αυτές οι σταθερές ή μη σταθερές περίοδοι μπορούν να προσδιοριστούν, 2) πως μπορεί να χαρακτηριστεί αυτή η διαδοχική εξέλιξη των περιόδων αυτών, και 3) ποιο μοντέλο πρέπει να επιλεγεί για κάθε μια από αυτές τις περιόδους. Τα κρυφά μοντέλα Markov (HMM) αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα αποτελεσματικά με τη χρήση ενός πλαισίου πιθανοτήτων.

#### **3.4.5 Ορισμός της κρυφής αλυσίδας Markov**

Μια αλυσίδα Markov (hidden markov chain) είναι μια διπλή στοχαστική διαδικασία. Η μία από τις δύο διαδικασίες είναι μια εξαρτώμενη στοχαστική διαδικασία που δεν είναι παρατηρήσιμη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει αντιληπτή μόνο μέσω της ακολουθίας των συμβόλων που έχουμε παρατηρήσει.

### Συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται για ένα διακριτό μοντέλο Markov:

$T$  = το μήκος της ακολουθίας των παρατηρήσεων μας (observations).

$N$ = ο αριθμός των καταστάσεων του μοντέλου.

$M$ = ο αριθμός των συμβόλων που παρατηρούμε στο μοντέλο.

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ , οι καταστάσεις του μοντέλου.

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ , διακριτό σετ πιθανών συμβόλων που παρατηρούμε στο μοντέλο.

$\pi = \{\pi_i\}$ ,  $\pi_i = \Pr(q_i \text{ για } t=1)$  , αρχική κατάσταση.

$B = \{b_j(k)\}$ ,  $b_j(k) = \Pr(v_k \text{ για } t | q_j \text{ για } t)$  , η πιθανότητα διανομής των συμβόλων που παρατηρούμε για μια κατάσταση  $j$ .

$A = \{a_{ij}\}$ ,  $a_{ij} = \Pr(q_j \text{ για } t+1 | q_i \text{ για } t)$  , η πιθανότητα μετάβασης από την μια κατάσταση στην άλλη.

Τα βήματα που ακολουθούνται για να παραχθεί μια ακολουθία συμβόλων ,

$O = O_1, O_2, \dots, O_T$  χρησιμοποιώντας το μοντέλο είναι τα εξής :

- Αρχικά επιλέγουμε μια αρχική κατάσταση ,  $i_1$ , σύμφωνα με τη διανομή αρχικής κατάστασης.
- Θέτουμε για  $t = 1$ .
- Επιλέγουμε ένα  $O_t$  σύμφωνα με το  $b_{i_t}(k)$ , η πιθανότητα διανομής ενός συμβόλου στην κατάσταση  $i_t$ .
- Επιλέγουμε ένα  $i_{t+1}$  σύμφωνα με το  $\{a_{i_t i_{t+1}}\}$  ,  $i_{t+1} = 1, 2, \dots, N$ , η πιθανότητα μετάβασης κατάστασης της διανομής για την κατάσταση  $i_t$  .
- Θέτουμε  $t = t+1$  και ξαναγυρνάμε στο τρίτο βήμα αν  $t < T$  διαφορετικά η διαδικασία μας τερματίζεται.

### 3.4.6 Παραδείγματα με KAM

Για να γίνει πιο κατανοητή η έννοια της KAM θα παραθέσουμε τα παρακάτω διευκρινιστικά παραδείγματα.

## Παράδειγμα 1<sup>ο</sup>:

Έστω 2 φίλοι ο Νίκος και ο Πέτρος, οι οποίοι ζουν σε διαφορετικά μέρη ο ένας από τον άλλο και ο μόνος τρόπος για να μαθαίνουν τα νέα του άλλου είναι μέσω τηλεφώνου. Οι δραστηριότητες που έχει ο Πέτρος είναι 3 : Να βλέπει τηλεόραση, να διαβάζει, να βγαίνει έξω για να διασκεδάσει. Η επιλογή της δραστηριότητας που επιλέγει να κάνει εξαρτάται συνήθως από την διάθεση του. Ο Νίκος δεν μπορεί να ξέρει για την διάθεση που έχει ο φίλος του, τα μοναδικά στοιχεία που του αποκαλύπτει ο Πέτρος είναι το πώς πέρασε την μέρα του (δηλαδή τις δραστηριότητες του) και βασιζόμενος σε αυτά προσπαθεί να μαντέψει αν ο φίλος του είναι χαρούμενος ή λυπημένος (διάθεση). Ο Νίκος θεωρεί ότι η διάθεση του φίλου του λειτουργεί σαν μια διακριτή αλυσίδα Markov. Υπάρχουν 2 καταστάσεις 'Χαρούμενος' και 'Λυπημένος' αλλά δεν μπορεί να τις παρατηρήσει είναι κρυμμένες από αυτόν (hidden states). Κάθε μέρα ο Πέτρος θα εκτελέσει μια από τις ακόλουθες δραστηριότητες 'τηλεόραση', 'διάβασμα', 'βόλτα' αυτές είναι και παρατηρήσεις μας (observations). Ολόκληρο το σύστημα που περιγράψαμε αποτελεί ένα κρυφό μοντέλο Μαρκόβ.

Θα αναπαραστήσουμε το μοντέλο που περιγράψαμε με τη χρήση ψευδοκώδικα. Ο ψευδοκώδικας παρατίθεται παρακάτω:

States = ('Χαρούμενος', 'Λυπημένος')

Observations = ('τηλεόραση', 'διάβασμα', 'βόλτα')

Start\_probability = ('Χαρούμενος': 0.65, 'Λυπημένος': 0.35)

Transition\_probability = {

'Χαρούμενος' : {'Χαρούμενος': 0.55, 'Λυπημένος': 0.45 }

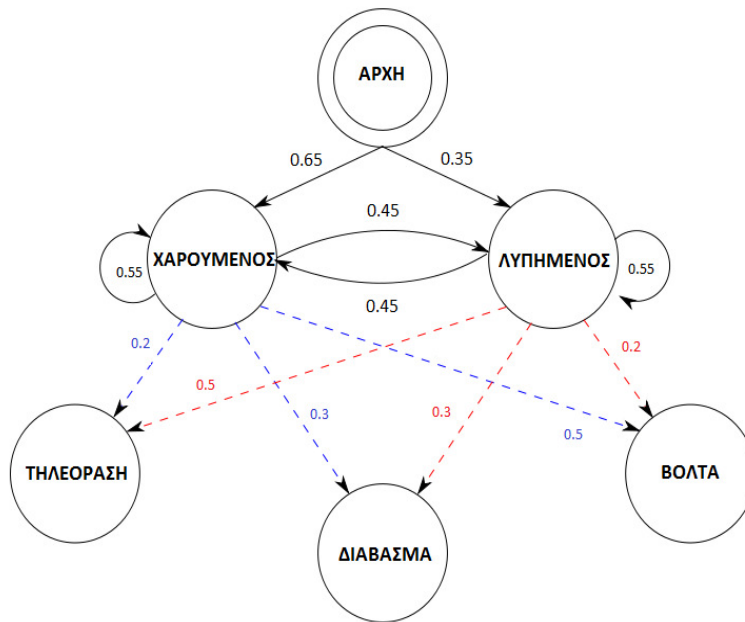
'Λυπημένος' : {'Χαρούμενος': 0.45, 'Λυπημένος': 0.55 }

Emission\_probability = {

'Χαρούμενος' : {'τηλεόραση': 0.2, 'διάβασμα': 0.3, 'βόλτα': 0.5}

'Λυπημένος' : {'τηλεόραση': 0.5, 'διάβασμα': 0.3, 'βόλτα': 0.2}

Ως Transition\_probability ορίζουμε τη πιθανότητα μετάβασης από την μια κατάσταση στην άλλη. Ως Emission\_probability ορίζουμε τη πιθανότητα μετάβασης από το ένα σύμβολο στο άλλο.



**Εικόνα 3.5**

### Παράδειγμα 2<sup>ο</sup> :

Θεωρούμε ένα Markov μοντέλο με 2 καταστάσεις και 5 δυνατές εκπομπές (emissions).

Το μοντέλο μας χρησιμοποιεί :

- Μια μαύρη τράπουλα 5 φύλλων, από τα οποία τα 5 είναι αριθμημένα από το 1 μέχρι το 5.
- Μια άσπρη τράπουλα 12 φύλλων, από τα οποία τα 5 είναι αριθμημένα από το 1 μέχρι το 5 και τα υπόλοιπα 7 φύλλα έχουν τον σύμβολο 4.
- Ένα μαύρο νόμισμα, στο οποίο η πιθανότητα να έρθει κορώνα είναι 0.85 και η πιθανότητα να έρθει γράμματα είναι 0.15.
- Ένα άσπρο νόμισμα, στο οποίο η πιθανότητα να έρθει κορώνα είναι 0.95 και η πιθανότητα να έρθει γράμματα είναι 0.05.

Το μοντέλο μας δημιουργεί μια ακολουθία αριθμών από το σετ {1,2,3,4,5} με βάση τους ακόλουθους κανόνες.



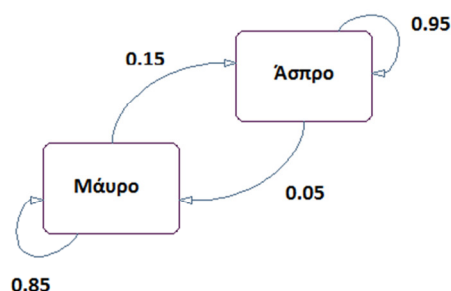
Ξεκινάμε ανακατεύοντας την μαύρη τράπουλα, τραβάμε ένα φύλλο και γράφουμε τον αριθμό που έτυχε, ο οποίος είναι η εκπομπή μας (emission). Στη συνέχεια τοποθετούμε το φύλλο που τραβήξαμε μέσα στη στοίβα της τράπουλας.

Ρίχνουμε το μαύρο νόμισμα και:

- Αν έρθει κορώνα, τραβάμε ένα φύλλο από την μαύρη τράπουλα και γράφουμε το αποτέλεσμα.
- Αν έρθει γράμματα, τραβάμε ένα φύλλο από την άσπρη τράπουλα και γράφουμε το αποτέλεσμα.

Σε κάθε επόμενο βήμα, ρίχνουμε το νόμισμα που έχει το ίδιο χρώμα με το χρώμα της τράπουλας που χρησιμοποιήσαμε στο προηγούμενο βήμα. Εάν το νόμισμα έρθει κορώνα χρησιμοποιούμε την ίδια τράπουλα με το προηγούμενο βήμα. Εάν το νόμισμα έρθει γράμματα, αλλάζουμε τράπουλα.

Το διάγραμμα καταστάσεων για αυτό το μοντέλο έχει 2 καταστάσεις μαύρο και άσπρο, όπως βλέπουμε και στην επόμενη εικόνα.



**Εικόνα 3.6**

Η εκπομπή μιας κατάστασης προκύπτει με το τράβηγμα του φύλλου από τη στοίβα που έχει το ίδιο χρώμα με την κατάσταση που βρισκόμαστε ενώ η μετάβαση στην επόμενη κατάσταση προκύπτει από το ρίξιμο του νομίσματος που έχει το ίδιο χρώμα με την κατάσταση στην οποία βρισκόμαστε.

Ο πίνακας μετάβασης καταστάσεων  $T$  είναι ο εξής:

Μαύρο	Άσπρο
0.8500	0.1500
0.0500	0.9500

**Πίνακας 3.4 Πίνακας μετάβασης καταστάσεων T**

Ο πίνακας εκπομπών (emission) E είναι :

1/5	1/5	1/5	1/5	1/5
1/12	1/12	1/12	7/12	1/12

**Πίνακας 3.5 Πίνακας εκπομπών E**

Όπου οι στήλες είναι οι αριθμοί 1,2,3,4,5 και οι γραμμές είναι οι καταστάσεις μας.

Το μοντέλο μας όπως το έχουμε περιγράψει μέχρι τώρα δεν είναι κρυφό επειδή γνωρίζουμε την ακολουθία των καταστάσεων από τα χρώματα των νομισμάτων και των τραπουλών που χρησιμοποιούνται. Υποθέτουμε ότι κάποιος παράγει τις εκπομπές χωρίς να μας δείχνει τα νομίσματα ή τις τράπουλες, το μόνο που μπορούμε να δούμε είναι η ακολουθία των εκπομπών. Εάν παρατηρήσουμε περισσότερα 4 στην ακολουθία θα υποθέσουμε ότι το μοντέλο βρίσκεται στην άσπρη κατάσταση, αλλά δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι αφού δεν βλέπουμε πλέον τις τράπουλες ή τα νομίσματα.

---

## 4. Προσομοίωση στη Matlab

---

### 4.1 Εισαγωγή

Μέχρι τώρα παρουσιάσαμε την αναλυτική περιγραφή των αλγορίθμων πρόβλεψης, σε αυτό το κεφάλαιο θα υλοποιήσουμε την προσομοίωση τους στο περιβάλλον της Matlab και θα μελετήσουμε τις αποκρίσεις τους σε πραγματικά δεδομένα. Αρχικά θα παρουσιάσουμε τις προβλέψεις των αλγορίθμων μας για δεδομένα που προέρχονται από τη γεννήτρια συνάρτηση Poisson και στη συνέχεια σε πραγματικά δεδομένα που προέρχονται από φόρτο κίνησης WiMAX. Για την καταγραφή του φόρτου κίνησης (traffic) και το φιλτράρισμα των δεδομένων (packet size, time, ip) χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Wireshark. Επιπρόσθετα μέσω των πειραμάτων και των διαγραμμάτων που εξάγονται για κάθε αλγόριθμο θα μπορέσουμε να καταλήξουμε σε κάποια χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβεια στην πρόβλεψη των αλγορίθμων (μέσο σφάλμα πρόβλεψης ή mean error rate). Ακόμη ένα στοιχείο άξιο αναφοράς που θα εξεταστεί αποτελεί ο χρόνος εκτέλεσης των αλγορίθμων και οι παράγοντες που τον επηρεάζουν. Τέλος κλείνοντας θα μελετήσουμε κάποια διαγράμματα μέσω των οποίων θα είναι εφικτή η σύγκριση των αλγορίθμων για συγκεκριμένα σενάρια και μεταβλητές εισόδου.

### 4.2 Προσομοίωση

Όπως αναφέραμε η προσομοίωση των τριών αλγορίθμων μας επιτεύχθηκε στο περιβάλλον της Matlab. Σε αυτή την ενότητα θα αναλύσουμε το περιβάλλον στο οποίο εργαστήκαμε και τα εργαλεία που χρησιμοποιήσαμε. Αρχικά όσον αφορά τον περιβάλλον της ανάπτυξης αποτελείται από ένα σύνολο εργαλείων που μας επιτρέπει να χρησιμοποιούμε τις έτοιμες συναρτήσεις καθώς και αρχεία της Matlab. Περιλαμβάνει την επιφάνεια εργασίας της Matlab και το παράθυρο εντολών που μας επιτρέπουν να

ανοίξουμε, να αποθηκεύσουμε και να επεξεργαστούμε τα αρχεία της Matlab τα οποία ονομάζονται M-files και κρατάει ακόμα ένα ιστορικό εντολών που πληκτρολογεί ο χρήστης για να μπορεί εύκολα να ανατρέξει στις παλιές του εκχωρήσεις. Επιπλέον ένα σημαντικό μέρος της Matlab αποτελεί η βιβλιοθήκη των μαθηματικών της συναρτήσεων, η οποία περιέχει με μεγάλη γκάμα από συναρτήσεις που περιλαμβάνουν από πολύ απλές μαθηματικές όπως υπολογισμούς εφαπτομένης και συνεφαπτομένης μέχρι και αρκετά σύνθετους μαθηματικούς υπολογισμούς όπως πολυώνυμα Langrage και σειρές Tylor

Η γλώσσα προγραμματισμού της Matlab είναι μια αρκετά υψηλού επιπέδου γλώσσα πάνω στην λογική των πινάκων, γεγονός που ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο για τη υλοποίηση των αλγορίθμων που προσομοιώσαμε, αφού το μεγαλύτερο μέρος της υλοποίησης τους αφορούσε επεξεργασία πινάκων και πράξεις πάνω σε αυτούς. Επιπρόσθετα η γλώσσα προγραμματισμού περιλαμβάνει έλεγχο ροής προγράμματος και αντικειμενοστραφείς προγραμματιστικές τεχνικές που δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη προγραμματίσει είτε εύκολα και γρήγορα προγράμματα είτε και μεγάλες εφαρμογές.

Ένα ακόμη σημαντικό μέρος της γλώσσα προγραμματισμού μέσω του οποίου εξάγαμε τις γραφικές μας παραστάσεις αποτελεί το γραφικό σύστημα της Matlab. Περιλαμβάνει υψηλού επιπέδου εντολές για δισδιάστατες αλλά και για τρισδιάστατες αναπαραστάσεις δεδομένων και επεξεργασία εικόνων. Επιπλέον η επεξεργασία των γραφημάτων μπορεί να γίνει ακόμα πιο εύκολη με την χρήση των απλών εντολών της Matlab που επιτρέπουν την επεξεργασία και την εύκολη διαχείριση των γραφημάτων της.

Μια αρνητική συνέπεια που προκύπτει από την χρησιμοποίηση της Matlab είναι οι μεγάλοι χρόνοι προσομοίωσης που επιτυγχάνονται έναντι άλλων γλωσσών προγραμματισμού που είναι χαμηλότερου επιπέδου. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως προαναφέραμε η Matlab αποτελεί μια υψηλού επιπέδου γλώσσα προγραμματισμού άμεσα συνδεδεμένη με την γλώσσα C. Προσφέρει παράλληλα την δυνατότητα εύκολης επεξεργασίας πινάκων που άλλες γλώσσες προγραμματισμού αδυνατούν να την παρέχουν. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

Οι τρεις αλγόριθμοι που χρησιμοποιούμε για να εκτιμήσουμε το μέγεθος πακέτου, τον χρόνο άφιξης και το διάστημα που μεσολαβεί για να έχουμε άφιξη του επόμενου πακέτου, έχουν μια αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών με το περιβάλλον. Μέσω της ανατροφοδότησης που τους παρέχει το περιβάλλον οι αλγόριθμοι μας ανανεώνουν τους πίνακες εκπαίδευσης τους ο καθένας σύμφωνα με τους μηχανισμούς που έχουν περιγραφεί στο τρίτο κεφάλαιο και στην συνέχεια περνούν στην διαδικασία των εκτιμήσεων. Καθένας από τους αλγόριθμους μας έχει εφαρμοστεί με ιδιαίτερη επιτυχία για την λύση προβλημάτων όπως είναι : η αναγνώριση προτύπων, η δικτύωση πρωτοκόλλων και δεδομένων ακόμα στη αναγνώριση ανθρώπινης φωνής και αναγνώριση χαρακτηριστικών προσώπου.

### 4.3 Ανάλυση των αλγορίθμων και παραδείγματα εκτέλεσης

#### 4.3.1 Αλγόριθμος Παρεκτροπής (Extrapolation)

Σε πρώτη φάση θα πραγματοποιήσουμε την προσομοίωση των αλγορίθμων για δεδομένα που μας παράγει η γεννήτρια συνάρτηση Poisson. Για τον Αλγόριθμο Παρεκτροπής γίνεται χρήση της γραμμικής και της κυβικής συνάρτησης. Μέχρι στιγμής έχουμε αναφερθεί στο θεωρητικό και μαθηματικό υπόβαθρο αυτών των συναρτήσεων. Στον παρακάτω ψευδοκώδικα μπορεί εύκολα να γίνει κατανοητό πως εφαρμόζονται πρακτικά. Για να υπολογίσουμε το παρεμβαλλόμενο πολυώνυμο  $P$  στο  $n+1$  για διακριτούς αριθμούς  $\chi_0, \dots, \chi_n$  στον αριθμό  $\chi$  για την συνάρτηση  $f$  :

#### Αρχή

**Εισαγωγή δεδομένων** : αριθμοί  $\chi_0, \dots, \chi_n$  ; τιμές  $f(\chi_0), \dots, f(\chi_n)$  και ως πρώτη

στήλη  $Q_{0,0}, Q_{1,0}, \dots, Q_{n,0}$  του  $Q$ .

**Έξοδος δεδομένων** : ο πίνακας  $Q$  με  $P(x) = Q_{n,n}$

**Βήμα 1** : Για  $i = 1, 2, \dots$

Για  $j = 1, 2, \dots, i$

$$Q_{i,j} = \frac{(x-x_{j-1})Q_{i,j-1} - 1 - (x-x_j)Q_{i-1,j-1}}{x_j - x_{j-1}}$$

**Βήμα 2** : Έξοδος (Q);

**Τέλος**

---

Στον ψευδοκώδικα που παρατίθεται δίνεται μια συνοπτική περιγραφή της γραμμικής συνάρτησης του αλγόριθμου παρεκτροπής. Περνώντας στο κομμάτι της προσομοίωσης μπορούμε να δούμε πως αυτός εφαρμόζεται και τα αποτελέσματα τα οποία δίνει σε πρακτικό επίπεδο. Παρακάτω αναλύεται το σενάριο προσομοίωσης (Σενάριο 1) του εν λόγω αλγορίθμου.

## Γραμμική Παρεκτροπή (Σενάριο 1)

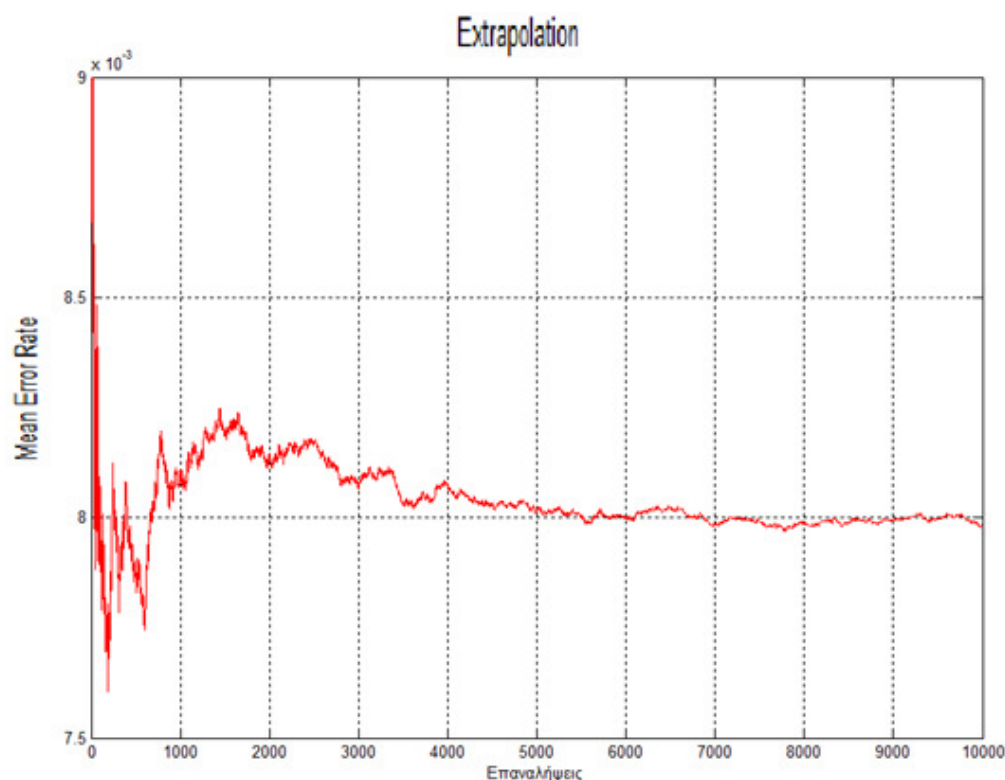
Για την μέτρηση του μέσου ρυθμού σφάλματος λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- Γραμμική Συνάρτηση (Linear Extrapolation).
- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Αρχικός πίνακας δεδομένων P με μέση τιμή του λ ίση με 50.

Ο υπολογισμός του ρυθμού σφάλματος μοντέλου (error rate) δίνεται από τη σχέση:

Σφάλμα μοντέλου = απόλυτη τιμή (πραγματικός χρόνος – εκτιμώμενος χρόνος) / εύρος τιμών των διαστημάτων

ενώ ο Μέσος Ρυθμός Σφάλμα (mean error rate) προκύπτει από το άθροισμα των σφαλμάτων του μοντέλου διά των επαναλήψεων.

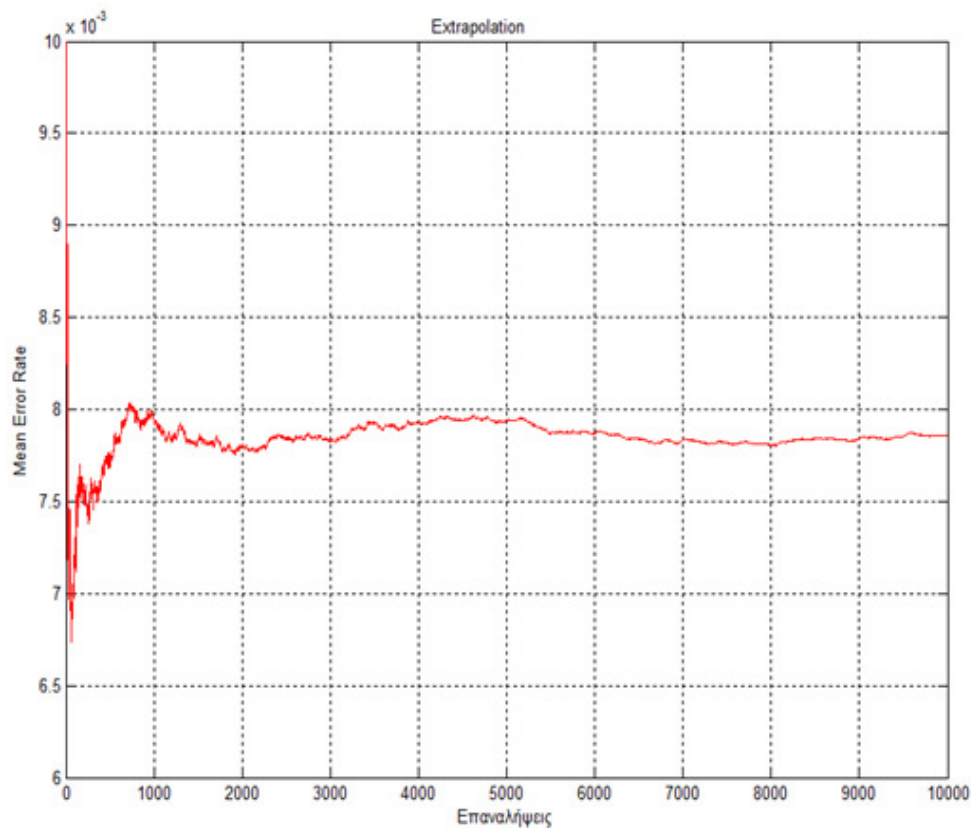


Γράφημα 4.1 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος Γραμμικής (Σενάριο 1)

## Κυβική Παρεκτροπή (Σενάριο 1)

Για την μέτρηση του μέσου ρυθμού σφάλματος λήφθηκαν υπόψη τα εξής:

- Κυβική Συνάρτηση (Cubic Extrapolation).
- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Αρχικός πίνακας δεδομένων P με μέση τιμή του λ ίση με 50.
- Αρχικός πίνακας δεδομένων V ίσος με 1000.



Γράφημα 4.2 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος Κυβικής (Σενάριο 1)

### 4.3.2 Αλγόριθμος Αυτόματο Εκμάθησης (ΑΕ)

Έως αυτό το σημείο έχει αναφερθεί η θεωρητική υπόσταση ενός αυτομάτου το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα που τροποποιεί τη στρατηγική ελέγχου στη βάση της δικής του εμπειρίας, προκειμένου να πετύχει καλές επιδόσεις ελέγχου. Στην παρούσα φάση θα πραγματοποιηθεί μια πιο πρακτική ανάλυση του αλγορίθμου για να αντιληφθούμε πως η



παραπάνω θεωρητική ερμηνεία των Αυτομάτων εφαρμόζεται έμπρακτα. Για το λόγο αυτό παραθέτουμε το κομμάτι του ψευδοκώδικα που αφορά τον εν λόγω αλγόριθμο.

---

## Αρχή

- Θέτουμε κάθε στοιχείο του αρχικού μας πίνακα (P) ίσο με 1 δια τον αριθμό των καταστάσεων (actions) και τη μεταβλητή (sum) ίση με το μηδέν.
- Ορίζουμε τη μεταβλητή learning rate (L) ίση με 0.01 και τη μεταβλητή ασφάλειας (a) ίση με 0.0001.
- Αρχικοποιούμε τις μεταβλητές mean\_error\_rate , Poisson\_environment, error\_rate , sum\_error\_rate.

Για n από 1 μέχρι N

**Μέχρις ότου** (Poisson\_environment > (actions-1)) ή  
(Poisson\_environment < 0)

Poisson\_environment = poissrnd (lambda,1,1);

## Τέλος Επανάληψης

**Για** counter\_action=0:(actions-1)

**Εαν** (counter\_action ~ Poisson\_environment)

P(counter\_action+1) = P(counter\_action+1)L \* P(counter\_action+1);

**Εαν** P(counter\_action+1) < a

P(counter\_action+1) = a;

**Τέλος**

**Τέλος**

**Τέλος**

P(Poisson\_environment) = 1 - (sum(P) - P(Poisson\_environment));

**Εάν**  $n > 100$

$s = 0$ ; %Αθροισμα

Random\_estimation = rand;

column\_of\_P = 1;

**Μέχρις ότου** (Random\_estimation > s) **και** (column\_of\_P <= actions)

$s = s + P(\text{column\_of\_P})$ ;

column\_of\_P = column\_of\_P + 1;

**Τέλος**

**Εάν** (column\_of\_P > actions), column\_of\_P = actions;

**Τέλος**

error\_rate(1, end+1) = abs((column\_of\_P - Poisson\_environment) / actions);

sum\_error\_rate = sum\_error\_rate + error\_rate(1, end);

mean\_error\_rate(1, end+1) = sum\_error\_rate / (n - 100);

**Αλλιώς**

error\_rate(1, end+1) = 0;

**Τέλος**

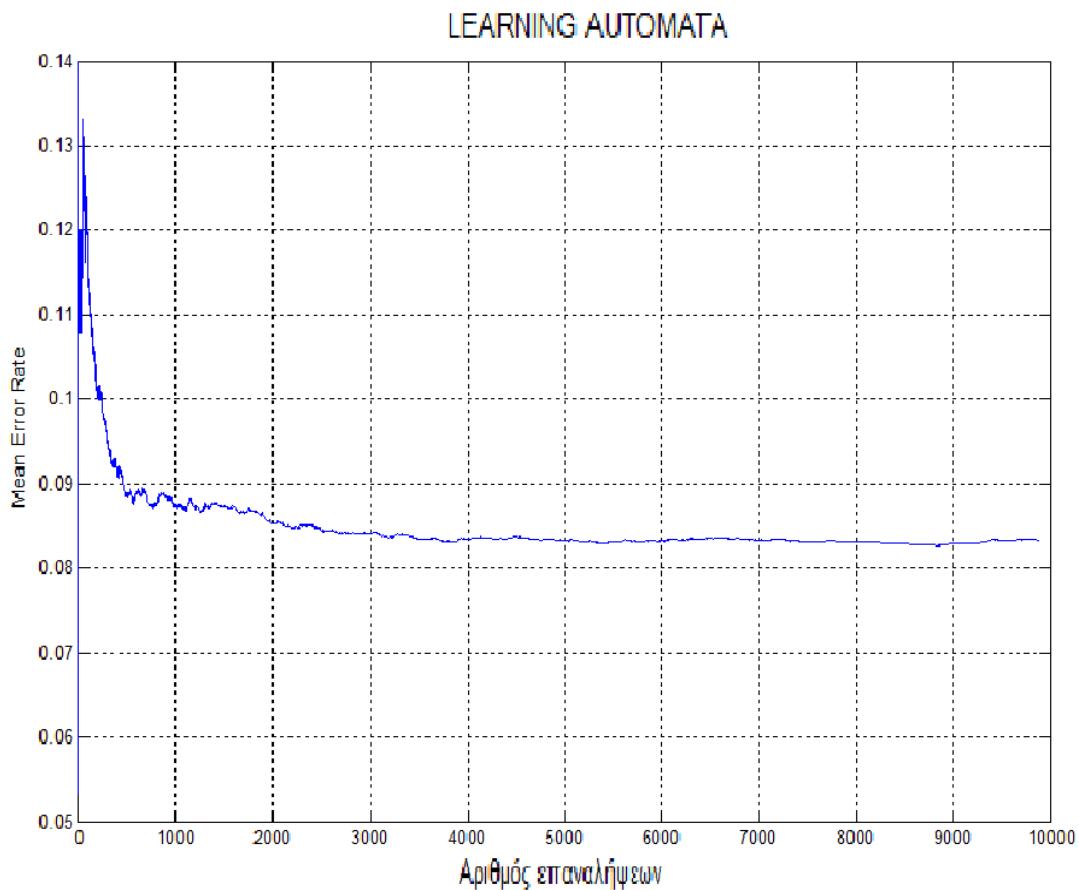
---

Στον ψευδοκώδικα που παρατίθεται δίνεται μια περιγραφή του αλγόριθμου Αυτόματα Εκμάθησης για δεδομένα κίνησης που προκύπτουν μέσω της Poisson με μέση τιμή ίση με πενήντα. Περνώντας στο κομμάτι της προσομοίωσης μπορούμε να δούμε πως αυτός εφαρμόζεται και τα αποτελέσματα τα οποία δίνει σε πρακτικό επίπεδο. Παρακάτω αναλύεται το σενάριο προσομοίωσης (Σενάριο 1) του εν λόγω αλγορίθμου.

### **Αυτόματο Εκμάθησης (Σενάριο 1)**

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson, με μέση τιμή του  $\lambda$  σταθερή και ίση με 50.
- Αριθμός actions ίσος με 100.
- Μεταβλητή Learning Rate (L) ίση με 0,01.

- Μεταβλητή ασφάλειας ( $\alpha$ ) ίση με 0,0001.
- Αρχικός πίνακας  $P_{init}$  ίσος με  $1/actions$ .
- Διαδικασία εκκίνησης πρόβλεψης μετά από 100 επαναλήψεις.
- Μεταβλητή (Column of  $P$ ) ίση με 1.
- Αρχικός πίνακας δεδομένων  $V$  ίσος με 1000.



**Γράφημα 4.3 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος ΑΕ (Σενάριο 1)**

### 4.3.3 Αλγόριθμος Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ (Hidden Markov Chains)

Έχουμε αναφέρει πως μια ΚΑΜ (Κρυφή Αλυσίδα Μαρκόβ) είναι μια διπλή στοχαστική διαδικασία. Η μια από τις δύο διαδικασίες είναι εξαρτώμενη στοχαστική διαδικασία που δεν είναι παρατηρήσιμη. Η διαδικασία αυτή μπορεί

να γίνει αντιληπτή μόνο μέσω της ακολουθίας των συμβόλων που έχουμε παρατηρήσει.

Τα βήματα που ακολουθούνται για να παραχθεί μια ακολουθία συμβόλων έχουν αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 3.3. Στην παρούσα φάση μέσω του ψευδοκώδικα και του διαγράμματος που θα παρουσιάσουμε παρακάτω θέλουμε να δώσουμε έμφαση στην πρακτική εφαρμογή των ανωτέρω και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων που αυτή μπορεί να αποφέρει. Για το λόγο αυτό παρουσιάζουμε τον ψευδοκώδικα του αλγορίθμου KAM.

---

## Αρχή

- Θεωρούμε τον αριθμό δυνατών καταστάσεων ίσο με 100.
- Ορίζουμε τον αρχικό μας πίνακα ενημέρωσης (Q) ίσο με 100 X100 διαστάσεις.
- Αρχικοποιούμε τις μεταβλητές `error_rate`, `mean_error_rate`, `Q`, `sum_error_rate`.

**Για** `i=1:100%` Γεμίζει ο πίνακας εναλλαγής καταστάσεων με τιμές Poisson

`P(1,i)=poissrnd(lambda,1,1);`

**Μέχρις ότου** `(P(1,i)<0) Η (P(1,i)>100)`

`P(1,i)=poissrnd(lambda,1,1);`

**Τέλος**

**Τέλος**

**Για** `j=1:99%` Γίνεται ενημέρωση του πίνακα Q , ο οποίος είναι ο πίνακας εκμάθησης

`Q(P(1,j+1)+1,P(1,j)+1) = Q(P(1,j+1)+1,P(1,j)+1)+1;`

**Τέλος**

**Για** `k=1:N`

`[max_value,position]=max (Q(:,P(1,99+k)+1));`

```
estimation_value=position-1;
```

```
%Υπολογισμός και εισαγωγή στον πίνακα P της πραγματικής τιμής
```

```
P(1,end+1)=poissrnd(lambda,1,1);
```

```
Μέχρις ότου (P(1,end)<0) H (P(1,end)>100)
```

```
P(1,end)=poissrnd(lambda,1,1);
```

## **Τέλος**

```
true_value=P(1,end);
```

```
Q(P(1,end)+1,P(1,end-1)+1) = Q(P(1,end)+1,P(1,end-1)+1)+1;
```

```
error_rate(1,k)=(abs(estimation_value-true_value))/101;
```

```
sum_error_rate=sum_error_rate+error_rate(1,k);
```

```
mean_error_rate(1,k)=sum_error_rate/k;
```

## **Τέλος**

---

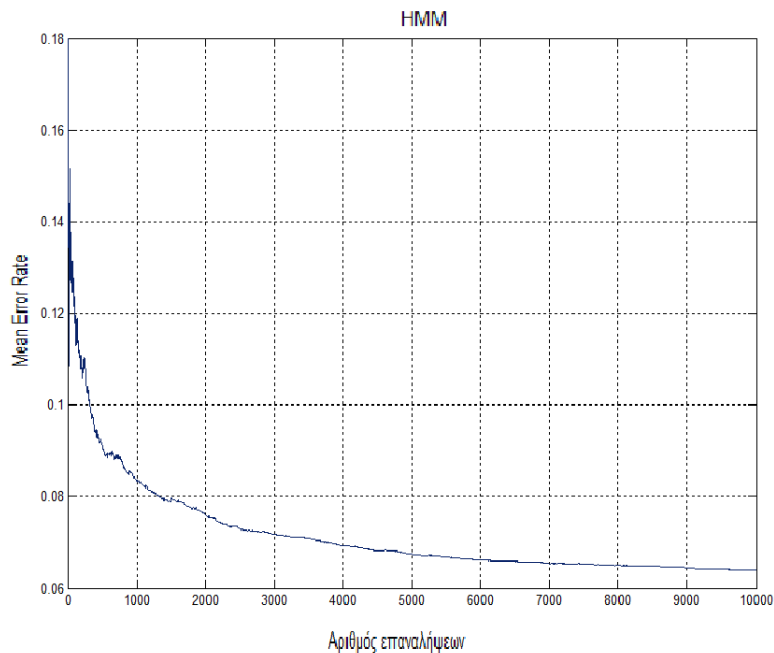
Στον ψευδοκώδικα που παρατίθεται δίνεται μια περιγραφή του αλγόριθμου Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ για δεδομένα κίνησης που προκύπτουν μέσω της κατανομής Poisson με μέση τιμή ίση με πενήντα. Περνώντας στο κομμάτι της προσομοίωσης μπορούμε να δούμε, πως αυτός εφαρμόζεται και τα αποτελέσματα τα οποία δίνει σε πρακτικό επίπεδο. Παρακάτω αναλύεται το σενάριο προσομοίωσης (Σενάριο 1) του εν λόγω αλγορίθμου.

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson, με μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Αρχικός πίνακας δεδομένων V ίσος με 1000.

Ο υπολογισμός του ρυθμού σφάλματος μοντέλου (error rate) δίνεται από τη σχέση:

Σφάλμα μοντέλου = απόλυτη τιμή (πραγματικός χρόνος – εκτιμώμενος χρόνος) / εύρος τιμών των διαστημάτων,

ενώ ο Μέσος Ρυθμός Σφάλμα (mean error rate) προκύπτει από το άθροισμα των σφαλμάτων του μοντέλου διά του αριθμού των επαναλήψεων.



**Γράφημα 4.4 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος KAM (Σενάριο 1)**

## 4.4 Επεξεργασία Φόρτου κίνησης WiMAX

### 4.4.1 Επεξεργασία Φόρτου κίνησης στο Wireshark

Στην ενότητα που προηγήθηκε αναλύσαμε πως εφαρμόζονται οι αλγόριθμοι πρόβλεψης σε σενάριο προσομοίωσης όπου η κίνηση των πακέτων προκύπτει μέσω κατανομής Poisson. Οι τρεις αλγόριθμοι κατά την προσομοίωση ανταποκρίθηκαν πολύ ικανοποιητικά ως προς την πρόγνωση του μέσου σφάλματος για τα πακέτα σύμφωνα με το θεωρητικό υπόβαθρο που έχουμε μελετήσει. Όμως για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τους αλγορίθμους και για να έχουμε αποτελέσματα άξια εμπιστοσύνης θα πρέπει αυτοί να δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες και για ρεαλιστικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό αποφασίσαμε να δοκιμάσουμε τους αλγόριθμους για να πραγματοποιήσουμε προβλέψεις σε πακέτα που προέρχονται από κίνηση που χρησιμοποιείται από το δίκτυο πρόσβασης WiMAX. Όπως έχουμε ήδη

αναφέρει για την καταγραφή και την επεξεργασία του φόρτου κίνησης χρησιμοποιήθηκαν δυο προγράμματα το Wireshark και η Matlab. Σε πρώτη φάση έγινε η καταγραφή της διαδικτυακής κίνησης με την εντολή capture του Wireshark για δεδομένα που προέρχονται είτε κατά την χρησιμοποίηση της εμπορικής εφαρμογής Skype (άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων) είτε κατά την χρήση ενός πραγματικού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (Real Streaming). Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε ενδεικτικά το φόρτο κίνησης που προκύπτει.

Time	Source	Destination	Protocol	Length
8.745844	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514
8.745891	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
8.851549	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514
8.851599	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
8.857663	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	261
8.894188	74.210.10.146	65.54.81.7	HTTP	342
8.924830	74.210.10.146	74.210.10.255	NBDS	243
9.013371	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	384
9.021687	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514
9.021711	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
9.170371	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514
9.171878	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514
9.171898	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
9.284168	74.210.10.146	64.71.255.198	DNS	74
9.304142	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514
9.321183	64.71.255.198	74.210.10.146	DNS	281
9.322060	74.210.10.146	207.68.178.61	TCP	62
9.322203	74.210.10.146	207.46.9.121	HTTP	1514
9.322213	74.210.10.146	207.46.9.121	HTTP	1376
9.322423	74.210.10.146	207.68.178.61	TCP	62
9.502874	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
9.590541	207.68.178.61	74.210.10.146	TCP	60
9.590557	74.210.10.146	207.68.178.61	TCP	54
9.590757	74.210.10.146	207.68.178.61	HTTP	1514
9.590767	74.210.10.146	207.68.178.61	HTTP	320
9.592492	207.46.9.121	74.210.10.146	TCP	66
9.615642	65.54.81.7	74.210.10.146	HTTP	1514

**Εικόνα 4.5 Φόρτο κίνησης μέσω χρήσης Wireshark**

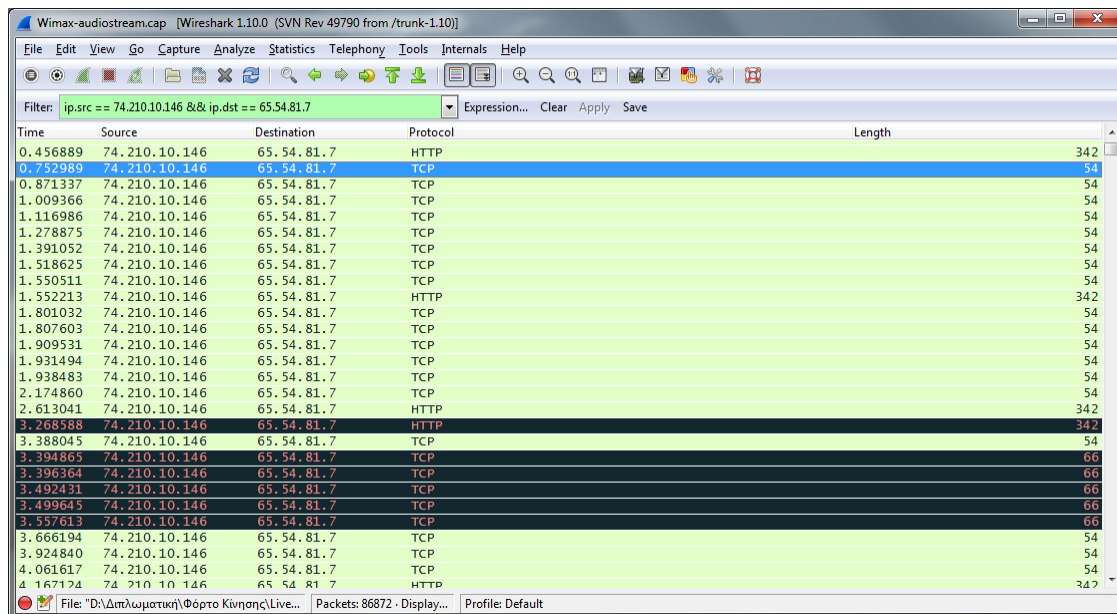
Όπως βλέπουμε στην εικόνα 4.5, ο πίνακας παρουσιάζει διαφόρων τύπων δεδομένα όπως πακέτα UDP, TCP, HTTP, DNS, NBDS τα οποία αποστέλλονται μεταξύ διαφορετικών IP διευθύνσεων.

Όμως για να εξάγουμε συγκεκριμένα δεδομένα που μας ενδιαφέρουν χρησιμοποιήσαμε 2 φίλτρα. Το πρώτο φίλτρο που χρησιμοποιείται είναι το IP φίλτρο προκειμένου να φιλτράρουμε τα δεδομένα μας για να έχουμε συγκεκριμένο αποστολέα IP και συγκεκριμένο παραλήπτη IP. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε για το πρώτο φιλτράρισμα είναι:

`"ip.src==74.210.10.146 && ip.dst==65.54.81.7"`

Σύμφωνα με την παραπάνω εντολή ορίζουμε να προβάλλονται μόνο πακέτα που έχουν ως αποστολέα με IP 74.210.10.146 και παραλήπτη με IP

65.54.81.7. Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.6.



Time	Source	Destination	Protocol	Length
0.456889	74.210.10.146	65.54.81.7	HTTP	342
0.752989	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
0.871337	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.009366	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.116986	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.278875	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.391052	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.518625	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.550511	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.552213	74.210.10.146	65.54.81.7	HTTP	342
1.801032	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.807603	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.909531	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.931494	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.938483	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
2.174860	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
2.613041	74.210.10.146	65.54.81.7	HTTP	342
3.268588	74.210.10.146	65.54.81.7	HTTP	342
3.388045	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
3.394865	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.396364	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.492431	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.499645	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.557613	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.666194	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
3.924840	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
4.061617	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
4.167174	74.210.10.146	65.54.81.7	HTTP	342

**Εικόνα 4.6 Φόρτο κίνησης μέσω χρήσης Wireshark με φιλτραρισμένη IP**

Το δεύτερο φίλτρο που χρησιμοποιείται είναι το φίλτρο πακέτων πρωτόκολλων. Αυτό συμβαίνει γιατί στην περίπτωση μας χρειαζόμαστε συγκεκριμένου τύπου πακέτα πρωτοκόλλων όπως τα TCP και UDP διότι μας ενδιαφέρουν μόνο τα πακέτα πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων. Η εντολή που χρησιμοποιήθηκε για το δεύτερο φιλτράρισμα είναι:

`"ip.src==74.210.10.146 && ip.dst==65.54.81.7&& tcp"`

Το αποτέλεσμα του φιλτραρίσματος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 4.7.



Time	Source	Destination	Protocol	Length
1.116986	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.278875	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.391052	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.518625	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.550511	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.801032	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.807603	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.909531	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.931494	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
1.938483	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
2.174860	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
3.388045	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
3.394865	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.396364	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.492431	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.499645	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.557613	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
3.666194	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
3.924840	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
4.061617	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
4.297509	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
5.127942	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	66
5.340398	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
6.333115	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
6.445417	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
6.568614	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
6.763775	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54
6.910152	74.210.10.146	65.54.81.7	TCP	54

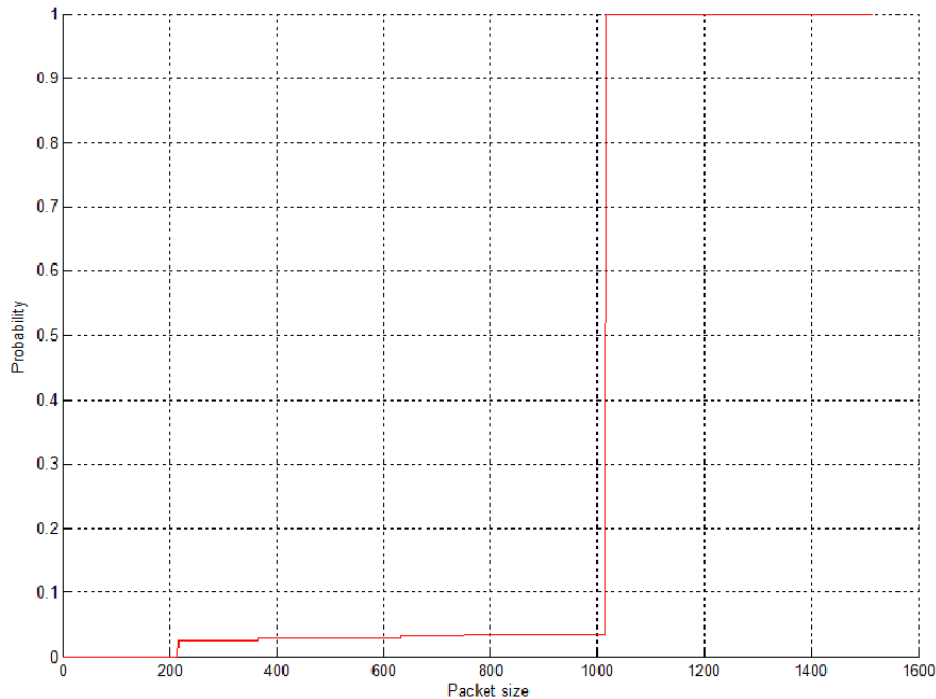
**Εικόνα 4.7 Φόρτο κίνησης μέσω χρήσης Wireshark με φιλτραρισμένη IP και φιλτραρισμένα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων**

Στην εικόνα 4.7 έχουμε την τελική μορφή των δεδομένων που χρειαζόμαστε για να εισάγουμε στους αλγορίθμους μας. Σε αυτό το στάδιο θα εξάγουμε τα δεδομένα μας σε μορφή .txt μέσω της εντολής export του Wireshark.

#### 4.4.2 Επεξεργασία Φόρτου κίνησης στη Matlab

Στη συνέχεια εισάγουμε τα δεδομένα που βρίσκονται στο txt αρχείο στην Matlab μέσω της αντίστοιχης εντολής Import. Μπορούμε πλέον να χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα που έχουμε για προσομοίωση με την χρήση των αλγορίθμων μας. Τα πακέτα που έχουμε είναι αρκετά για να καλύψουν την φάση εκμάθησης των αλγορίθμων μας ωστόσο δεν είναι επαρκή για να εξάγουμε πολλές προβλέψεις ώστε να εκτιμήσουμε την πορεία σφαλμάτων πρόβλεψης. Η δημιουργία περισσότερων πακέτων για την εξαγωγή έγκυρων συμπερασμάτων, είναι αναγκαία. Για το σκοπό αυτό, κατηγοριοποιούμε τα δεδομένα, όπως το μέγεθος πακέτου (packet\_size) και το χρόνο άφιξης

πακέτου (arrival time), σε διαστήματα και εξάγουμε την πυκνότητα πιθανότητας για αυτά τα δεδομένα. Ενδεικτικά βλέπουμε στο γράφημα 4.8 το διάγραμμα πυκνότητας πιθανότητας για τον χρόνο που μεσολαβεί μέχρι την άφιξη του επόμενου πακέτου (interarrival time).



**Γράφημα 4.8 Υπολογισμός πυκνότητας πιθανότητας για packet size**

Το γράφημα 4.8 κατασκευάστηκε με την βοήθεια της αθροιστικής πιθανότητας. Από τη θεωρία της αθροιστικής πιθανότητας γνωρίζουμε ότι, εκεί που έχουμε απότομες και μεγάλες αλλαγές στο γράφημα θα έχουμε την ύπαρξη περισσότερων στοιχείων. Για παράδειγμα στην συγκεκριμένη περίπτωση απότομες αλλαγές έχουμε στα διαστήματα 210 και 1010. Αυτό σημαίνει ότι τα περισσότερα πακέτα μας έχουν μέγεθος πακέτου 210 και 1010 bytes. Με την ίδια λογική εξάγεται και το διάγραμμα για τον χρόνο που μεσολαβεί μέχρι την άφιξη του επόμενου πακέτου (interarrival time). Στις παρακάτω εικόνες προβάλλεται τμήμα του κώδικα της matlab για τον υπολογισμό της αθροιστικής πιθανότητας.

```

26 - [max_interarrival_time]=max(data1(:,3));%Εύρεση και εκχώρηση του μεγαλύτερου interarrival_time στη μεταβλητή
27 - [max_packet_size]=max(data1(:,2));%Εύρεση και εκχώρηση του μεγαλύτερου packet_size στη μεταβλητή
28 - %Για το interarrival time)Για το counter1 πόσα interarrival_time υπάρχουν
29 - %σε κάθε διάστημα και το το counter2 για το packet size
30 - k=1; counter1=[];
31 - for i=0:interval1:max_interarrival_time %Όπου interval1 τα διαστήματα στα οποία θα χωρήσουμε τα interarrival time
32 -     counter1(1,k)=i+interval1;
33 -     counter1(2,k)=0;
34 -     k=k+1;
35 - end
36 - data1_size=size(data1);
37 - counter1_size=size(counter1);
38 - for packet_id=1:data1_size(1)
39 -     i=1; flag=true;
40 -     %Γίνεται ο έλεγχος για να βρούμε σε ποιο διάστημα βρίσκεται το κάθε
41 -     %interarrival time π.χ εαν είναι το 0.15 να βρούμε το διάστημα 0.1-0.2
42 -     %και να αυξηθεί ο μετρητής των interarrival times εκείνου του διαστήματος
43 -     while (i<=counter1_size(2))&&(flag==true)
44 -         if data1(packet_id,3)<=counter1(1,i)
45 -             counter1(2,i)=counter1(2,i)+1;
46 -             flag=false;
47 -         end
48 -         i=i+1;
49 -     end
50 - end
51 - %Υπολογισμός αθροιστικής κατανομής interarrival time πόσα πακέτα έχουν
52 - %έρθει μέχρι εκείνο το διάστημα
53 - for i=2:counter1_size(2)
54 -     counter1(2,i)=counter1(2,i)+counter1(2,i-1);
55 - end

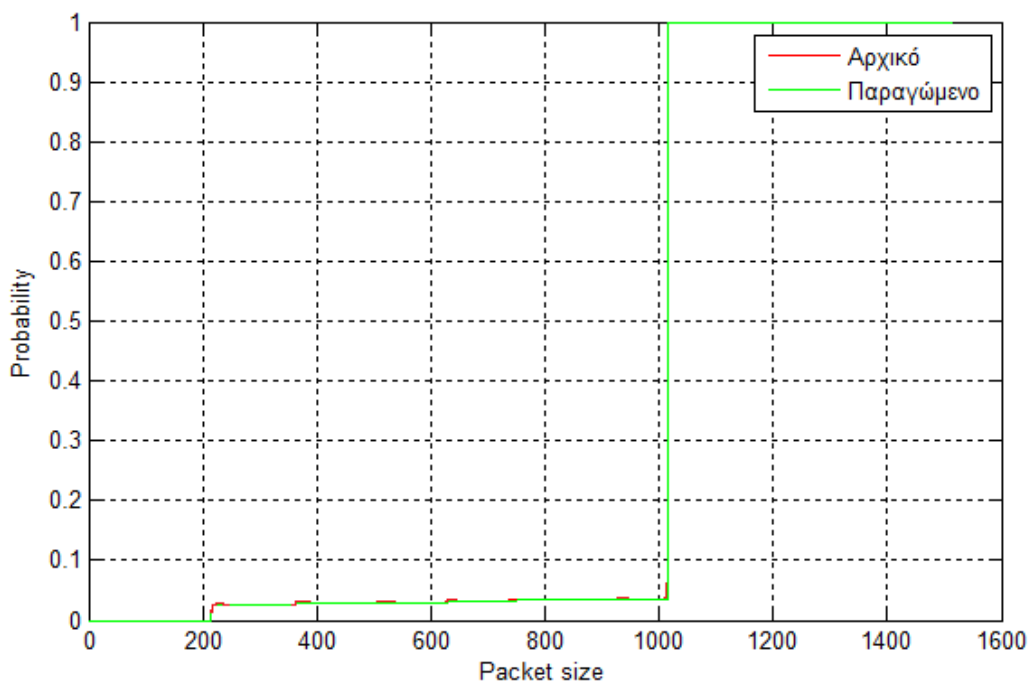
```

**Εικόνα 4.9 Υπολογισμός Αθροιστικής πιθανότητας για Interarrival Time**

Μέχρι στιγμής έχουμε κατηγοριοποιήσει το μέγεθος πακέτου, το χρόνο άφιξης και τον χρόνο που μεσολαβεί μέχρι την άφιξη του επόμενου πακέτου. Σε αυτό το σημείο θέλουμε να παράγουμε φόρτο κίνησης για μια ώρα με βάση τη συνάρτηση πιθανότητας που έχουμε δημιουργήσει από πραγματικά δεδομένα. Θα αναλύσουμε την λογική με την οποία θα πραγματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία με το εξής απλό παράδειγμα.

Έστω ότι θέλουμε να χωρίσουμε το μέγεθος πακέτου σε κατηγορίες των 10 bytes. Έστω ότι το μέγιστο μέγεθος πακέτου είναι 1050, τα πακέτα με 0 έως 10 bytes έχουν πιθανότητα 0.2 να ανήκουν σε αυτό το διάστημα. Τα

πακέτα από 10 έως 20 bytes έχουν πιθανότητα 0.3 να ανήκουν στο αντίστοιχο διάστημα και ούτω κάθε εξής μέχρι το διάστημα 1040 έως 1050 bytes με πιθανότητα 0,4. Θα χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση παραγωγής τυχαίων τιμών (rand) της Matlab η οποία θα μας εξάγει την κίνηση του περιβάλλοντος. Έστω ότι η συνάρτηση παραγωγής τυχαίων τιμών μας επιστρέφει την τιμή 0.3 , επομένως αυτή η τιμή ανήκει στο διάστημα από 10 έως 20 bytes και επιλέγουμε την μέση τιμή του διαστήματος που στην περίπτωση μας, είναι 15 bytes. Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία για όσο διάστημα θέσουμε για να δημιουργήσουμε μια προβλεπόμενη αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση μας δημιουργούμε φόρτο κίνησης για 1 ώρα και συγκρίνουμε το αρχικό διάγραμμα αθροιστικής πιθανότητας με το προβλεπόμενο στο γράφημα 4.10.



**Γράφημα 4.10 Σύγκριση της αθροιστικής πιθανότητας για το packet size**

Όπως βλέπουμε και από το γράφημα 4.8 οι καμπύλες αθροιστικής πιθανότητας δεν διαφέρουν παρα ελάχιστα. Με κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται η αρχική μας πιθανότητα ενώ με πράσινο χρώμα η προβλεπόμενη

πιθανότητα για 1 ώρα. Οι 2 πιθανότητες όπως φαίνεται και από το γράφημα είναι σχεδόν ταυτόσημες. Επομένως έχουμε δημιουργήσει φόρτο κίνησης σύμφωνα με τον αρχικό, που ανταποκρίνεται σε πραγματικά δεδομένα κίνησης τύπου WiMAX.

```

115 %//////// Παραγωγή κίνησης για μια ώρα ////////////%
116
117 %Για 1 ώρα
118 i=data1_size(1);
119 while data1(i,1)<3600
120     Random_value=rand;
121     k=2;
122     while (Random_value>probability1(1,k))
123         k=k+1;
124     end
125     New_int_time=(counter1(1,k)+counter1(1,k-1))/2;
126     l=2;
127     while (Random_value>probability2(1,l))
128         l=l+1;
129     end
130     New_packet_size=(counter2(1,l)+counter2(1,l-1))/2;
131     data1(i+1,1)=data1(i,1)+New_int_time;
132     data1(i+1,2)=New_packet_size;
133     data1(i+1,3)=New_int_time;
134     i=i+1;
135 end
136 s=size(data1);
137 a=round(0.1*s(1));
138 N=s(1)-a;
139 for i=1:a% Πίνακας P περιέχει τα time,packet_size και interarrival_time
140     P(i,1)=i;
141     P(i,2)=data1(i,1);%Time
142     P(i,3)=data1(i,2);%Packet_size
143     P(i,4)=data1(i,3);%Interarrival_Time
144 end

```

**Εικόνα 4.11 Υπολογισμός φόρτου κίνησης για 1 ώρα**

Στην εικόνα 4.11 βλέπουμε τον κώδικα με τον οποίο έχουμε παράγει κίνηση για 1 ώρα. Πραγματοποιούμε έλεγχο ώστε το στοιχείο data1(i,1), που στην περίπτωση μας αντιπροσωπεύει τον χρόνο άφιξης πακέτου, να μην ξεπερνάει τα 3600 δευτερόλεπτα (1 ώρα). Η μεταβλητή rand μας επιστρέφει τιμές στο διάστημα [0~1]. Στην συνέχεια με την χρήση δυο δομών επανάληψης while, ελέγχουμε σε ποιο διάστημα ανήκει η τιμή της rand στους πίνακες probability1 και probability2. Ο πρώτος αναφέρεται στον χρόνο που

μεσολαβεί μέχρι την άφιξη του επόμενου πακέτου (interarrival time) και ο δεύτερος στο μέγεθος πακέτου (packet size). Όταν πλέον βρεθούν τα διαστήματα στα οποία αντιστοιχούν, υπολογίζεται ο νέος χρόνος που μεσολαβεί μέχρι την άφιξη του επόμενου πακέτου (interarrival time) και το μέγεθος πακέτου (packet size). Κατά αυτό τον τρόπο προκύπτει ο νέος πίνακας P με τον καινούριο φόρτο κίνησης.

#### **4.5 Παρουσίαση Γραφημάτων Προσομοίωσης**

Στη προηγούμενη ενότητα παρουσιάσαμε το σενάριο 1 με παραγωγή κίνησης μέσω της κατανομής Poisson. Σε αυτό το σημείο θα μελετήσουμε σενάρια με φόρτο κίνησης WiMAX, ο οποίος προέρχεται είτε από την καταγραφή πακέτων ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (Live Streaming είτε από την άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων (Skype). Επιπρόσθετα σε αυτά τα σενάρια θα μελετήσουμε παραμέτρους που επηρεάζουν την ακρίβεια των προβλέψεων καθώς και τους χρόνους εκτέλεσης. Αναλυτικότερα σε πρώτη φάση θα μελετήσουμε το σενάριο 2 παρακολουθώντας την κίνηση (traffic) που προέρχεται από τη μετάδοση πληροφοριών σε ζωντανό χρόνο (Live Streaming).

##### **4.5.1 Δεύτερο Σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις και αποτελέσματα**

Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης η παραγωγή κίνησης στο δίκτυο προέρχεται από ένα αρχείο txt στο οποίο έχει καταγραφεί η κίνηση από ένα δίκτυο WiMAX κατά τη χρήση μετάδοσης πληροφοριών σε ζωντανό χρόνο (live streaming). Οι μετρήσεις που προκύπτουν από το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνουν : το μέσο ρυθμό σφάλματος για τον χρόνο άφιξης πακέτου , το μέσο ρυθμό σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων. Οι ανωτέρω μετρήσεις εξάγονται με την χρήση γραμμικής παρεκτροπής, κυβικής παρεκτροπής, αυτομάτων εκμάθησης και κρυφών αλυσίδων Μαρκόβ.

Συνολικά στο δεύτερο σενάριο έγιναν επτά μετρήσεις από τις οποίες προέκυψαν τα αντίστοιχα γραφήματα:

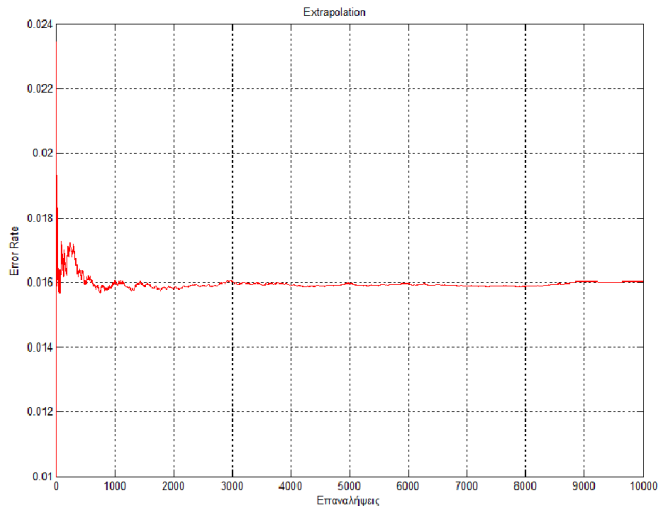
**A) Μέσος ρυθμός σφάλματος για άφιξη πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου παρεκτροπής (Σενάριο 2):**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Γραμμική Συνάρτηση (Linear Extrapolation).
- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση το ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 10.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.

Ο υπολογισμός του ρυθμού σφάλματος μοντέλου (error rate) δίνεται από τη σχέση:

Σφάλμα μοντέλου = απόλυτη τιμή (πραγματικός χρόνος – εκτιμώμενος χρόνος) / εύρος τιμών των διαστημάτων ενώ ο Μέσος Ρυθμός Σφάλμα (mean error rate) προκύπτει από το άθροισμα των σφαλμάτων του μοντέλου διά των επαναλήψεων.



**Γράφημα 4.12 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με γραμμική συνάρτηση (Σενάριο2)**

Από το γράφημα 4.12 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.024 και μετά από διάστημα 1000 επαναλήψεων μειώνεται και σταθεροποιείται στο 0.016. Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει μελετηθεί, ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία.

***B) Μέσος ρυθμός σφάλματος για άφιξη πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Παρεκτροπής με κυβική συνάρτηση (Σενάριο 2):***

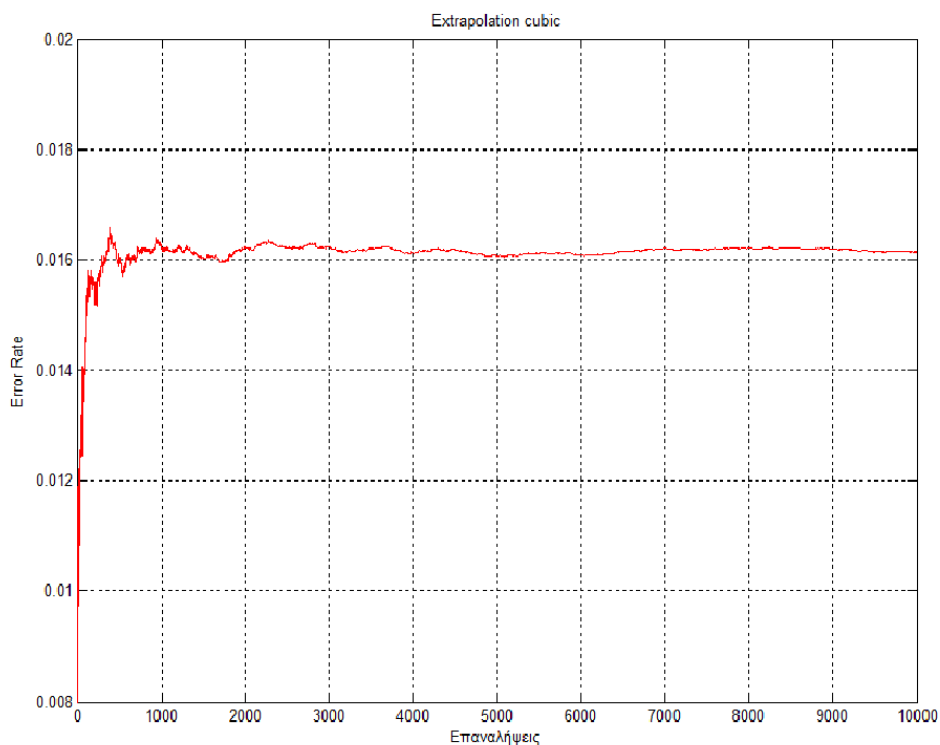
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Κυβική Συνάρτηση (Cubic Extrapolation).
- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση του ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 10.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.



- Ο υπολογισμός του ρυθμού σφάλματος μοντέλου (error rate) δίνεται από τη σχέση:

Σφάλμα μοντέλου = απόλυτη τιμή (πραγματικός χρόνος – εκτιμώμενος χρόνος) / εύρος τιμών των διαστημάτων ενώ ο Μέσος Ρυθμός Σφάλμα (mean error rate) προκύπτει από το άθροισμα των σφαλμάτων του μοντέλου διά των επαναλήψεων.



**Γράφημα 4.13 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με κυβική συνάρτηση σφήνα (Σενάριο2)**

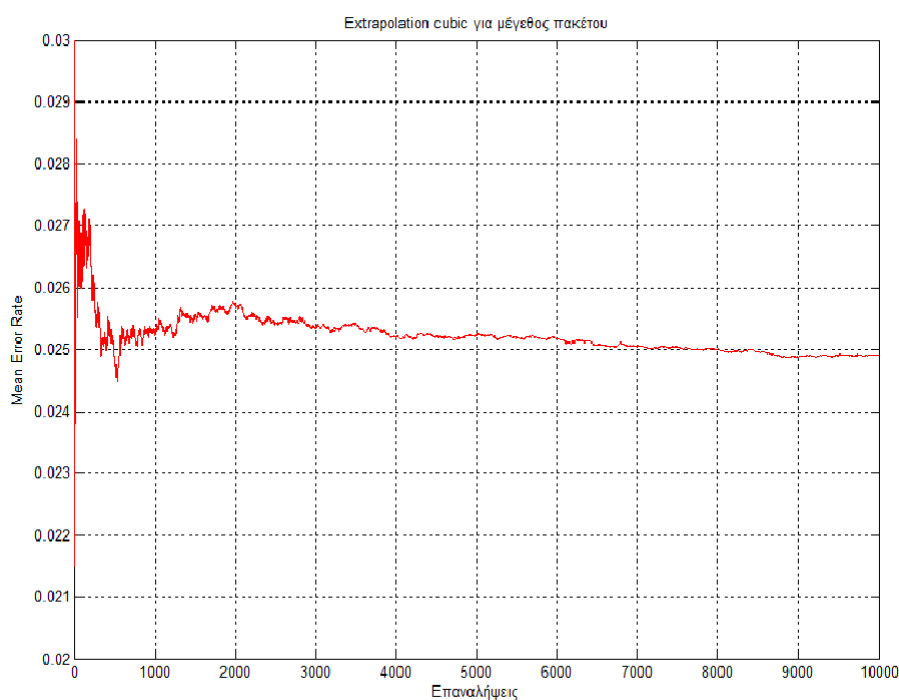
Από το γράφημα 4.13 βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή που λαμβάνει ο μέσος ρυθμός σφάλματος είναι το 0,016 σε αντίθεση με την χρησιμοποίηση της γραμμικής συνάρτησης όπου η μέγιστη τιμή φτάνει το 0,024 και σταθεροποιείται σε αυτή την τιμή σε λιγότερες επαναλήψεις. Όπως έχουμε μελετήσει αυτό ήταν κάτι αναμενόμενο αφού η χρήση κυβικών σφήνας προσφέρει μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη. Ωστόσο η χρήση της κυβικής συνάρτησης κάνει τον χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου σαφώς

μεγαλύτερο σε σχέση με τον χρόνο της γραμμικής, αφού έχουμε χρήση πολυωνύμων υψηλού επιπέδου.

**Γ) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Παρεκτροπής με κυβική συνάρτηση (Σενάριο 2):**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Κυβική Συνάρτηση (Cubic Extrapolation).
- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση του ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 10.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.

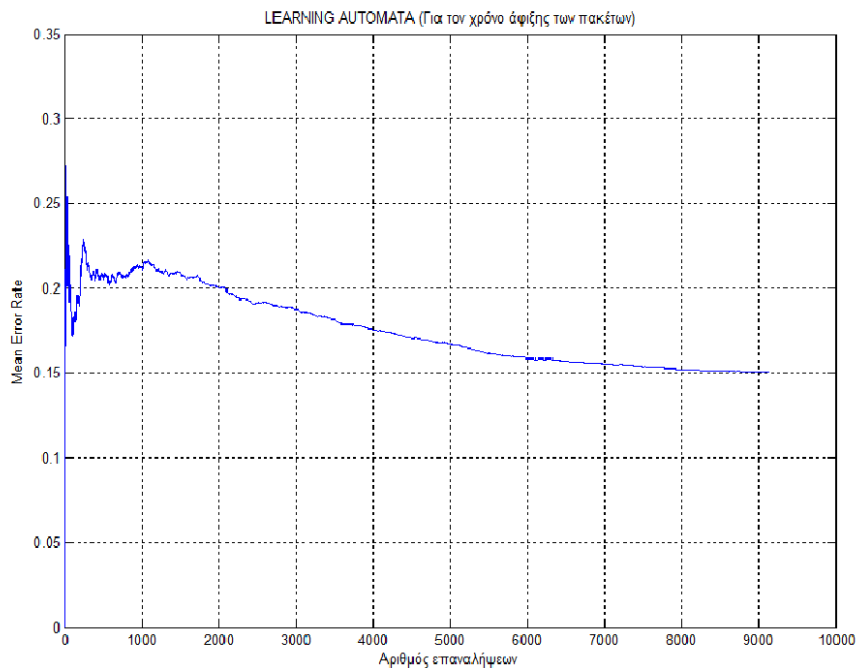


**Γράφημα 4.14 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για μέγεθος πακέτου (Σενάριο2)**

Από το γράφημα 4.12 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.03 και μετά από διάστημα 5000 επαναλήψεων μειώνεται και σταθεροποιείται στο 0.025. Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει μελετηθεί ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία.

***Δ) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το χρόνο άφιξης των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Αυτόματο Εκμάθησης (Σενάριο 2):***

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση του ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Η μεταβλητή Learning Rate  $L$  είναι ίση με 0,01.
- Η μεταβλητή ασφάλειας  $a$  είναι ίση με 0, 0001.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.



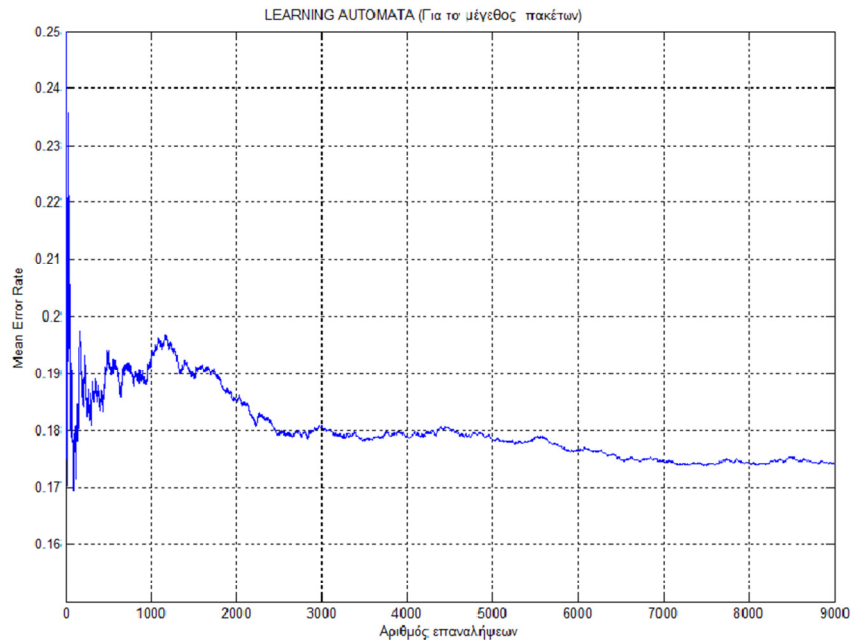
**Γράφημα 4.15 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο2)**

Από το γράφημα 4.15 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.27 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και σταθεροποιείται στο 0.15 . Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει μελετηθεί ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία με το πέρασμα των επαναλήψεων.

***E) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 2):***

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση του ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Η μεταβλητή Learning Rate  $L$  είναι ίση με 0,01.
- Η μεταβλητή ασφάλειας  $\alpha$  είναι ίση με 0,0001.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.

- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.



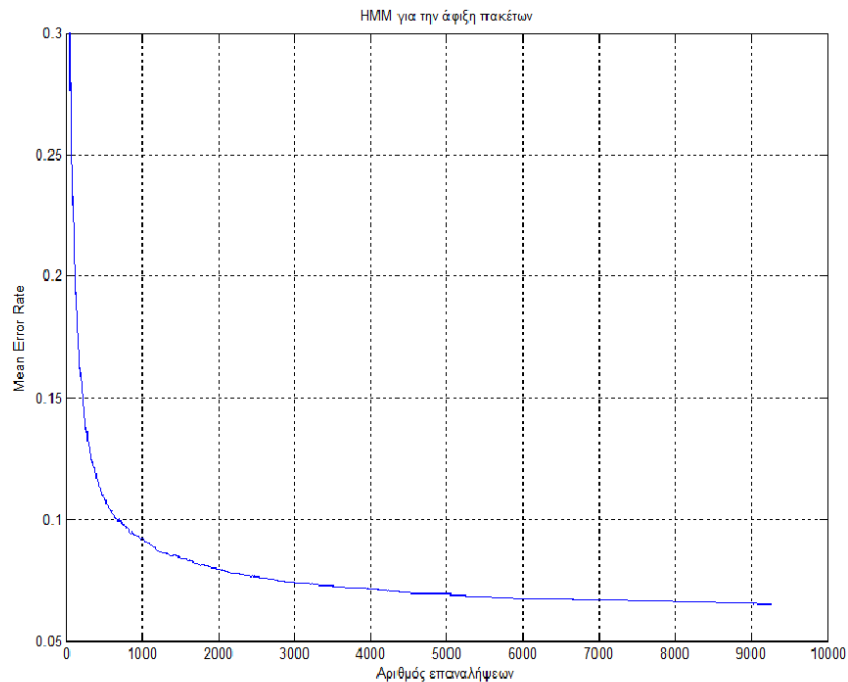
**Γράφημα 4.16 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με Αυτόματα Εμάθησης (Σενάριο2)**

Από το γράφημα 4.16 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει για το μέγεθος πακέτου φτάνει στο 0.24 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και σταθεροποιείται στο 0.18. Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία με το πέρασμα των επαναλήψεων.

**ΣΤ) Μέσος ρυθμός σφάλματος για την άφιξη των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ (Σενάριο 2):**

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κατά τη χρήση του ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.

- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .



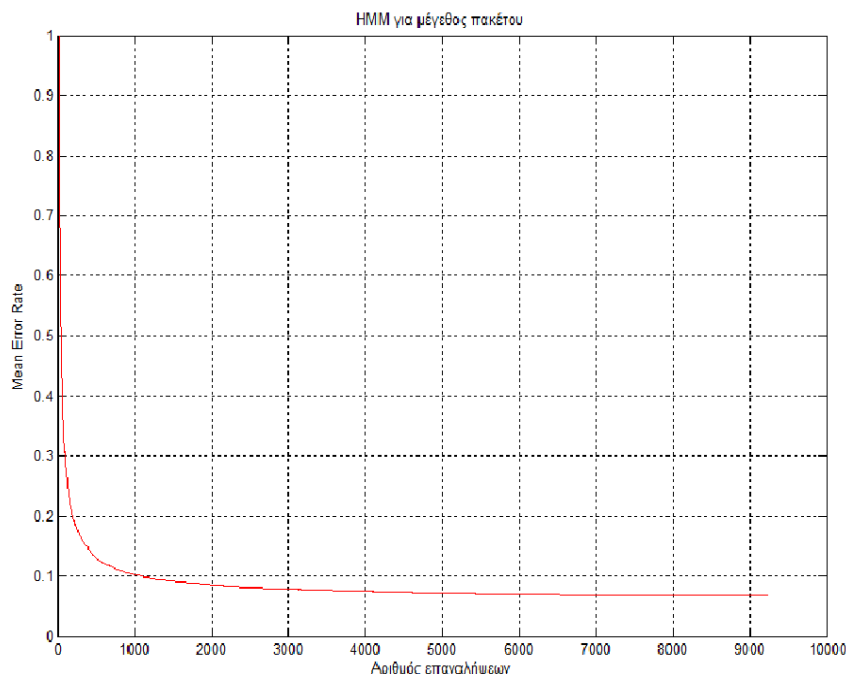
**Γράφημα 4.17 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με KAM(Σενάριο2)**

Από το γράφημα 4.17 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.3 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και σταθεροποιείται στο 0.055. Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία με το πέρασμα των επαναλήψεων. Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος HMM επιτυγχάνει και σταθεροποιείται στο μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος από τους υπόλοιπους αλγορίθμους.

**Z) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ (Σενάριο 2):**

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση του ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.

Στο γράφημα 4.18 παρακάτω βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος πακέτου φτάνει στο 1 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και σταθεροποιείται στο 0.07. Συγκεκριμένα η σταθεροποίηση στην κατώτερη τιμή όπως φαίνεται και από το γράφημα επιτυγχάνεται με το πέρασ 2500 επαναλήψεων. Πάλι παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος KAM επιτυγχάνει και σταθεροποιείται στο μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος από τους υπόλοιπους αλγορίθμους.



**Γράφημα 4.18 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με KAM (Σενάριο2)**

#### 4.5.2 Τρίτο Σενάριο προσομοίωσης – Μετρήσεις και αποτελέσματα

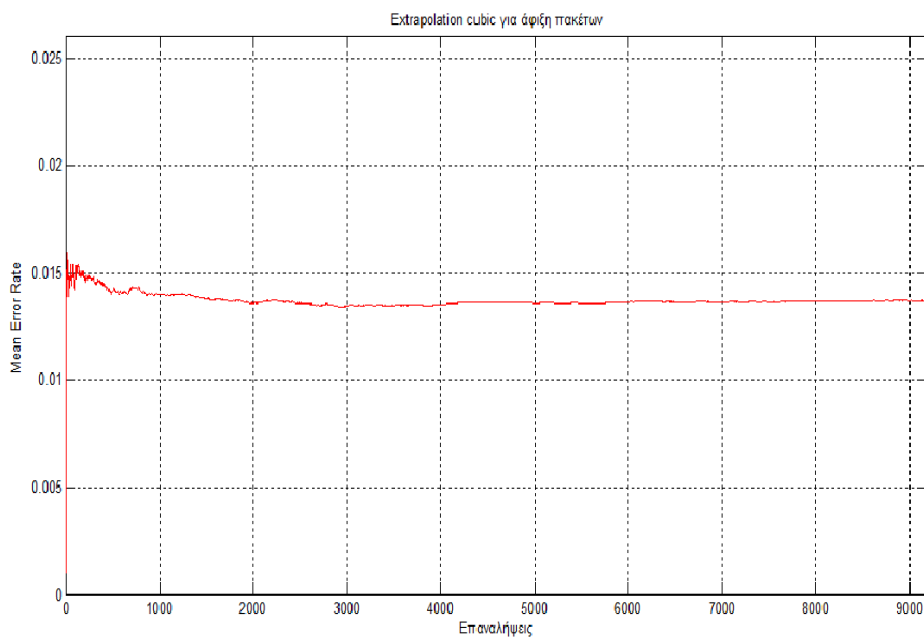
Σε αυτό το σενάριο προσομοίωσης η παραγωγή κίνησης στο δίκτυο προέρχεται από αρχείο κειμένου στο οποίο έχει καταγραφεί η κίνηση από ένα δίκτυο WiMAX κατά τη χρήση ενός προγράμματος για άμεση ανταλλαγή μηνυμάτων. Οι μετρήσεις που προκύπτουν από το συγκεκριμένο σενάριο περιλαμβάνουν: το μέσο ρυθμό σφάλματος για τον χρόνο άφιξης πακέτου , το μέσο ρυθμό σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων. Οι ανωτέρω μετρήσεις εξάγονται με την χρήση κυβικής παρεκτροπής, αυτομάτων εκμάθησης, Κρυφών αλυσίδων Μαρκόβ. Συνολικά στο δεύτερο σενάριο έγιναν έξι μετρήσεις και προέκυψαν τα αντίστοιχα γραφήματα από αυτές. Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

##### ***A) Μέσος ρυθμός σφάλματος για άφιξη πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Παρεκτροπής με κυβική συνάρτηση (Σενάριο 3):***

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση προγράμματος άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων και είναι ίσος με 7124.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9200.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.





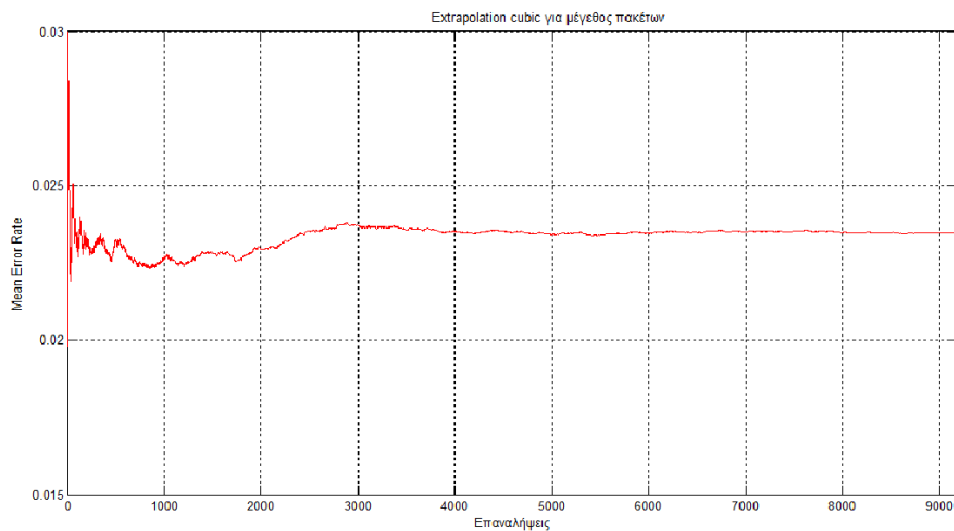
**Γράφημα 4.19 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με κυβική Παρεκτροπή (Σενάριο 3)**

Από το γράφημα 4.19 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.015 και μετά από διάστημα 1000 επαναλήψεων μειώνεται και σταθεροποιείται στο 0.013. Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμός μας επιτυγχάνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του προηγούμενου σεναρίου. Αυτό συμβαίνει γιατί για την συνομιλία μέσω άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων χρησιμοποιήθηκαν πακέτα πιο σταθερού μεγέθους χωρίς να υπάρχουν μεγάλες αυξομειώσεις τόσο στον χρόνο άφιξης όσο και στο μέγεθος των πακέτων. Επομένως αναμένουμε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα και για το μέγεθος των πακέτων.

***B) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου κυβικής Παρεκτροπής (Σενάριο 3):***

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση προγράμματος άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων και είναι ίσος με 7124.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9200.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.



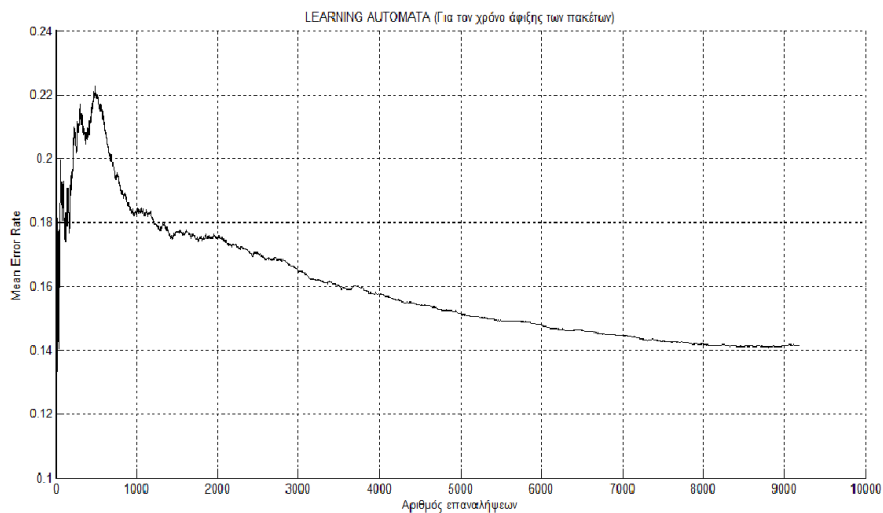
**Γράφημα 4.20 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με κυβική Παρεκτροπή (Σενάριο 3)**

Από το γράφημα 4.20 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.03 και μετά από διάστημα 3000 επαναλήψεων μειώνεται και σταθεροποιείται στο 0.023 και σε αυτή την περίπτωση έχουμε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα όπως αναμέναμε σε σχέση με το σενάριο 2.

**Γ) Μέσος ρυθμός σφάλματος για άφιξη πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 3):**

- Η μεταβλητή Learning Rate  $L$  είναι ίση με 0,01.
- Η μεταβλητή ασφάλειας  $a$  είναι ίση με 0,0001.

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση προγράμματος άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων και είναι ίσος με 7124.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9200.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .

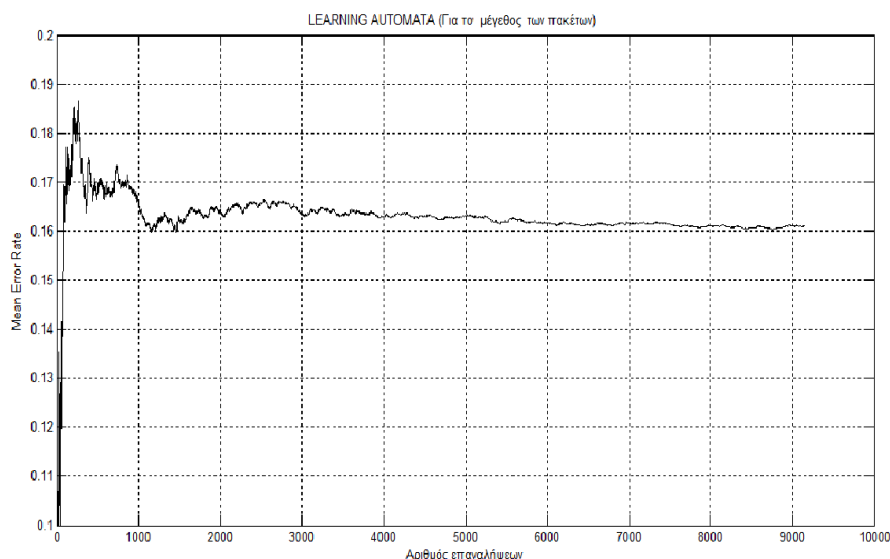


**Γράφημα 4.21 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 3)**

Από το γράφημα 4.21 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος αποκτά τη μέγιστη τιμή του στο 0.22 και με το πέρας των επαναλήψεων συνεχώς μειώνεται και σταθεροποιείται μετά από 7000 επαναλήψεις στο 0.14. Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο που έχει μελετηθεί ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία συγκλίνοντας στο μέσο ρυθμό σφάλματος 0,14 και μάλιστα σε αυτό το σενάριο επιτυγχάνουμε και πάλι ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα

**Δ) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 3):**

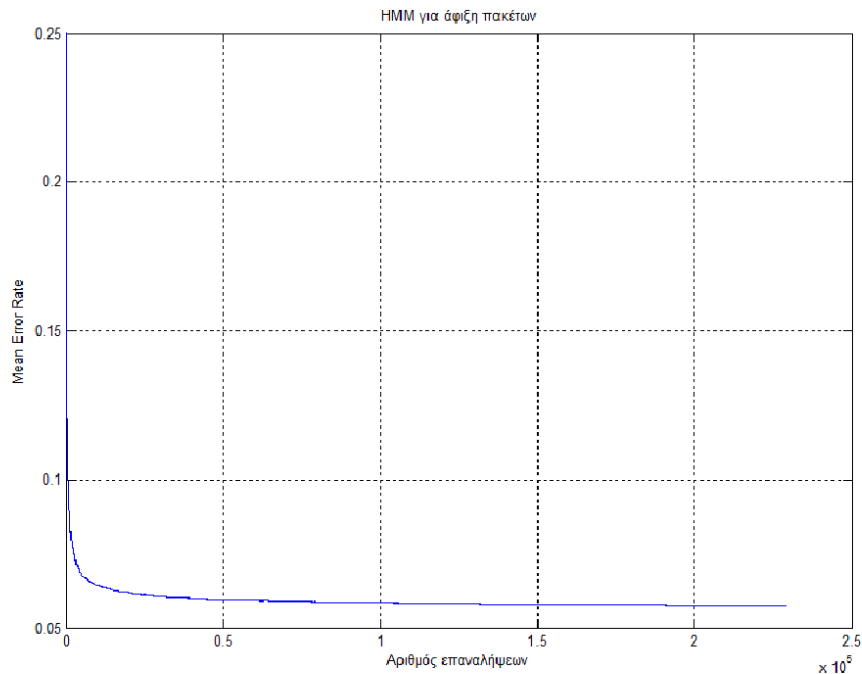
- Η μεταβλητή Learning Rate  $L$  είναι ίση με 0,01
- Η μεταβλητή ασφάλειας  $a$  είναι ίση με 0,0001.
- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση προγράμματος άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων και είναι ίσος με 7124.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9200.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τα μεγέθη των πακέτων είναι 1 byte.



**Γράφημα 4.22 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 3)**

Από το γράφημα 4.22 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει για το μέγεθος πακέτου φτάνει στο 0.18 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και σταθεροποιείται στο 0.16 . Όπως αναμέναμε και από το θεωρητικό υπόβαθρο ο μέσος ρυθμός σφάλματος θα έπρεπε να είχε και έχει μια πτωτική πορεία με το πέρασμα των επαναλήψεων.

**Ε) Μέσος ρυθμός σφάλματος για άφιξη των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ (Σενάριο 3):**



**Γράφημα 4.23 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με KAM (Σενάριο 3)**

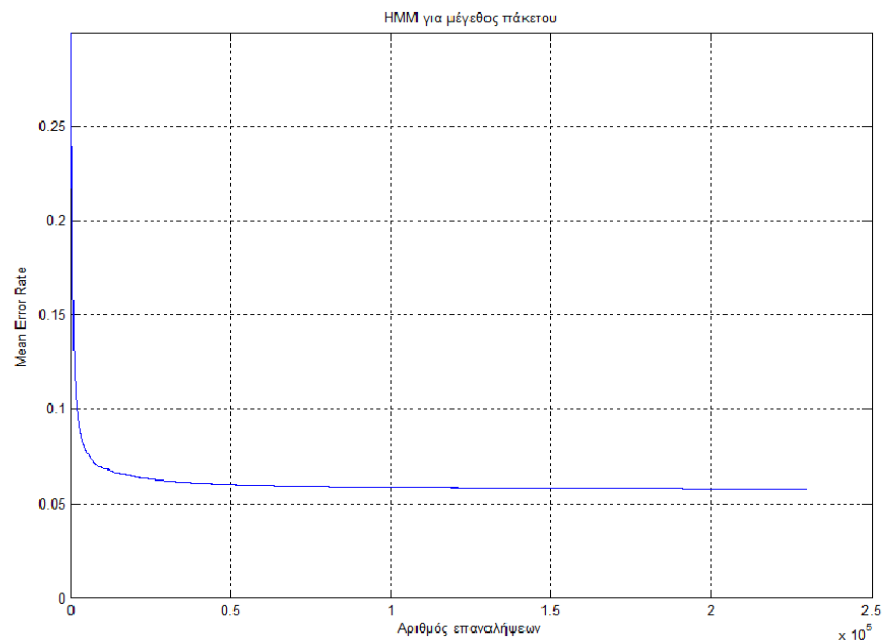
- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση προγράμματος άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων και είναι ίσος με 7124.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9200.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.

Από το γράφημα 4.23 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.25 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και σταθεροποιείται στο 0.05. Σε αυτό το σημείο παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος

ΚΑΜ επιτυγχάνει και σταθεροποιείται στο μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος από τους υπόλοιπους αλγορίθμους.

**ΣΤ) Μέσος ρυθμός σφάλματος για το μέγεθος των πακέτων με την χρήση του αλγορίθμου Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ (Σενάριο 3):**

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση προγράμματος άμεσης ανταλλαγής μηνυμάτων και είναι ίσος με 7124.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 9200.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.



**Γράφημα 4.24 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με ΚΑΜ (Σενάριο 3)**

Από το γράφημα 4.24 βλέπουμε ότι ο μέσος ρυθμός σφάλματος φτάνει στο 0.23 και σταδιακά μειώνεται με το πέρασμα των επαναλήψεων και

σταθεροποιείται στο 0.05 το οποίο αποτελεί και τον μικρότερο μέσο όρο σφάλματος που επιτυγχάνει ο αλγόριθμος για όλες τις προσομοιώσεις που έχουμε πραγματοποιήσει μέχρι τώρα.

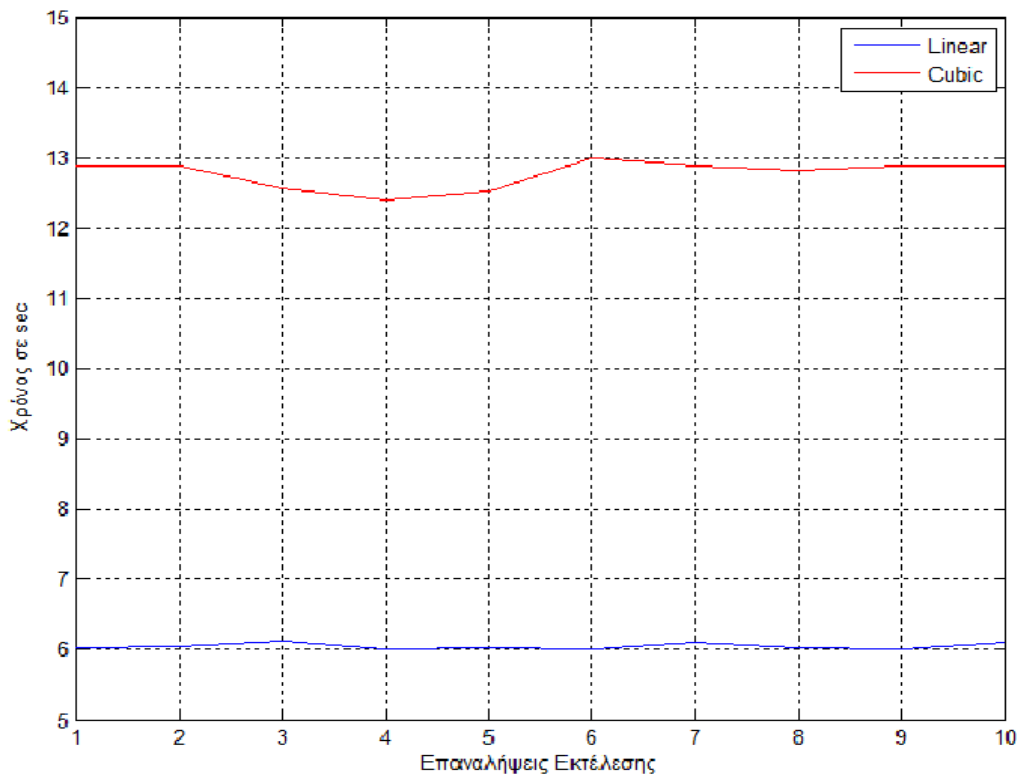
#### 4.5.3 Συγκριτικά Γραφήματα

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τις μεταβλητές που επηρεάζουν την ακρίβεια πρόβλεψης των αλγορίθμων μας καθώς και τους χρόνους εκτέλεσης τους. Στο σενάριο 2 παρατηρήσαμε πως η ακρίβεια των προβλέψεων του αλγορίθμου ήταν ελαφρώς καλύτερη όταν χρησιμοποιήσαμε την κυβική συνάρτηση έναντι της γραμμικής. Για την επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας όχι μόνο την ακρίβεια στην πρόβλεψη αλλά και το χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί αυτή. Για το λόγο αυτό έχει ενδιαφέρον να μελετήσουμε τους χρόνους προσομοίωσης που επέτυχαν οι δυο συναρτήσεις για τα ίδια δεδομένα.

##### ***A) Σύγκριση χρόνου προσομοίωσης του αλγορίθμου παρεκτροπής με την χρήση γραμμικής και κυβικής συνάρτησης:***

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση το ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 6237.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 10.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.
- Χρήση των γραμμικών και κυβικών συναρτήσεων.
- Εκτέλεση προσομοιώσεων και για τις δύο συναρτήσεις: 10.



**Γράφημα 4.25 Συγκριτικό γράφημα χρόνων προσομοίωσης της γραμμικής και κυβικής συνάρτησης**

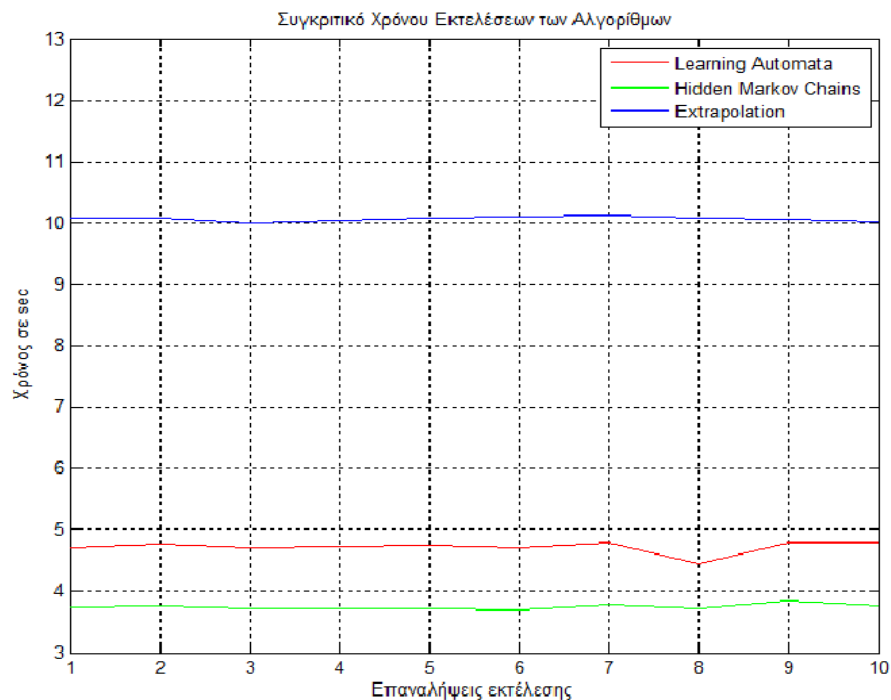
Όπως βλέπουμε και από το γράφημα οι χρόνοι προσομοίωσης για τις δύο συναρτήσεις διαφέρουν πολύ. Συγκεκριμένα ο χρόνος εκτέλεσης για την γραμμική κυμαίνεται στα 6 second και για την κυβική στα 13 second. Αυτό συμβαίνει γιατί η κυβική συνάρτηση προκειμένου να επιτύχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη χωρίζει τα διαστήματα σε μια συλλογή υποδιαστημάτων και κατασκευάζει ένα διαφορετικό πολυώνυμο για να προσεγγίσει κάθε υποδιάστημα. Αυτό βέβαια όπως παρατηρούμε και από το γράφημα έχει ως συνέπεια να διπλασιάζεται ο χρόνος εκτέλεσης του αλγορίθμου. Σε αυτό το σημείο θα έχει ενδιαφέρον να μελετήσουμε και να συγκρίνουμε τους χρόνους εκτέλεσης για τους τρεις αλγορίθμους.

***B) Σύγκριση χρόνου προσομοίωσης των αλγορίθμων Παρεκτροπής (γραμμική), Αυτόματα Εκμάθησης και Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ:***



Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Ο αρχικός αριθμός πακέτων προέρχεται από φόρτο κίνησης κατά τη χρήση το ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming) και είναι ίσος με 7126.
- Χρήση της αθροιστικής πιθανότητας για την παραγωγή πακέτων.
- Ο τελικός και παραγόμενος αριθμός πακέτων για χρονική διάρκεια μιας ώρας είναι 10.000.
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε τους χρόνους άφιξης πακέτων είναι 0.02 .
- Το διάστημα που κατηγοριοποιούμε το μέγεθος πακέτου είναι 1.
- Εκτέλεση προσομοιώσεων και για τις δύο συναρτήσεις: 10.



**Γράφημα 4.26 Συγκριτικό γράφημα χρόνων προσομοίωσης των 3 αλγορίθμων**

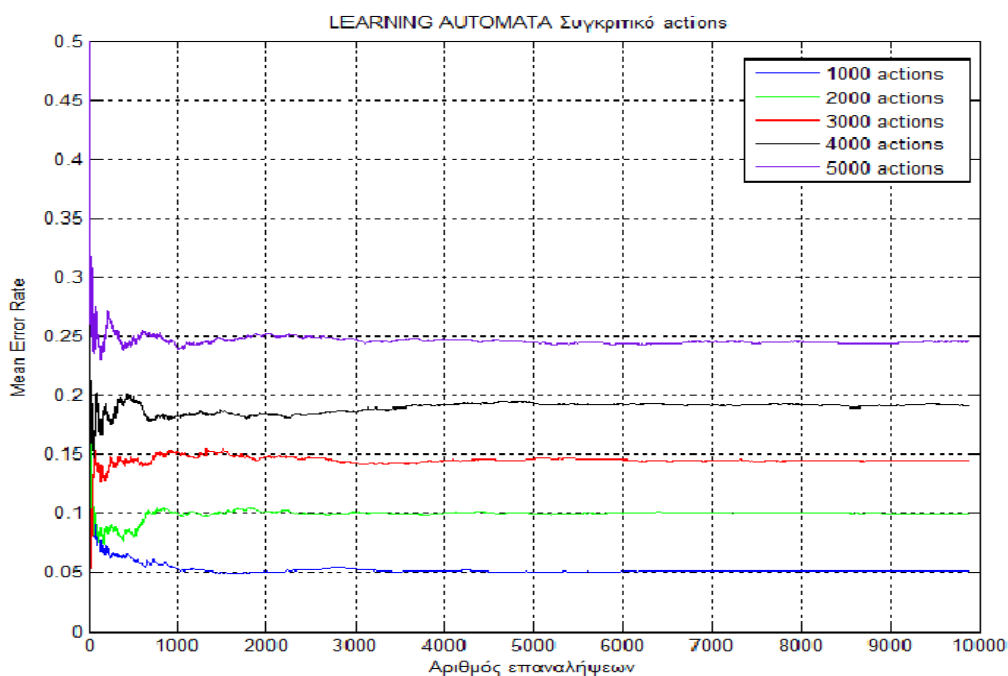
Από το γράφημα 4.26 παρατηρούμε ότι την καλύτερη επίδοση από πλευράς χρόνου την επιτυγχάνει ο αλγόριθμος Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ όπου ο χρόνος εκτέλεσης κυμαίνεται στα 3,7 second ακολουθεί ο αλγόριθμος αυτόματα εκμάθησης με 4,7 second και τελευταίος ο αλγόριθμος παρεκτροπής με 10 second. Αν ανατρέξουμε στα γραφήματα των

προσομοιώσεων θα διαπιστώσουμε ότι ο αλγόριθμος KAM είχε και την μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις των πακέτων και των χρόνων άφιξης , ακουλούθως ο αλγόριθμος Αυτόματα Εκμάθησης και τελευταίος ο αλγόριθμος παρεκτροπής.

### Γ) Απόκριση του Αλγορίθμου Αυτόματο Εκμάθησης για διαφορετικό αριθμών δράσεων (actions):

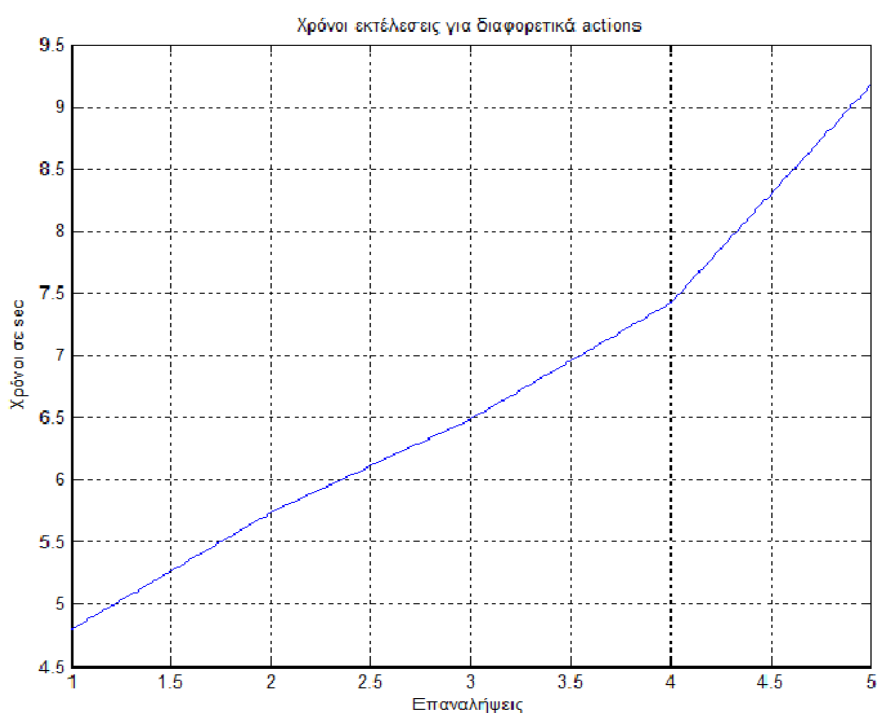
Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Αριθμός actions ίσος με 1000,2000,3000,4000,5000.
- Μεταβλητή Learning Rate (L) ίση με 0,01.
- Μεταβλητή ασφάλειας (a) ίση με 0,0001.



Γράφημα 4.27 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού σφάλματος του Αυτόματου Εκμάθησης για διαφορετικό αριθμό δράσεων.

Από το γράφημα 4.27 παρατηρούμε με την αύξηση του αριθμού των δράσεων ο αλγόριθμος πραγματοποιεί όλο και περισσότερο χειρότερες επιδόσεις. Πράγματι, αυτό συμβαίνει γιατί όταν αυξάνεται ο αριθμός των δράσεων (actions), όπως μελετήσαμε και στο θεωρητικό υπόβαθρο του αλγορίθμου, η συμπεριφορά του αυτομάτου θα είναι αργή και θα απαιτείται όλο και μεγαλύτερη χωρητικότητα στην μνήμη υπολογισμού. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να παρακαμφθούν χρησιμοποιώντας μια ιεραρχημένη δομή από αυτόματα. Στο παρακάτω διάγραμμα βλέπουμε και την επίδραση στους χρόνους εκτέλεσης του αλγορίθμου.



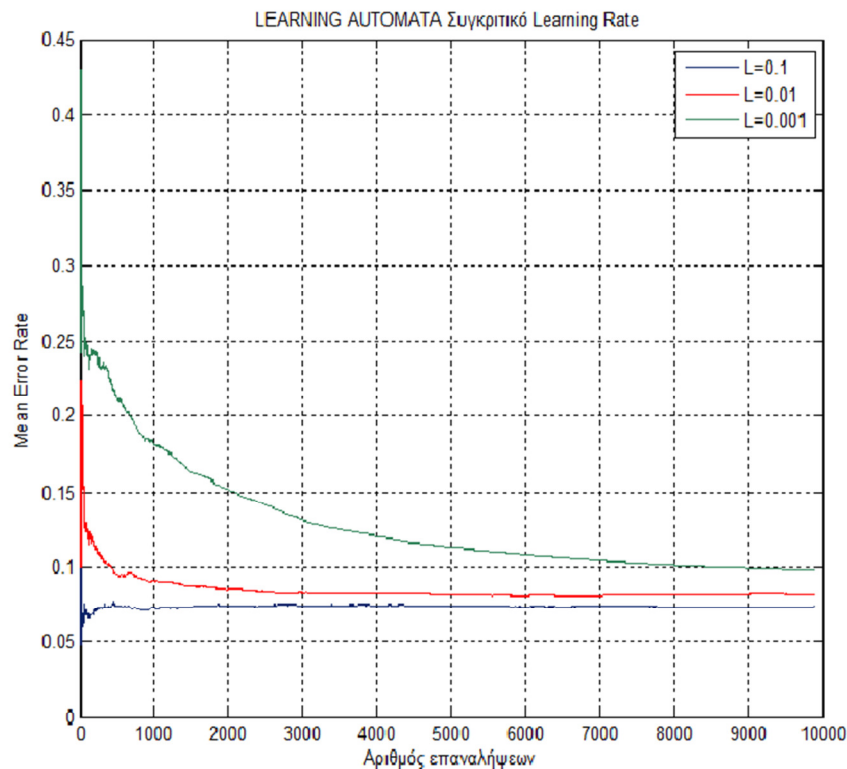
**Γράφημα 4.28 Συγκριτικό γράφημα χρόνων Αυτόματου Εκμάθησης για διαφορετικό αριθμό δράσεων.**

Όπως αναμέναμε παρατηρούμε στο γράφημα 4.28 την ανοδική πορεία του χρόνου εκτέλεσης της προσομοίωσης για τον αυξανόμενο αριθμό των δράσεων (actions).

#### **Δ) Απόκριση του Αλγορίθμου Αυτόματου Εκμάθησης για διαφορετικό Ρυθμό εκμάθησης :**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του  $\lambda$  σταθερή και ίση με 50.
- Αριθμός δράσεων ίσος με 100.
- Μεταβλητή ασφάλειας ( $\alpha$ ) ίση με 0,0001.



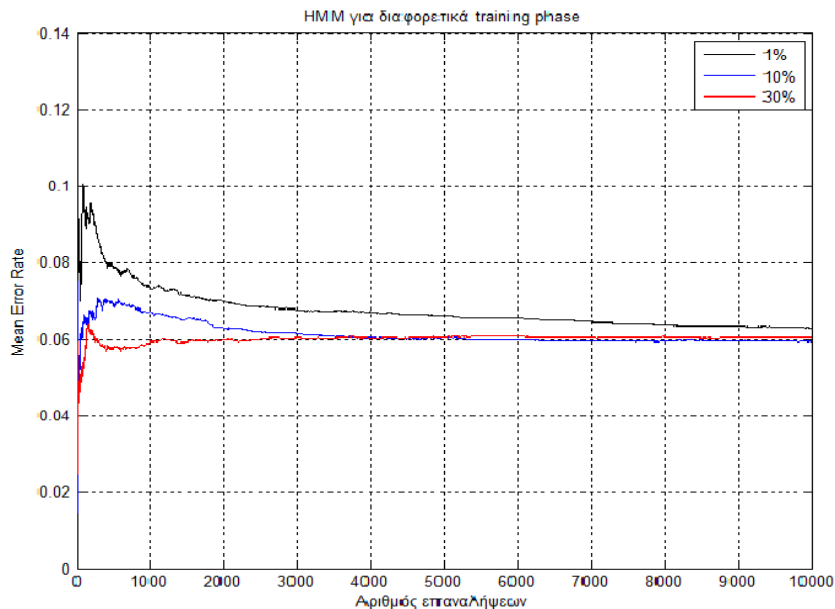
**Γράφημα 4.29 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης Αυτόματο Εκμάθησης για Ρυθμούς Εκμάθησης.**

Η μεταβλητή  $L$  είναι ο πολλαπλασιαστής της αντίστοιχης τιμής του αθροίσματος των πιθανοτήτων όταν η εκτιμώμενη τιμή του αυτόματου εκμάθησης είναι διαφορετική από την πραγματική. Επειδή το γινόμενο του  $L$  με την τιμή του αθροίσματος των πιθανοτήτων προστίθεται στην αντίστοιχη τιμή του πίνακα πιθανοτήτων όταν έχουμε σύγκλιση εκτιμώμενης και πραγματικής τιμής και αφαιρείται από αυτόν όταν αυτές διαφέρουν αυτό σημαίνει ότι όταν το  $L$  είναι ίσο με 0.1 το περιβάλλον του Αυτόματα εκμάθησης προσαρμόζεται πιο γρήγορα στις πραγματικές συνθήκες του δικτύου, λιγότερο γρήγορα όταν το  $L$  είναι ίσο με 0.01 και πολύ πιο αργά όταν το  $L$  είναι ίσο με 0.001.

**Ε) Απόκριση του Αλγορίθμου Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ για διαφορετικό ποσοστό εκπαίδευσης του συνολικού αρχείο δεδομένων.**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Ποσοστό εκπαίδευσης του αλγορίθμου 1%, 10% ,30%.



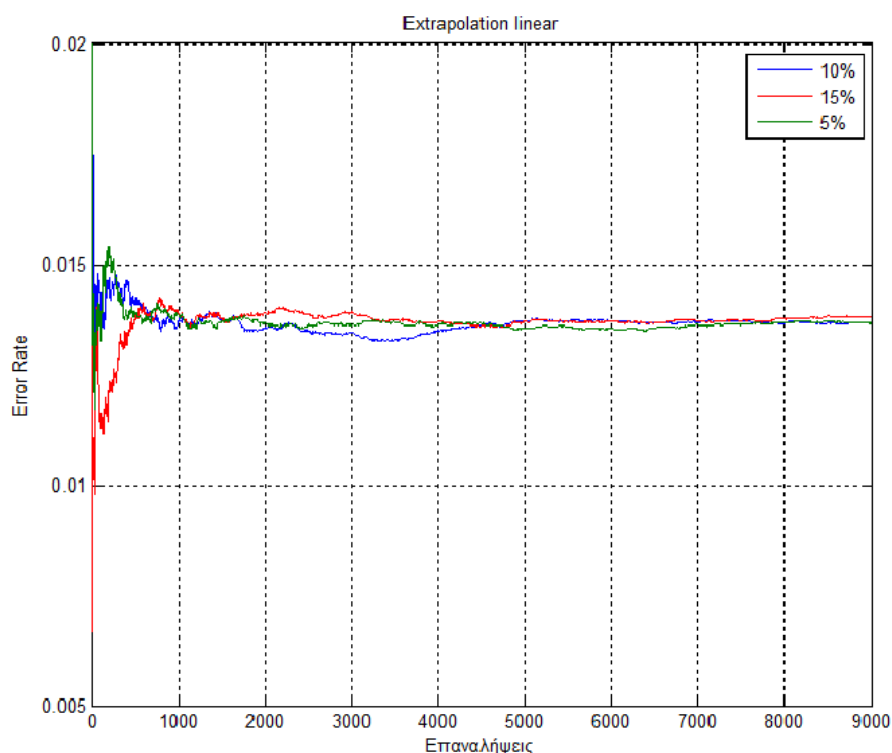
**Γράφημα 4.30 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης KAM για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης.**

Όπως βλέπουμε από το γράφημα 4.30 όταν εκπαιδύουμε τον αλγόριθμο KAM για το 1 % στις αρχικές προβλέψεις φτάνει σε μεγαλύτερα ποσοστά σφάλματος από ό,τι όταν τον εκπαιδύουμε για 10% και 30%. Παρατηρούμε όμως μετά το πέρας των επαναλήψεων και οι τρεις συγκλίνουν στο ποσοστό μέσου σφάλματος, όπως αναμέναμε αφού ο πίνακας ενημέρωσης ανανεώνεται και η εκπαίδευση του αλγορίθμου KAM συνεχίζεται ταυτόχρονα με το πέρας των επαναλήψεων.

**ΣΤ) Απόκριση του Αλγορίθμου Παρεκτροπής για διαφορετικό ποσοστό εκπαίδευσης του συνολικού αρχείο δεδομένων.**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Ποσοστό εκπαίδευσης του αλγορίθμου 5%, 10% ,15%.



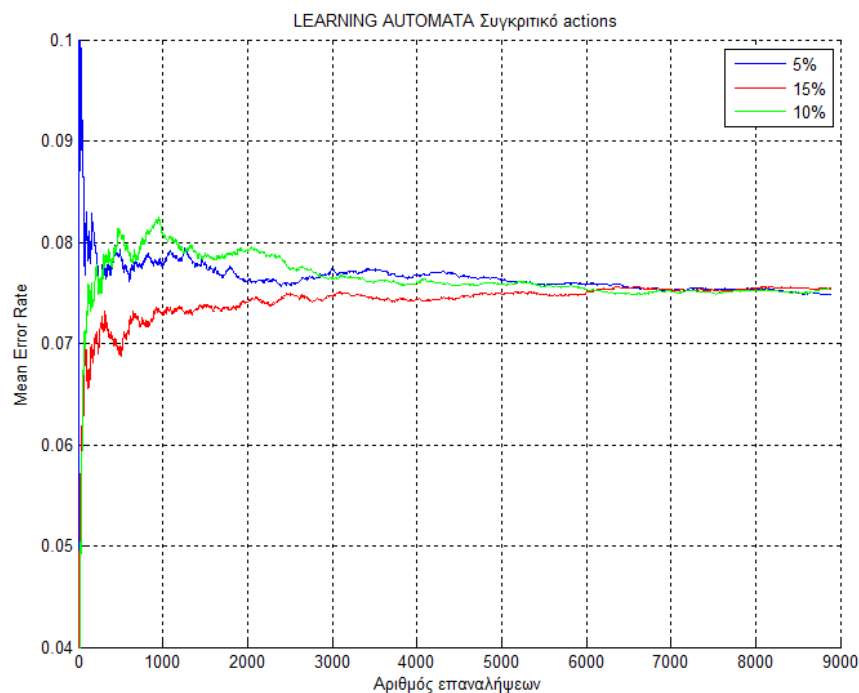
**Γράφημα 4.31 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης Παρεκτροπής για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης.**

Όπως βλέπουμε από το γράφημα 4.31 όταν εκπαιδύουμε τον αλγόριθμο Παρεκτροπή για το 5% στις αρχικές προβλέψεις φτάνει σε μεγαλύτερα ποσοστά σφάλματος από ό,τι όταν τον εκπαιδύουμε για 10% και 15%. Όμως μετά το πέρας των επαναλήψεων παρατηρούμε πως και για αυτόν τον αλγόριθμο όπως αναμέναμε υπάρχει σύγκλιση των προβλέψεων μετά το πέρας 1000 επαναλήψεων αφού το κομμάτι της εκπαίδευσης συνεχίζεται παράλληλα με το κομμάτι της πρόβλεψης.

**Z) Απόκριση του Αλγορίθμου Αυτόματα Εκμάθησης για διαφορετικό ποσοστό εκπαίδευσης του συνολικού αρχείου δεδομένων.**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

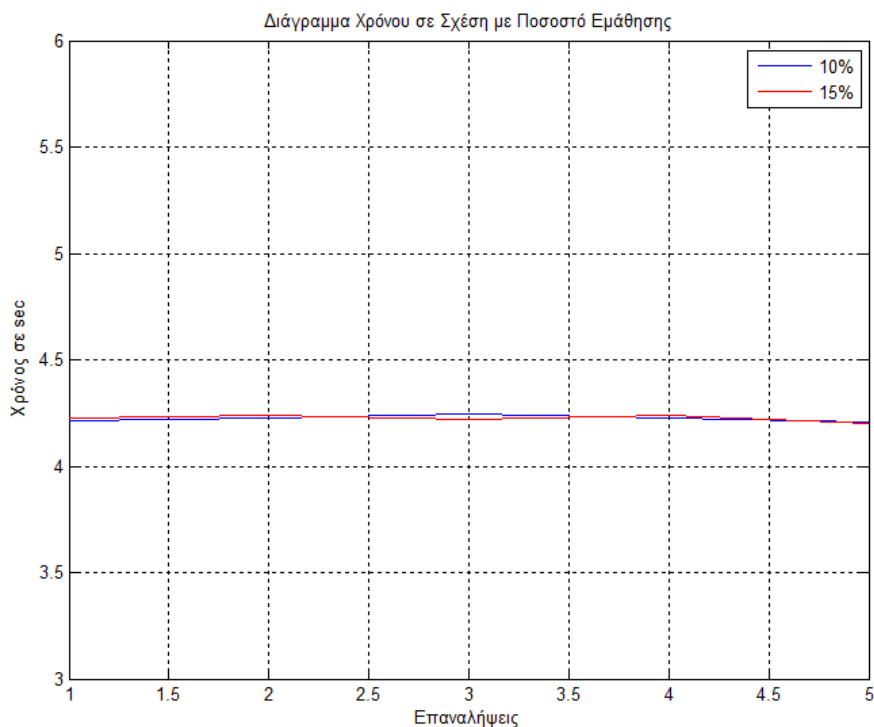
- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 10000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του λ σταθερή και ίση με 50.
- Ποσοστό εκπαίδευσης του αλγορίθμου 5%, 10% ,15%.



**Γράφημα 4.32 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης του Αυτομάτου για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης.**

Όπως παρατηρούμε από το γράφημα 4.32 την ίδια απόκριση με τους προηγούμενους δυο αλγορίθμους, έχει και αυτός των αυτομάτων. Είναι λογικό, οι αρχικές προβλέψεις να είναι καλύτερες αν ο αλγόριθμος έχει εκπαιδευτεί για ένα μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αρχείου. Από το παρακάτω γράφημα 4.33 για τα ίδια δεδομένα προσομοίωσης, παρατηρούμε πως ο χρόνος προσομοίωσης δεν επηρεάζεται για τα διαφορετικά ποσοστά εκπαίδευσης του αλγορίθμου. Γεγονός αναμενόμενο αφού η πρόβλεψη δεν

αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι με την εκπαίδευση αφού και τα 2 πραγματοποιούνται παράλληλα.



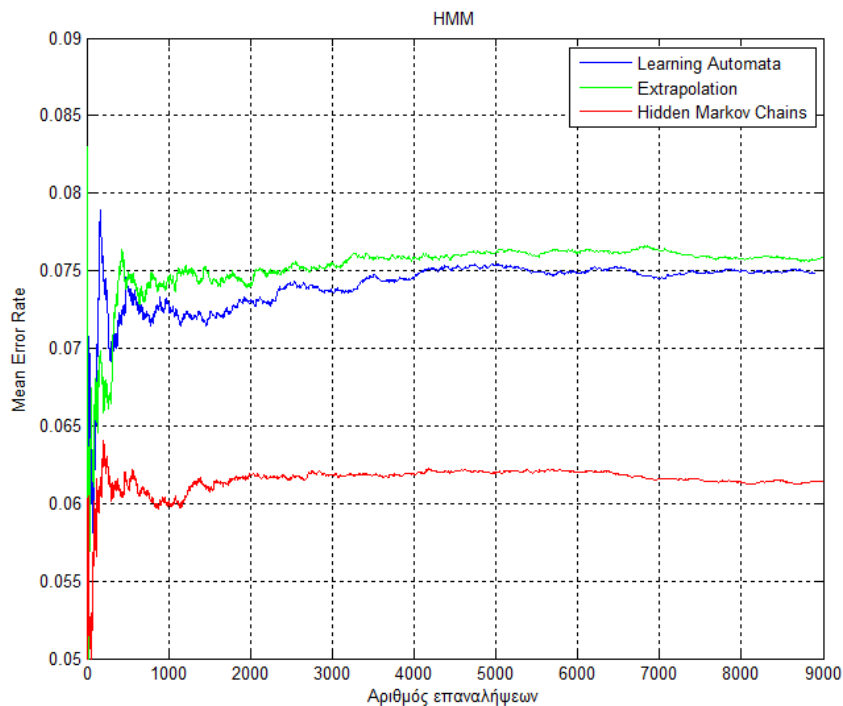
**Γράφημα 4.33 Συγκριτικό γράφημα χρόνου προσομοίωσης του Αυτομάτου για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης.**

**Z) Σύγκριση των τριών αλγορίθμων πρόβλεψης ως προς την ακρίβεια πρόβλεψης για το μέγεθος πακέτου.**

Για την μέτρηση αυτή λήφθηκαν υπόψη τα εξής :

- Αριθμός επαναλήψεων N ίσος με 9000.
- Παραγωγή κίνησης με κατανομή Poisson μέση τιμή του  $\lambda$  σταθερή και ίση με 50.
- Αριθμός actions ίσος με 1000.
- Μεταβλητή Learning Rate (L) ίση με 0,1.
- Μεταβλητή ασφάλειας (a) ίση με 0,0001.
- Ποσοστό εκπαίδευσης και των τριών αλγορίθμων για 10% των αρχικών δεδομένων.





**Γράφημα 4.34 Συγκριτικό γράφημα των 3 αλγορίθμων ως προς την ακρίβεια πρόβλεψης για το μέγεθος πακέτου.**

Όπως απεικονίζεται και στο παραπάνω γράφημα 4.34 παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος κρυφές αλυσίδες Μαρκόβ επιτυγχάνει καλύτερα ποσοστά πρόβλεψης για φόρτο κίνησης, που προήλθε κατά τη χρήση το ζωντανού χρόνου μετάδοσης πληροφοριών (livestreaming), συγκριτικά με τους άλλους δύο. Συγκεκριμένα το ποσοστό του μέσου ρυθμού σφάλματος κυμαίνεται στο 0.062, ακολουθεί ο αλγόριθμος των αυτομάτων, με τον μέσο ρυθμό σφάλματος να συγκλίνει στο 0.074 και τέλος ο αλγόριθμος της παρεκτροπής με 0.076.

---

## 5. Συμπεράσματα

---

Σημαντική παράμετρος της διαχείρισης ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου είναι η δυνατότητα πρόβλεψης της ζήτησης (του δικτύου). Ο αλγόριθμος πρόβλεψης μας επιτρέπει να γνωρίζουμε ποια χρονική στιγμή θα υπάρξει αυξημένος φόρτος κίνησης (traffic) έτσι ώστε με κατάλληλες τεχνικές διαχείρισης δικτύου να είναι εφικτή η διαχείριση της αυξημένης ζήτησης.

Για αυτό το λόγο προβήκαμε στο σχεδιασμό και την αποτίμηση τριών διαφορετικών αλγορίθμων πρόβλεψης, μέσω των οποίων προβλέπουμε το μέγεθος πακέτου (packet size), το χρόνο άφιξης των πακέτων και το διάστημα που μεσολαβεί για να έχουμε την άφιξη του επόμενου πακέτου. Παρατηρήσαμε μέσω των προσομοιώσεων ότι και οι τρεις αλγόριθμοι συμπεριφέρονται εξίσου αποτελεσματικά είτε πρόκειται για δεδομένα (φόρτο κίνησης) που δημιουργήσαμε εμείς μέσω της κατανομής Poisson είτε για πραγματικά δεδομένα που προέκυψαν από την καταγραφή ενός δικτύου WiMAX με την χρήση του εργαλείου Wireshark.

Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ των αλγορίθμων πρόβλεψης παρατηρήσαμε ότι και οι τρεις αλγόριθμοι κινούνται σε πολύ μικρά ποσοστά του μέσου ρυθμού σφάλματος, όμως, υπάρχουν κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς την ακρίβεια της πρόβλεψης και τον χρόνο προσομοίωσης.

Ο αλγόριθμος Παρεκτροπής, που είναι ο πρώτος αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε. Παρατηρείται ότι, εμφανίζει πιο υψηλά ποσοστά στο μέσο ρυθμό σφάλματος σε σχέση με τον αλγόριθμο Αυτόματα Εκμάθησης και Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ είτε χρησιμοποιούμε την γραμμική είτε την κυβική συνάρτηση. Μέσω του θεωρητικού υποβάθρου αναμένουμε ότι η κυβική συνάρτηση μας εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια μέσω των υποδιαστημάτων που χρησιμοποιεί, όταν πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ομαλά δεδομένα (smooth data). Μέσω των προσομοιώσεων διαπιστώσαμε ότι η κυβική συνάρτηση σε σχέση με την γραμμική, είχε όντως καλύτερη ακρίβεια σε

ορισμένες περιπτώσεις αλλά η διαφορά αυτή ήταν οριακή. Εξαιτίας του γεγονότος, ότι η κυβική συνάρτηση χρησιμοποιεί διαφορετικά πολυώνυμα για κάθε υποδιάστημα που παράγει εκτοξεύει τον χρόνο προσομοίωσης του αλγορίθμου παρεκτροπής σχεδόν στο διπλάσιο σε σχέση με την χρήση της γραμμικής.

Ο αλγόριθμος Αυτόματα Εκμάθησης επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από τον αλγόριθμο Παρεκτροπής ωστόσο αυτό μπορεί να συμβεί σταδιακά μετά το πέρας πολλών επαναλήψεων. Όπως είδαμε από τα γραφήματα ο αλγόριθμος Παρεκτροπής εξαρχής φτάνει στο μικρότερο μέσο ρυθμό σφάλματος ενώ ο αλγόριθμος των αυτομάτων ξεκινάει αρχικά με υψηλά ποσοστά μέσου ρυθμού σφάλματος και σταδιακά καταλήγει στο μικρότερο δυνατό.

Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει με τον αλγόριθμο Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ καθώς ενώ ξεκινά με υψηλά ποσοστά μέσου ρυθμού σφάλματος καταλήγει στο μικρότερο δυνατό. Επιπρόσθετα, ο αλγόριθμος αυτός επιτυγχάνει καλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις του, καθώς στις προσομοιώσεις των ίδιων σεναρίων έχει σημαντικά μικρότερο ρυθμό μέσου σφάλματος από ότι έχουν οι άλλοι δυο αλγόριθμοι. Ένα ακόμα επιπλέον ενδιαφέρον στοιχείο που προκύπτει από την παρατήρηση των γραφημάτων είναι ότι ο αλγόριθμος KAM παρουσιάζει τον μικρότερο χρόνο εκτέλεσης από τους άλλους δυο αλγορίθμους και για τα δύο είδη φόρτου κίνησης. Επομένως ο πιο αποτελεσματικός αλγόριθμος από πλευράς χρόνου και ακρίβειας και για τα δύο είδη φόρτου κίνησης που προσομοιώσαμε κρίνεται ο αλγόριθμος Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ. Ο λόγος για τον οποίο ο αλγόριθμος KAM επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από τους άλλους δυο οφείλεται σε δύο παράγοντες. Ο πρώτος παράγοντας είναι η ανάγκη του αλγορίθμου Αυτόματα εκμάθησης να κάνει χρήση μεγάλου αριθμού δράσεων ώστε να λειτουργήσει αποτελεσματικά για τα δεδομένα που έχουμε. Το γεγονός αυτό όμως τον καθιστά πιο αργό ως προς τον χρόνο και λιγότερο ακριβή στις προβλέψεις του. Ο δεύτερος παράγοντας οφείλεται στο ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιούμε για την προσομοίωση των αλγορίθμων δεν είναι αρκετά ομαλά (smooth) ούτε ως προς το μέγεθος πακέτου ούτε ως προς το χρόνο. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού ο αλγόριθμος παρεκτροπής υστερεί ως προς την ακρίβεια και το χρόνο προσομοίωσης σε σχέση με τους άλλους δύο.

Περαιτέρω προοπτικές ανάπτυξης των αλγορίθμων πρόβλεψης θα μπορούσαν να είναι οι εξής: α) Χρήση ιεραρχημένων αυτομάτων για τον αλγόριθμο αυτόματα εκμάθησης ώστε να έχει καλύτερες αποκρίσεις παρά τον αυξημένο αριθμό δράσεων που απαιτούνται από τα δεδομένα β) Χρήση πολυωνύμων στον αλγόριθμο παρεκτροπής που έχουν την ικανότητα να δημιουργούν προσεγγίσεις ομαλώς μεταβαλλόμενων συναρτήσεων για την αντιμετώπιση μη ομαλών δεδομένων γ) Ανάπτυξη των αλγορίθμων σε κάποια άλλη γλώσσα προγραμματισμού χαμηλότερου επιπέδου για να επιτύχουμε καλύτερους χρόνους προσομοίωσης.

Μια ακόμη προσθήκη για μελλοντική εργασία θα μπορούσε να είναι η ανάπτυξη δύο επιπλέον αλγορίθμων, ιδιαίτερα γνωστών στην αναγνώριση προτύπων, της Μηχανής Υποστήριξης Διανυσμάτων (Support Vector Machines) και του Τυχαίου Δάσους (Random Forests) για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων.

---

## Βιβλιογραφία

---

- [1] A. Ghosh *et al.*, “Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, Feb.2005, pp. 129–36.
- [2] M. Cao *et al.*, “Modeling and Performance Analysis of the Distributed Scheduler in IEEE 802.16 Mesh Mode,”*Proc. 6th ACM Int’l. Symp. Mobile Ad Hoc Networking and Comp.*, Urbana-Champaign, IL, 2005, pp. 78–89.
- [3] C. Cicconetti, L. Lenzini, and E. Mingozzi, “Quality of Service Support in IEEE 802.16 Networks,” *IEEE Network*, vol. 20, Mar. 2006, pp. 50–55.
- [4] Q. Liu, X. Wang and G. B. Giannakis, “A Cross-Layer Scheduling Algorithm with QoS Support in Wireless Networks,” *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 55, no. 3, May 2006, pp. 839–46.
- [5] K. R. Santhi and G. S. Kumaran, “Migration to 4G:Mobile IP based Solutions,” *Proc. Advanced Int’l. Conf.Telecommun. and Int’l. Conf. Internet and Web Apps. and Svcs.*, French Caribbean, 2006, pp. 76–81.
- [6] C. Chang, “A Mobile-IP Based Mobility System for Wireless Metropolitan Area Networks,” *Proc. Int’l. Conf.Wksp.*, *Parallel Processing ’05*, June 2005, pp. 429–35.
- [7] S. G. Glisic, *Advanced Wireless Networks: 4G Technologies*, Wiley, 2005,pp. 86-104.
- [8]W. Tranter, K. Shanmugam, T. Rappaport, and K. Kosbar. *Principles of Communication System Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall, 2003.
- [9] E. Viterbo and J Boutros. A universal lattice code decoder for fading channel. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45, July 1997.
- [10] B. Vucetic and J. Yuan. *Space-Time Coding*. Wiley, 2003,pp. 112-134.
- [11] T. Kim and J. Andrews. Optimal pilot-to-data power ration for MIMO-OFDM. *Proceedings of IEEE Globecom*, December 2005,pp. 86-94.
- [12] D. Love and R. Heath. Limited feedback unitary precoding for orthogonal space time block codes.*IEEE Transitions on Signal Processing*, 53(1), January 2005.
- [13]A. Paulraj, R. Nabar, and D. Gore. *Introduction to Space-Time Wireless Communications*, Cambridge University Press, 2003.

- [14] M. Rodrigues, I. Chatzgeorgiou, I. Wassell, and R Carrasco. On the performance of turbo codes in quasi-static fading channels. *Proceedings of the International Symposium on Information Theory*, September 2005.
- [15] 3GPP. Spatial channel Model for MIMO simulations, v6.1.0. TR 25.996. September 2003.
- [16] T. Kim and J. Andrews. Optimal pilot-to-data power ratio for MIMO-OFDM. *Proceedings of IEEE Globecom*, December 2005.
- [17] S. Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas of Communication*, October 1998.
- [18] L. Bahl, J. Jelinek, J. Cocke, and F. Raviv. Optimal decoding of linear codes for minimizing symbol error rate. *IEEE Transactions on Information Theory*, 20, March 1974.
- [19] M. S. Obaidat, G. I. Papadimitriou, and A. S. Pomportsis, "Learning Automata: Theory, Paradigms and Applications," *IEEE Trans. Sys., Man and Cybernetics-Part B*, vol. 32, no. 6, Dec. 2002, pp. 706–09.
- [20] T. Joshi *et al.*, "SARA: Stochastic Automata Rate Adaptation for IEEE 802.11 Networks," *IEEE Trans. Parallel and Distrib.Sys.*, vol. 19, no. 10, Oct. 2008, pp. 157–90.
- [21] M. A. Haleem and R. Chandramoulli, "Adaptive Downlink Scheduling and Rate Selection: A Cross-layer Design," *IEEE JSAC*, vol. 23, no. 6, June 2005, pp. 1297–97.
- [22] Y. Xing and R. Chandramouli, "Stochastic Learning Solution for Distributed Discrete Power Control Game in Wireless Data Networks," *IEEE/ACM Trans. Net.*, vol.16, no. 4, Aug.2008, pp. 932–44.
- [23] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou and A. S. Pomportsis, "Learning-Automata-Based Polling Protocols for Wireless LANs," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 3, Mar. 2003, pp. 453–63.
- [24] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou, and A. S. Pomportsis, "Distributed Protocols for Ad-Hoc Wireless LANs: A Learning-Automata-Based Approach," *Ad Hoc Networks*, Elsevier, vol. 2, no. 4, Oct. 2004, pp.419–31.
- [25] J. A. Torkestani and M. R. Meybodi, "An Efficient Cluster-Based CDMA/TDMA Scheme for Wireless Mobile Ad-Hoc Networks: A Learning Automata Approach," *J.Network and Comp. Apps.*, Elsevier, vol. 33, no. 4, July2010, pp. 477–90.

- [26] J. A. Torkestani and M.R. Meybodi, "Mobility-based Multicast Routing Algorithm for Wireless Mobile Ad-Hoc Networks: A Learning Automata Approach," *Comp. Commun.*, Elsevier, vol. 33, no. 6, Apr. 2010, pp. 721–35.
- [27] J. A. Torkestani and M. R. Meybodi, "Weighted Steiner Connected Dominating Set and its Application to Multicast Routing in Wireless MANETs," *Wireless Pers. Commun.*, Springer, Feb. 2010.
- [28] J. A. Torkestani and M. R. Meybodi, "An Intelligent Backbone Formation Algorithm for Wireless Ad hoc Networks based on Distributed Learning Automata," *Computer Networks*, Elsevier, vol. 54, no. 5, Apr. 2010, pp. 826–43.
- [29] B. V. Ramana and C. S. R. Murthy, "Learning-TCP: A Novel Learning Automata Based Congestion Window Updating Mechanism for Ad Hoc Wireless Networks," *LNCS*, Springer, vol. 3769, 2005, pp. 454–64.
- [30] S. Misra, V. Tiwari, and M. S. Obaidat, "LACAS: Learning Automata-based Congestion Avoidance Scheme for Healthcare Wireless Sensor Networks," *IEEE JSAC*, vol. 27, no. 4, May 2009, pp. 466–79.
- [31] J. A. Torkestani and M. R. Meybodi, "Clustering the Wireless Ad-Hoc Networks: A Distributed Learning Automata Approach," *Parallel and Distrib. Comp.*, Elsevier, vol. 70, no. 4, Apr. 2010, pp. 394–405.
- [32] M. Esnaashari and M. R. Meybodi, "Data Aggregation in Sensor Networks using Learning Automata," *Wireless Networks*, Springer, vol. 16, no. 3, Apr. 2010, pp. 687–99.
- [33] M. Esnaashari and M. R. Meybodi, "A Cellular Learning Automata based Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks," *Sensor Letters*, vol. 6, no. 5, Oct. 2008, pp. 723–35.
- [34] M. Esnaashari and M. R. Meybodi, "A Learning Automata based Scheduling Solution to the Dynamic Point Coverage Problem in Wireless Sensor Networks," *Computer Networks*, Elsevier, 2010.
- [35] Y. Xing *et al.*, "Dynamic Spectrum Access with QoS and Interference Temperature Constraints," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 6, no. 4, Apr. 2007, pp. 423–33.
- [36] Y. Song, C. Zhang, and Y. Fang, "Stochastic Traffic Engineering in Multihop Cognitive Wireless Mesh Networks," *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 9, no. 3, Mar. 2009, pp. 305–16.

- [37] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou, and A. S. Pomportsis, "Using Learning Automata for Adaptive Push-Based Data Broadcasting in Asymmetric Wireless Environments," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 51, no. 6, Nov. 2002, pp. 1652–60.
- [38] S. Acharya, M Franklin, and S.Zdonik, "Dissemination-based data delivery using broadcast disks", *IEEE Pers. Commun.*, vol. 2, no. 6, Dec. 1995, , pp.50-60
- [39] N.H.Vaidya and S.Hameed, "Scheduling Data Broadcast In Asymmetric Communication Environments", *Wireless Networks*, May 1999, pp.171-182
- [40] E.Yajima, T. Hara, M. Tsukamoto, S. Nishio, "Scheduling and caching strategies for correlated data in push-based information systems", *ACM SIGAPP Applied Computing Review*, vol. 9, no. 1, pp. 22-28, 2001.
- [41] P. Nicopolitidis, G. I. Papadimitriou and A. S. Pomportsis, " Using Learning Automata for Adaptive Push - Based Data Broadcasting in Asymmetric Wireless Environments ", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1652-1660, Nov. 2002 , pp. 1652-1660.
- [42] V. Kakali, P. G. Sarigianidis, G. I. Papadimitriou, A. S. Pomportsis, "A prediction-based scheme for wireless push systems, using a statistical hidden Markov model", in *Proceedings of 15<sup>th</sup> IEEE/SCVT (Symposium on Communications and Vehicular Technology)*, Nov. 2008, pp. 125-129.
- [43] W. C. Y. Lee, "Overview of Cellular CDMA", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 40, no. 2, May 1991, pp. 291-302.
- [44] L. Rabiner, B. Juang, "An introduction to hidden Markov models", *IEEE ASSP Magazine*, vol. 3, no. 1, Jan 1986, pp. 4-16.
- [45] G. Yin, Q. Zhang, "Discrete-time Markov chains: Two time-scale methods and applications", Springer, New York, 2005.
- [46] J. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX, Understanding Broadband Wireless Networking*, Prentice Hall, 2007.
- [47] Y. Ben-Shimol, I. Kitroser, and Y. Dinitz, "Two-Dimensional Mapping for Wireless OFDMA Systems," *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 52, no. 3, pp.388-396, September 2006.
- [48] C. Desset, E. B. de Lima Filho, and G. Lenoir, "WiMAX Downlink OFDMA Burst Placement for Otimized Receiver Duty-Cycling," in *Proc. IEEE Int. Conf. Comm.*, 2007, pp. 5149-5154.



- [49] T. Ohseki, M. Morita, and T. Inoue, "Burst Construction and Packet Mapping Scheme for OFDMA Downlinks in IEEE 802.16 Systems," in Proc. IEEE Global telecom Conf., pp. 4307-4311, 2007.
- [50] T. Wang; H. Feng; B. Hu; , "Two-Dimensional Resource Allocation for OFDMA System," in Proc. IEEE International Conference on Communications Workshops, pp.1-5, 19-23 May 2008.
- [51] C. So-In, R. Jain, and A. Al-Tamimi, "eOCSA: An Algorithm for Burst Mapping with Strict QoS requirements in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks" To appear in the 2nd Inter. Conf. on Comp. and Automation Engin. (ICCAE 2010), Feb. 2010.
- [52] P. G. Sarigiannidis, G. I. Papadimitriou, P. Nikopolitidis, M. S. Obaidat, and A. Pomportsis, "A Novel Adaptive Mapping Scheme for IEEE 802.16 Mobile Downlink Framing", Globecom 2010.
- [53] V. Gazis, N. Alonistioti, L. Merakos, "Toward a Generic "AlwaysBest Connected" Capability in Integrated WLAN/UMTS Cellular Mobile Networks (and Beyond)", IEEE Wireless Communications, vol. 12, 2005, pp. 20-29.
- [54] L. Huang, K. A. Chew, R. Tafazolli, "Network Selection for One-to-Many Services in 3G-Broadcasting Cooperative Networks", in Proc.of IEEE International Conference on Vehicular Technology, vol. 5,2005, pp. 2999-3003.
- [55] Q. Song, A. Jamalipour, "A quality of service negotiation-based vertical handoff decision scheme in heterogeneous wireless systems", European Journal of Operational Research, vol. 191, 2008, pp. 1059-1074.
- [56] P. Vidales, J. Baliosian, J. Serrat, G. Mapp, F. Stajano, A. Hopper, "Autonomic System for Mobility Support in 4G Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, 2005, pp.2288-2304.
- [57] E. Bircher, T. Braun, "An Agent-Based Architecture for Service Discovery and Negotiations in Wireless Networks", in Proc. of the 2nd International Conference on Wired/Wireless Internet Communications, 2004, LNCS 2957, pp. 295 – 306.
- [58] D. Charilas, O. Markaki, D. Nikitopoulos, M. Theologou, "Packetswitched network selection with the highest QoS in 4G networks", Computer Networks, Vol. 52, 2008, pp. 248-258.
- [59] C. Yiping, Y. Yuhang, "A New 4G Architecture Providing Multimode Terminals Always Best Connected Services", IEEE Wireless Communications, vol. 14, 2007, pp. 36-41.

[60] O. Ormond, J. Murphy, G.-M. Muntcan, “Utility-based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems” in Proc. of the IEEE International Conference on Communications, vol. 4, 2006, pp. 1831- 1836.

[61] Q.-T. Nguyen-Vuong, N. Agoulmine, Y. Ghamri-Doudane, “A usercentric and context-aware solution to interface management and access network selection in heterogeneous wireless environments”, Computer Networks, vol. 52, 2008, pp. 3358-33.

---

## Παραρτήματα

---

### Ι) Παράρτημα Πινάκων

Πίνακας 1.1 Εξέλιξη των προτύπων (σελίδα 21).

Πίνακας 2.1 Πρότυπα ΙΕΕΕ (σελίδα 28).

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά συστημάτων σταθερού WiMAX (σελίδα 29).

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικά συστημάτων κινητού WiMAX (σελίδα 32).

Πίνακας 3.1 Παρουσίαση των τιμών της  $f(x)$  (σελίδα 57).

Πίνακας 3.2 Πίνακας Παρεκτροπής (σελίδα 65).

Πίνακας 3.3 Διαφορετικά Σχέδια Ενίσχυσης και η ανταπόκριση των συναρτήσεων  $\Phi(\cdot)$  και  $\Psi(\cdot)$  (σελίδα 73).

Πίνακας 3.4 Πίνακας μετάβασης καταστάσεων T (σελίδα 90).

Πίνακας 3.4 Πίνακας εκπομπών E (σελίδα 90).

## II) Παράρτημα Γραφημάτων

Γράφημα 4.1 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος Γραμμικής (Σενάριο 1) (σελίδα 95).

Γράφημα 4.2 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος Κυβικής (Σενάριο 1) (σελίδα 95).

Γράφημα 4.3 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος ΑΕ (Σενάριο 1) (σελίδα 99).

Γράφημα 4.4 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος ΚΑΜ (Σενάριο 1) (σελίδα 102).

Γράφημα 4.8 Υπολογισμός πυκνότητας πιθανότητας για packet size (σελίδα 106).

Γράφημα 4.10 Σύγκριση της αθροιστικής πιθανότητας για το packet size (σελίδα 108).

Γράφημα 4.12 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με γραμμική συνάρτηση (Σενάριο2) (σελίδα 112).

Γράφημα 4.13 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με κυβική συνάρτηση σφήνα (Σενάριο2) (σελίδα 113).

Γράφημα 4.14 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για μέγεθος πακέτου (Σενάριο2) (σελίδα 114).

Γράφημα 4.15 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο2) (σελίδα 116).

Γράφημα 4.16 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με Αυτόματα Εμάθησης (Σενάριο2) (σελίδα 117).

Γράφημα 4.17 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με ΚΑΜ (Σενάριο2) (σελίδα 118).

Γράφημα 4.18 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με ΚΑΜ (Σενάριο2) (σελίδα 119).

Γράφημα 4.19 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με κυβική Παρεκτροπή (Σενάριο 3) (σελίδα 121).

Γράφημα 4.20 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με κυβική Παρεκτροπή (Σενάριο 3) (σελίδα 122).

Γράφημα 4.21 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 3) (σελίδα 123).

Γράφημα 4.22 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με Αυτόματα Εκμάθησης (Σενάριο 3) (σελίδα 124).

Γράφημα 4.23 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για time με KAM (Σενάριο 3) (σελίδα 125).

Γράφημα 4.24 Υπολογισμός μέσου ρυθμού σφάλματος για packet size με KAM (Σενάριο 3) (σελίδα 126).

Γράφημα 4.25 Συγκριτικό γράφημα χρόνων προσομοίωσης της γραμμικής και κυβικής συνάρτησης (σελίδα 128).

Γράφημα 4.26 Συγκριτικό γράφημα χρόνων προσομοίωσης των 3 αλγορίθμων (σελίδα 129).

Γράφημα 4.27 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού σφάλματος του Αυτόματου Εκμάθησης για διαφορετικό αριθμό δράσεων (σελίδα 130).

Γράφημα 4.28 Συγκριτικό γράφημα χρόνων Αυτόματου Εκμάθησης για διαφορετικό αριθμό δράσεων (σελίδα 131).

Γράφημα 4.29 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης Αυτόματο Εκμάθησης για Ρυθμούς Εκμάθησης (σελίδα 132).

Γράφημα 4.30 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης KAM για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης (σελίδα 133).

Γράφημα 4.31 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης Παρεκτροπής για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης (σελίδα 134).

Γράφημα 4.32 Συγκριτικό γράφημα μέσου ρυθμού πρόβλεψης του Αυτόματου για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης (σελίδα 135).

Γράφημα 4.33 Συγκριτικό γράφημα χρόνου προσομοίωσης του Αυτόματου για διαφορετικά ποσοστά αρχικής εκπαίδευσης (σελίδα 136).

Γράφημα 4.34 Συγκριτικό γράφημα των 3 αλγορίθμων ως προς την ακρίβεια πρόβλεψης για το μέγεθος πακέτου (σελίδα 137).

### **III) Παράρτημα Γλωσσάρι**

WiMAX: Worldwide Interoperability for Microwave Access.

ETSI: European Telecommunications Standards Institute.

3-DES: Triple Data Encryption Standard.

AES: Advanced Encryption Standard.

IEEE: Institute of Electrical Electronics Engineers.

Σ.Δ: Στοχαστική Διαδικασία.

L.A: Learning Automata.

K.A.M: Κρυφές Αλυσίδες Μαρκόβ.

A.E: Αυτόματο Εκμάθησης.

HMM: Hidden Markov Model.

3G: third generation of mobile telecommunications technology

GSM: Global System for Mobile Communications

GMH: Generic MAC Header

OFDM: Orthogonal frequency-division multiplexing

QAM: Quadrature amplitude modulation

TDD: Time Division Duplexing

FDD: Frequency Division Duplexing

FTTH: Fiber To The Home

Voip: Voice Over Ip

VDSL: Very High Bit Rate Digital Subscriber Line