



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Δυναμική Διαχείριση Πόρων
Οπισθοζευκτικού Δικτύου σε Δίκτυα
Κινητών Επικοινωνιών Νέας Γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΙΩΑΝΝΗ Β. ΛΟΥΜΙΩΤΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2009)

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Δυναμική Διαχείριση Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου σε Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Νέας Γενιάς

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

του

ΙΩΑΝΝΗ Β. ΛΟΥΜΙΩΤΗ

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού &
Μηχανικού Υπολογιστών Ε.Μ.Π. (2009)

Συμβουλευτική Επιτροπή: Μιχαήλ Θεολόγου
Ευστάθιος Συκάς
Μιλτιάδης Αναγνώστου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 5^η Δεκεμβρίου 2014.

.....
Μ. Θεολόγου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Συκάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Αναγνώστου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Στασινόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Α. Παναγόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Μήτρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Δ. Ρείσης
Επ. Καθηγητής
Παν. Αθηνών

Αθήνα, Δεκέμβριος 2014

.....

ΙΩΑΝΝΗΣ Β. ΛΟΥΜΙΩΤΗΣ

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

Copyright © Ιωάννης Β. Λουμιώτης, 2014.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών	1
1.2	Τάσεις της Αγοράς	3
1.3	Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υπηρεσίας Δικτύου Πρόσβασης	6
1.4	Αντικείμενο της Διατριβής	9
1.5	Σχετικές Εργασίες	10
1.5.1	Διαχείριση πόρων οπισθοζευκτικού δικτύου	10
1.5.2	Πρόβλεψη πόρων	15
1.5.2.1	Γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης	15
1.5.2.2	Μη γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης	17
1.6	Διάρθρωση της Διατριβής	19
2	Οπισθοζευκτικό Δίκτυο	21
2.1	Γενικά	21
2.2	Τεχνολογίες Οπισθοζευκτικού Δικτύου	23
2.2.1	Ασύρματες τεχνολογίες οπισθοζευκτικού δικτύου	24
2.2.1.1	Μικροκυματική τεχνολογία	24
2.2.1.2	Τεχνολογία χιλιοστομετρικών κυμάτων	25
2.2.1.3	Οπτική επικοινωνία ελευθέρου χώρου	26
2.2.1.4	Δορυφορικά συστήματα	26
2.2.2	Ενσύρματες τεχνολογίες οπισθοζευκτικού δικτύου	26
2.2.2.1	Συνδρομητικές γραμμές χαλκού T1/E1	26
2.2.2.2	Ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές	27
2.2.2.3	Παθητικά οπτικά δίκτυα	27
2.3	Σύγκριση Τεχνολογιών Οπισθοζευκτικού Δικτύου	28
2.4	Απαιτήσεις Οπισθοζευκτικού Δικτύου	28
2.5	Οπτική-Ασύρματη Συγκεκλιμένη Υποδομή	29
2.5.1	Δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης σε οπτικά δίκτυα	31
2.6	Δυναμικά Συμφωνητικά Επιπέδου Υπηρεσίας	32
2.6.1	Χαρακτηριστικά συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας	33
2.6.2	Συμφωνητικά επιπέδου υπηρεσίας για το οπισθοζευκτικό δίκτυο	34
3	Δυναμική Διαχείριση των Πόρων	39
3.1	Παραδοσιακές Μέθοδοι Προγραμματισμού και Διαστασιολόγησης του Δικτύου	39
3.2	Δυναμική Διαχείριση Πόρων σε Συγκεκλιμένα Δίκτυα	41
3.2.1	Σύστημα δυναμικής διαχείρισης πόρων	41
3.3	Φυσική Αρχιτεκτονική Συστήματος Διαχείρισης Πόρων	42

3.3.1	Κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική	43
3.3.1.1	Χαρακτηριστικά κεντριοποιημένης αρχιτεκτονικής	43
3.3.1.2	Χαρακτηριστικά χρήσης κεντρικού συστήματος διαχείρισης και συντήρησης	44
3.3.1.3	Χαρακτηριστικά χρήσης κεντρικού συστήματος κοστολόγησης	44
3.3.2	Κατανεμημένη αρχιτεκτονική	45
3.3.2.1	Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων συλλογής στατιστικών	45
3.3.2.2	Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων επεξεργασίας δεδομένων	45
3.3.2.3	Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων συλλογής στατιστικών και επεξεργασίας δεδομένων	46
3.3.2.4	Χαρακτηριστικά χρήσης κατανεμημένων οντοτήτων συλλογής στατιστικών	46
3.4	Ευφυής Πράκτορας	47
4	Λειτουργία Πρόβλεψης Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου	51
4.1	Χαρακτηριστικά της Κίνησης του Δικτύου	51
4.2	Υλοποίηση Διαδικασίας Πρόβλεψης	56
4.2.1	Είδη νευρωνικών δικτύων	56
4.2.2	Δεδομένα εισόδου	56
4.2.3	Αποτελέσματα πρόβλεψης	57
4.3	Ανάλυση Ευαισθησίας Πρόβλεψης	57
4.3.1	Δίκτυο MLP	59
4.3.2	Δίκτυο GMDH	61
4.3.3	Δίκτυο GRNN	63
4.3.4	Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων	65
4.4	Βελτίωση Επίδοσης Συστήματος Πρόβλεψης	66
4.4.1	Προεπεξεργασία Δεδομένων	67
4.4.2	Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν	67
4.4.3	Στατιστική ανάλυση των δεδομένων εκπαίδευσης	68
4.4.4	Δυναμική επιλογή του συνόλου εκπαίδευσης	70
4.5	Επιλογή Συχνότητας Εκπαίδευσης	72
4.5.1	Διατύπωση του προβλήματος	72
4.5.2	Παιγνιοθεωρητική προσέγγιση σχέσης ανταλλαγής	73
4.5.3	Ανάλυση διακλάδωσης	74
4.5.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	75
4.6	Επιλογή Μεγέθους Δεδομένων Εκπαίδευσης	75
4.6.1	Περιγραφή του προβλήματος	78
4.6.2	Εφαρμογή της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων	79
4.6.3	Ανάλυση διακλάδωσης	80
4.6.4	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	80
5	Υποστηρικτικές Λειτουργίες Διαχείρισης Πόρων	85
5.1	Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου	85
5.1.1	Δεδομένα εισόδου	86
5.1.2	Αποτελέσματα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης	86
5.1.3	Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το χρονικό παράθυρο	91

5.1.3.1	Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 1 εβδομάδας.....	92
5.1.3.2	Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 2 εβδομάδων	92
5.1.3.3	Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 4 εβδομάδων	96
5.1.3.4	Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 8 εβδομάδων	96
5.1.3.5	Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων	100
5.2	Διαδικασία Αντιμέτωπισης Εκτάκτων Καταστάσεων.....	101
5.3	Αίτηση Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου	102
5.4	Αξιολόγηση Ευφυούς Πράκτορα.....	106
6	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση Προβλήματος Διαχείρισης Πόρων	111
6.1	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση στην Πλευρά του Σταθμού Βάσης.....	111
6.1.1	Διατύπωση του Προβλήματος.....	112
6.1.2	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση.....	114
6.1.2.1	Προτεινόμενο μοντέλο.....	114
6.1.2.2	Συζήτηση επί του μοντέλου	116
6.1.3	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση υπό Καθυστέρηση	117
6.1.4	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	117
6.2	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση στην Πλευρά του Οπτικού Δικτύου	121
6.2.1	Διατύπωση του Προβλήματος.....	121
6.2.2	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση.....	123
6.2.2.1	Προτεινόμενο μοντέλο.....	123
6.2.2.2	Υπερτιμολόγηση των πόρων	124
6.2.2.3	Συζήτηση επί του μοντέλου	125
6.2.3	Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση υπό Καθυστέρηση	125
6.2.4	Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	126
7	Ανακεφαλαίωση - Μελλοντικές Επεκτάσεις	131
7.1	Ανακεφαλαίωση	131
7.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	133
A'	Μαθηματικό Μοντέλο Δυναμικής Εκχώρησης Εύρους Ζώνης σε Οπτικά Δίκτυα	135
A'.1	Περιγραφείς Κίνησης	135
A'.2	Εγγυημένο Εύρος Ζώνης	136
A'.3	Μη Διασφαλισμένο Εύρος Ζώνης	136
A'.4	Εύρος Ζώνης Βέλτιστης Προσπάθειας	137
A'.5	Προτεραιότητα Εκχώρησης Εύρους Ζώνης	137
B'	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	139
B'.1	Εισαγωγή.....	139
B'.2	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	140
B'.3	Πλεονεκτήματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	141
B'.4	Πολυστρωματικά Νευρωνικά Δίκτυα	142
B'.5	Δίκτυα Ομαδικής Μεθόδου Διαχείρισης Δεδομένων.....	143
B'.6	Νευρωνικά Δίκτυα Γενικευμένης Παλινδρόμησης	144

Γ' Εξελικτική Θεωρία Παιγνίων	147
Γ.1 Εισαγωγή.....	147
Γ.2 Δυναμική των αντιγραφών	147
Γ.3 Εξελικτικά Ευσταθείς Στρατηγικές.....	148
Γ.4 Ασύμμετρα Παίγνια.....	149
Δ' Αποδείξεις Θεωρημάτων	151
Δ.1 Απόδειξη Θεωρήματος 4.5.1	151
Δ.2 Απόδειξη Θεωρήματος 4.5.2	151
Δ.3 Απόδειξη Θεωρήματος 6.1.1	151
Δ.4 Απόδειξη Θεωρήματος 6.1.2	152
Δ.5 Απόδειξη Θεωρήματος 6.2.1	153
Δ.6 Απόδειξη Θεωρήματος 6.2.2	153
Βιβλιογραφία	155
Κατάλογος Δημοσιεύσεων του Συγγραφέα	163

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας.	2
1.2	Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης ζεύξης καθόδου για τα έτη 1990-2015.	3
1.3	Πρόβλεψη όγκου δεδομένων κινητών επικοινωνιών.	4
1.4	Πρόβλεψη αριθμού έξυπνων κινητών συσκευών και συνδέσεων.	4
1.5	Επίδραση των έξυπνων κινητών συσκευών στην αύξηση της συνολικής κίνησης.	5
1.6	Πρόβλεψη αριθμού κινητών συσκευών ανά τύπο δικτύου.	5
1.7	Αντιστοίχιση κίνησης συσκευών υψηλών προδιαγραφών σε κίνηση που δημιουργείται από συμβατικές κινητές συσκευές.	6
1.8	Πρόβλεψη κίνησης δεδομένων ως προς τον τύπο της υπηρεσίας.	7
1.9	Πρόβλεψη εξέλιξης κίνησης ωρών αιχμής και μέσης κίνησης.	7
2.1	Απεικόνιση οπισθοζευκτικού δικτύου.	22
2.2	Απεικόνιση τάσης κίνησης δεδομένων και εσόδων παρόχου κινητών επικοινωνιών.	22
2.3	Καταμερισμός λειτουργικού κόστους παρόχου κινητών επικοινωνιών. ...	23
2.4	Σύγκλιση ασύρματων και οπτικών δικτύων.	30
2.5	Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης σε συγκεκριμένο ασύρματο-οπτικό δίκτυο.	32
2.6	Φάσεις κύκλου ζωής ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας.	34
2.7	Τυπικό παράδειγμα συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας.	36
2.8	Παράδειγμα υλοποίησης συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας.	37
3.1	Πρόβλεψη χωρητικότητας οπισθοζευκτικού δικτύου για τέσσερις Σταθμούς Βάσης και δύο διαφορετικά είδη σεναρίων.	40
3.2	Απλή σχηματική αναπαράσταση των λειτουργιών του ευφυούς πράκτορα	42
3.3	Σχηματική αναπαράσταση ευφυούς πράκτορα.	48
3.4	Αναλυτική αναπαράσταση λειτουργιών ευφυούς πράκτορα.	49
4.1	Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης καθόδου για ΣΒ1.	52
4.2	Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης ανόδου για ΣΒ1.	52
4.3	Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης καθόδου για ΣΒ2.	53
4.4	Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης ανόδου για ΣΒ2.	53
4.5	Τυπική αναπαράσταση της αθροιστικής ζήτησης της κίνησης για διάρκεια πέντε ημερών.	53
4.6	Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier για δεδομένα ζεύξης καθόδου ΣΒ1.	54
4.7	Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier για δεδομένα ζεύξης ανόδου ΣΒ1. .	54
4.8	Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier για δεδομένα ζεύξης καθόδου ΣΒ2.	55
4.9	Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier για δεδομένα ζεύξης ανόδου ΣΒ2. .	55

4.10 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ για το δίκτυο GRNN.	58
4.11 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ1.	59
4.12 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσεως του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ1.	60
4.13 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ2.	60
4.14 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσεως του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ2.	60
4.15 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ1.	61
4.16 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσεως του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ1.	62
4.17 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ2.	62
4.18 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσεως του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ2.	62
4.19 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ1.	63
4.20 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ1.	64
4.21 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ2.	64
4.22 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ2.	64
4.23 Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.	68
4.24 Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.	69
4.25 Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ2 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.	69
4.26 Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ2 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.	70
4.27 Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 συναρτήσεως του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.	71
4.28 Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 συναρτήσεως του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.	71

4.29	Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ2 συναρτήσει του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.....	71
4.30	Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ2 συναρτήσει του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.....	72
4.31	Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίησης της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.6$ και $\nu = -1.2$	76
4.32	Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίησης της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.7$ και $\nu = -1.2$	76
4.33	Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίησης της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.8$ και $\nu = -1.2$	76
4.34	Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίησης της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.9$ και $\nu = -1.2$	77
4.35	Τιμές κατωφλίου της παραμέτρου της σχέσης ανταλλαγής β για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής ν	77
4.36	Σχηματική αναπαράσταση του κανονικοποιημένου οφέλους της ακρίβειας του συστήματος πρόβλεψης και του υπολογιστικού κόστους συναρτήσει του ποσοστού των συλλεχθέντων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της εκπαίδευσης.	81
4.37	Διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τιμή της παραμέτρου $\beta = 0.2$	82
4.38	Διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τιμή της παραμέτρου $\beta = 0.6$	82
4.39	Διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τιμή της παραμέτρου $\beta = 0.99$	83
4.40	Τιμές διακλάδωσης της παραμέτρου β για διαφορετικές τιμές του δ συναρτήσει του βέλτιστου ποσοστού ρ των δεδομένων εκπαίδευσης για $A = 10$ και $B = 4$	83
4.41	Τιμές διακλάδωσης της παραμέτρου β για διαφορετικές τιμές του A συναρτήσει του βέλτιστου ποσοστού ρ των δεδομένων εκπαίδευσης για $b = 0.4$ και $B = 4$	84
5.1	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.	88
5.2	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.	88
5.3	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.	89

5.16 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης οχτώ εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.	98
5.17 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης οχτώ εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.	99
5.18 Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης οχτώ εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.	99
5.19 Πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για χρονική διάρκεια 72 ωρών.	103
5.20 Πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης ανόδου για χρονική διάρκεια 72 ωρών.	103
5.21 Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου.	105
5.22 Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου. .	106
5.23 Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης τριών ημερών και τιμές $\delta_1 = 0.5, \delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$	107
5.24 Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης τριών ημερών και τιμές $\delta_1 = 0.5, \delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$	108
5.25 Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης μιας εβδομάδας και τιμές $\delta_1 = 0.5, \delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$	108
5.26 Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης μια εβδομάδας και τιμές $\delta_1 = 0.5, \delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$	109
6.1 Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος εκχώρησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου.	112
6.2 Εξέλιξη των κλάσεων που έχουν δεσμευτεί από το Σταθμό Βάσης, για τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.	118
6.3 Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τους συνδρομητές, για τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.	119
6.4 Εξέλιξη των κλάσεων που έχουν δεσμευτεί από το Σταθμό Βάσης υπό την επίδραση καθυστέρησης, για $r_{BS} = 0.8, r_S = 0.9$ και τιμές παραμέτρων όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.	120
6.5 Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τους συνδρομητές υπό την επίδραση καθυστέρησης, για $r_{BS} = 0.8, r_S = 0.9$ και τιμές παραμέτρων όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.	120
6.6 Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος εκχώρησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου με δύο παρόχους.	122
6.7 Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_A για τις τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5, \epsilon_B = 0.4, \omega_A = 0.45, \omega_B = 0.45, \mu = 0.3, \nu = 0.4$	127

6.8	Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_B για τις τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$	127
6.9	Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_A υπό την επίδραση καθυστέρησης $\tau_1 = 2$ και $\tau_2 = 3$ και για τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$	128
6.10	Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_B υπό την επίδραση καθυστέρησης $\tau_1 = 2$ και $\tau_2 = 3$ και για τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$	129
B'.1	Μοντέλο τεχνητού νευρώνα.....	139
B'.2	Παράδειγμα πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου.....	142
B'.3	Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου ομαδικής μεθόδου διαχείρισης δεδομένων.....	144
B'.4	Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου γενικευμένης παλινδρόμησης.....	145

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Συνοπτικός πίνακας χαρακτηριστικών επίδοσης ανά τύπο υπηρεσίας. ...	8
1.2	Πίνακας προτυποποιημένων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας δικτύων LTE.	9
2.1	Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης τεχνολογιών οπισθοζευκτικού δικτύου. .	29
3.1	Συνοπτικός πίνακας χαρακτηριστικών κεντριοποιημένης και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής.....	47
4.1	Αποτελέσματα διαδικασίας επικύρωσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.	57
4.2	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κίνησης για το ΣΒ1.	58
4.3	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κίνησης για το ΣΒ2.	59
4.4	Βέλτιστο σφάλμα MAPE για την περίπτωση των δικτύων MLP.	61
4.5	Βέλτιστο σφάλμα MAPE για την περίπτωση των δικτύων GMDH.	63
4.6	Βέλτιστο σφάλμα MAPE για την περίπτωση των δικτύων GRNN.	65
4.7	Βέλτιστες τιμές του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος για την πρόβλεψη της κίνησης των ζεύξεων ανόδου και καθόδου των δύο Σταθμών Βάσης.	66
5.1	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικές περιόδους πρόβλεψης και σύνολα εκπαίδευσης.	87
5.2	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης ανόδου για διαφορετικές περιόδους πρόβλεψης και σύνολα εκπαίδευσης.	91
5.3	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (lags) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας μιας εβδομάδας.	92
5.4	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (lags) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας δύο εβδομάδων.	96
5.5	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (lags) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας τεσσάρων εβδομάδων.	100
5.6	Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (lags) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας οχτώ εβδομάδων.	101

6.1	Τιμές των παραμέτρων για τα προφίλ του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών.....	118
-----	--	-----

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διατριβή αποτελεί προϊόν της ερευνητικής μου δραστηριότητας στο εργαστήριο Δικτύων Υπολογιστών της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Μ. Θεολόγου. Ολοκληρώνοντας, λοιπόν, αυτήν τη προσπάθεια και κλείνοντας έναν πενταετή κύκλο έρευνας, θα ήθελα μέσα από αυτές τις γραμμές να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε μια σειρά από άτομα που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην πορεία αυτή.

Πρώτα από όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Μ. Θεολόγου. Δεν υπάρχουν λόγια με τα οποία θα μπορούσα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στο πρόσωπό του. Πέραν των επιστημονικών γνώσεων και της καθοδήγησης που μου προσέφερε, όλα αυτά τα χρόνια αποτέλεσε για μένα έναν δάσκαλο και έναν φίλο. Από την πρώτη στιγμή που τον γνώρισα προπτυχιακά, πριν οχτώ περίπου χρόνια, ξεχώρισε για την επιστημονική του κατάρτιση, το ήθος και την καλοσύνη του. Ωστόσο, ποτέ δεν φανταζόμουν τότε ότι στα χρόνια που θα ακολουθούσαν θα έπαιζε τόσο σημαντικό ρόλο στη μετέπειτα πορεία μου ως επιστήμονα και ως ανθρώπου. Με εμπιστεύτηκε, πίστεψε σε μένα σε δύσκολους καιρούς και η πόρτα του ήταν πάντα ανοιχτή.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, δηλαδή τους καθηγητές κ. Ε. Συκά και κ. Μ. Αναγνώστου για τις συμβουλές και την επιστημονική καθοδήγηση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επίσης, τον κ. Συκά για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και με επέλεξε να συμμετάσχω στα ερευνητικά προγράμματα, ανοίγοντάς μου νέους δρόμους γεμάτους γνώσεις και εμπειρίες. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στον καθηγητή κ. Γ. Στασινόπουλο για την αγάπη του και για τις συμβουλές του. Η συνεργασία που είχα με τον εν λόγω καθηγητή, μέσα από τα εργαστήρια στα οποία συμμετείχα, μου επέτρεψαν να γνωρίσω και να θαυμάσω τόσο το ήθος του χαρακτήρα του, όσο και την παρηρησία του λόγου του. Ευχαριστίες οφείλω να δώσω και στα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής, δηλαδή στον επίκουρο καθηγητή κ. Α. Παναγόπουλο και στον καθηγητή κ. Ν. Μήτρου για τις υποδείξεις τους και για τη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον επίκουρο καθηγητή του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου κ. Δ. Ρείση για την τιμή που μου έκανε να συμμετέχει στην επιτροπή εξέτασης της διατριβής.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά από το εργαστήριο που μοιραστήκαμε πολλές καλές στιγμές όλα αυτά τα χρόνια· τον Δρ. Κωνσταντίνο Δεμέστιχα, τη Δρ. Τζένη Αδαμοπούλου, τον Δρ. Μιχάλη Μασίκο, τον Παύλο Κοσμίδη, την Αγγελική Κορδαλή, τον Δρ. Αρτέμη Βουλκίδη, τη Χαρά Ρεμούνδου, τον Βασίλη Ασθενόπουλο, τη Θεοδώρα Σταματιάδη, τον Σπύρο Σκεύα και τον Λέοντα Σταματάρη. Επίσης, δεν μπορώ να παραβλέψω και το νέο μέλος του εργαστηρίου, την Κατερίνα Σκρουμπέλου

και να της ευχηθώ καλό ξεκίνημα στην προσπάθειά της.

Στο σημείο αυτό, δεν θα μπορούσα να αμελήσω και τον Δρ. Παναγιώτη Βλαχέα που τον γνώρισα στα πρώτα χρόνια του διδακτορικού μου, αλλά και τους Δρ. Νίκο Παπαουλάκη, Δρ. Βαγγέλη Κοσμάτο, Δρ. Δημήτρη Νικητόπουλο και Χρυσόστομο Τζιουβάρα για τη συνεργασία μας και τις ωραίες στιγμές που περάσαμε στα πλαίσια του έργου CONFES. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους Βαγγέλη Ανυφαντή και Βαγγέλη Μαρινάκη με τους οποίους ξεκινήσαμε μαζί αυτή την προσπάθεια.

Από τις ευχαριστίες αυτές δεν θα μπορούσε να λείπει ο Φίλιππος και ο Ανδρέας για την υπομονετική στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και η Νάντια για τη συμπαράστασή της, αφού ήταν πάντα εκεί όταν τη χρειάστηκα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναστασία, η παρουσία της οποίας παίζει σημαντικό ρόλο στη ζωή μου και με την ελπίδα ότι τα καλύτερα είναι μπροστά.

Τέλος, ιδιαίτερη μνεία οφείλω να αποδώσω στην οικογένειά μου η οποία τόσα χρόνια με στήριξε χωρίς πίεση και απαιτήσεις. Το ότι είμαι σε θέση να ολοκληρώσω αυτή την προσπάθεια και να γράφω αυτές τις γραμμές οφείλεται στις δικές τους στερήσεις όλα τα προηγούμενα χρόνια. Τους ευχαριστώ γι' αυτό.

Ιωάννης Λουμιώτης
Αθήνα, Οκτώβριος 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων των συνδρομητών κινητών επικοινωνιών έχει διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη των δικτύων νέας γενιάς προκειμένου οι πάροχοι να μπορούν να αντεπεξέλθουν στις απαιτήσεις αυτές. Ωστόσο, οι υψηλοί ρυθμοί που πρέπει να υποστηριχτούν στο ασύρματο δίκτυο πρόσβασης έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία σημείων συμφόρησης στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, το οποίο παραδοσιακά είχε κατασκευαστεί με σκοπό την υποστήριξη υπηρεσιών φωνής. Προκειμένου να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό, έχει προταθεί στη βιβλιογραφία η λύση της σύγκλισης των ασύρματων δικτύων πρόσβασης με ένα οπτικό δίκτυο στην οπισθόζευξη. Η υψηλή χωρητικότητα που δύναται να υποστηριχθεί από τα οπτικά δίκτυα μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες των σύγχρονων αλλά και των μελλοντικών δικτύων κινητών επικοινωνιών, καθιστώντας το μια ασφαλή επιλογή για τους παρόχους. Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή εγείρεται μια σειρά από σημαντικά ζητήματα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αποδοτική κατανομή των πόρων στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, οι παραδοσιακές μέθοδοι διαστασιολόγησης των δικτύων κινητών επικοινωνιών που βασίζονταν στην ικανοποίηση ενός δυσμενούς σεναρίου και οδηγούσαν σε μια στατική εκχώρηση των πόρων του δικτύου, δεν μπορούν πλέον να εφαρμοστούν σε μια συγκεκλιμένη ασύρματη-οπτική υποδομή, καθώς έχουν ως αποτέλεσμα την υπερδιαστασιολόγηση του δικτύου και τη μη αποδοτική διαχείριση των πόρων.

Στη βάση αυτή, η παρούσα διατριβή μελετάει το πρόβλημα της δυναμικής εκχώρησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου και προτείνει ένα κατανεμημένο σύστημα δυναμικής διαχείρισης των πόρων, ικανό να ανταπεξέλθει στις ανάγκες των δικτύων νέας γενιάς. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται και επικυρώνεται ένα ευφυές σύστημα που χρησιμοποιεί μεθόδους μηχανικής μάθησης ώστε να εκτιμήσει την επερχόμενη ζήτηση ενός Σταθμού Βάσης και να αιτηθεί εκ των προτέρων τη δέσμευση των απαραίτητων πόρων προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των συνδρομητών. Ειδικότερα, το σύστημα αυτό παρακολουθεί και συλλέγει τα στατιστικά της κίνησης που μεταφέρεται από το Σταθμό Βάσης προς το οπισθοζευκτικό δίκτυο και με βάση τις καταγραφές αυτές υπολογίζει τους απαραίτητους προς δέσμευση πόρους για τη δημιουργία ενός κατάλληλου συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου οπτικού δικτύου.

Στα πλαίσια ανάπτυξης του συστήματος αυτού, περιγράφονται όλες οι απαραίτητες λειτουργίες που επιτελεί για τη δυναμική διαχείριση των πόρων. Ειδικότερα, δίδεται βαρύνουσα σημασία στη διαδικασία της πρόβλεψης, η οποία αποτελεί την κύρια λειτουργία του συστήματος και είναι υπεύθυνη για την αποδοτική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδοση διαφορετικών τεχνικών μηχανικής μάθησης και μελετώνται θέματα που άπτονται στη βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας του συστήματος, τόσο σε πρακτική όσο και σε θεωρητική βάση. Επιπλέον, πέραν από την πρόβλεψη των πόρων για τη σύναψη συμφωνιών επιπέδου υπη-

ρεσίας, παρουσιάζεται και η διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης ως συνδυασμός μεθόδων μηχανικής μάθησης και ανάλυσης χρονοσειρών για την αντιμετώπιση των μη αναμενόμενων μεταβολών της κίνησης του δικτύου. Με βάση τα αποτελέσματα που προκύπτουν εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία και την επίδοση ενός τέτοιου συστήματος.

Τέλος, το γενικό πρόβλημα διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου μελετάται με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων. Ειδικότερα, εξετάζεται το πρόβλημα στην πλευρά του Σταθμού Βάσης, όπου μοντελοποιούνται κατάλληλα οι αλληλεπιδράσεις του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών, και στη πλευρά του οπτικού δικτύου, όπου δύο διαφορετικοί πάροχοι κινητών επικοινωνιών μοιράζονται την ίδια οπισθοζευκτική υποδομή και ανταγωνίζονται για τους πόρους του οπτικού δικτύου. Η μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παικτών γίνεται με τη χρήση της δυναμικής των αντιγραφών και μελετάται η ευστάθεια του δυναμικού συστήματος, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν τεκμηριώνονται με τη χρήση κατάλληλων προσομοιώσεων.

Λέξεις Κλειδιά: Οπισθοζευκτικό δίκτυο, δυναμική διαχείριση πόρων, δίκτυα νέας γενιάς, παθητικό οπτικό δίκτυο, πρόβλεψη, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, πολυστρωματικά δίκτυα, νευρωνικά δίκτυα γενικευμένης παλινδρόμησης, νευρωνικά δίκτυα ομαδικής διαχείρισης δεδομένων, εξελικτική θεωρία παιγνίων, ανάλυση διακλάδωσης, δυναμική των αντιγραφών, καθυστέρηση.

ABSTRACT

The tremendous growth of the mobile users' needs has paved the way for the introduction of the next generation mobile networks. As a result, mobile operators are forced to adopt the new communication standards in order to be able to satisfy their subscribers' needs. However, the high information rates that should be offered by the wireless access network can potentially create a bottleneck at the backhaul network, which was traditionally designed to support voice services. In order to overcome such situation, the convergence of the wireless access networks with a passive optical network at the backhaul has been proposed in the literature. The extremely high data rates that can be offered by the optical backhauling network can achieve the requirements of the 4G standard providing satisfactory Quality of Service (QoS) to the end-users. However, in this case there are many issues that have to be taken into consideration for the efficient allocation of the resources in the network. In particular, traditional methods of network planning, which are based on a worst case scenario, lead to a static and inefficient resource allocation, and thus, they cannot be implemented within a converged optical-wireless network.

In this context, this thesis studies the problem of the dynamic resource allocation at the backhaul network and proposes a distributed system for dynamic resource management that can address the needs of the next generation mobile networks. In particular, an intelligent agent, which uses machine learning techniques in order to estimate the forthcoming demand at the Base Station and proactively request the commitment of the appropriate resources, is developed. Specifically, the proposed system monitors and collects the necessary traffic statistics of the backhaul network, and based on the collected data, it calculates the appropriate resources in order to create a service level agreement between the mobile operator and the operator of the passive optical network.

All the appropriate functions that allow the dynamic resource management are described. In particular, more effort is given to the forecasting process, which consist the basic functionality of the proposed system. Specifically, the performance of different machine learning techniques is investigated and issues that contribute to the optimization of the system's functionality are studied both at a practical and a theoretical level. Furthermore, apart from the forecasting process, which aims to the creation of a service level agreement, the short-term forecasting process is also studied. It uses a combination of machine learning techniques and time series analysis and its scope is to address the unexpected variations in the network traffic. Based on the forecasting results, useful conclusions about the operation and the performance of the system are extracted.

Finally, the resource management problem at the backhaul network is studied using evolutionary game theory. Specifically, the problem is studied at the side of the

Base Station, where the interactions between the Base Station and its subscribers are properly modeled, and at the side of the optical network, where different mobile operators share a common backhaul infrastructure and compete for its resources. The interactions between the players are modeled using replicator dynamics and the stability of the system is proven. The proposed schemes are validated through simulation results.

Keywords: Backhaul network, dynamic resource management, next generation networks, passive optical network, forecasting, artificial neural networks, multilayer perceptron, general regression neural networks, group method of data handling neural network, evolutionary game theory, bifurcation analysis, replicator dynamics, delay.

Κατάλογος Συντμήσεων

AIR	:	Assured Information Rate
Alloc-ID	:	Allocation ID
CIR	:	Committed Information Rate
DBA	:	Dynamic Bandwidth Allocation
EPON	:	Ethernet Passive Optical Network
FFT	:	Fast Fourier Transformation
FIR	:	Fixed Information Rate
GBR	:	Guaranteed Bit Rate
GMDH	:	Group Method for Data Handling
GPON	:	Gigabit Passive Optical Network
GRNN	:	General Regression Neural Network
GSM	:	Global System for Mobile communications
HSDPA	:	High Speed Downlink Packet Access
HSUPA	:	High Speed Uplink Packet Access
ITU	:	International Telecommunication Union
KPI	:	Key Performance Indicator
LTE	:	Long Term Evolution
MAPE	:	Mean Absolute Percentage Error
MIR	:	Maximum Information Rate
MLP	:	Multilayer Perceptron
NGMN	:	Next Generation Mobile Networks
OLT	:	Optical Line Terminal
ONU	:	Optical Network Unit
PIR	:	Peak Information Rate
PNN	:	Polynomial Neural Network
PON	:	Passive Optical Network
QCI	:	Quality Class Indicator
RSD	:	Relative Standard Deviation
SLA	:	Service Level Agreement
SNMP	:	Simple Network Management Protocol
T-CONT	:	Transmission Container
UMTS	:	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	:	Wideband Code Division Multiple Access
XML	:	Extensible Markup Language

Γλωσσάριο Όρων

10 αναδιπλώσεις διασταυρωμένης επικύρωσης	:	10-fold cross validation
Ανάλυση διακλάδωσης	:	Bifurcation analysis
Ασύμμετρα παίγνια	:	Asymmetric games
Διασφαλισμένος ρυθμός πληροφορίας	:	Assured information rate
Δίκτυο πρόσβασης	:	Access network
Δυσμενές σενάριο	:	Worst case scenario
Εκχωρημένος ρυθμός μετάδοσης	:	Committed information rate
Εξελικτικά ευσταθής στρατηγική	:	Evolutionary stable strategy
Ευφυής πράκτορας	:	Intelligent agent
Ζεύξη ανόδου	:	Uplink
Ζεύξη καθόδου	:	Downlink
Ιακωβιανή μήτρα	:	Jacobian matrix
Μέγιστος ρυθμός μετάδοσης	:	Peak information rate
Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα	:	Mean absolute percentage error
Μη διασφαλισμένος ρυθμός πληροφορίας	:	Non-assured information rate
Νευρωνικό δίκτυο γενικευμένης παλινδρόμησης	:	General regression neural network
Νευρωνικό δίκτυο ομαδικής μεθόδου διαχείρισης δεδομένων	:	Group method for data handling neural network
Οπισθοζευκτικό δίκτυο	:	Backhaul network
Παθητικό οπτικό δίκτυο	:	Passive optical network
Πάροχος κινητών επικοινωνιών	:	Mobile operator
Περιγραφέας κίνησης	:	Traffic descriptor
Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο	:	Multilayer perceptron neural network
Ροή ανόδου	:	Upstream
Ροή καθόδου	:	Downstream
Σημείο συμφόρησης	:	Bottleneck
Σταθερός ρυθμός πληροφορίας	:	Fixed information rate
Σταθμός βάσης	:	Base station
Συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας	:	Service level agreement
Συγκελκλιμένα οπτικά-ασύρματα δίκτυα	:	Converged optical-wireless networks
Σχέση ανταλλαγής	:	Tradeoff
Σχετική τυπική απόκλιση	:	Relative standard deviation
Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	:	Artificial neural networks
Τιμές διακλάδωσης	:	Bifurcation values
Χιλιοστομετρικά κύματα	:	Millimeter waves

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό εισάγει τον αναγνώστη στα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών και στις απαιτήσεις που τα χαρακτηρίζουν. Βασικός σκοπός του κεφαλαίου είναι να θέσει τα θεμέλια και να τεκμηριώσει το αντικείμενο που διαπραγματεύεται η παρούσα διατριβή.

Αρχικά, περιγράφεται με συνοπτικό τρόπο η ιστορική εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών και παρουσιάζονται οι μελλοντικές τάσεις, οι οποίες αναμένεται να δραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην περαιτέρω εξέλιξή τους. Επίσης, γίνεται αναφορά στις απαιτήσεις των χρηστών που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο πρόσβασης και στον τρόπο με τον οποίο αυτές ικανοποιούνται στο πλαίσιο των νέων δικτύων LTE. Τέλος, αφού έχουν θιγεί όλα τα σχετικά ζητήματα, περιγράφεται το αντικείμενο της διατριβής, και παρατίθενται, ενδεικτικά, οι σχετικές εργασίες από τη βιβλιογραφία.

1.1 Εξέλιξη των Ασύρματων Δικτύων Κινητών Επικοινωνιών

Τα ασύρματα δίκτυα κινητών επικοινωνιών έχουν επικρατήσει πλέον στη σύγχρονη κοινωνία, καθιστώντας την καθημερινή τους χρήση αναπόσπαστο κομμάτι στις ζωές των πολιτών. Η εμφάνισή τους έγινε στα μέσα του προηγούμενου αιώνα και η εξέλιξή τους ήταν ραγδαία.

Τις δεκαετίες του 1950 και 1960 εμφανίστηκαν τα πρώτα αναλογικά συστήματα κινητών επικοινωνιών, χωρίς όμως κάποια ιδιαίτερη επιτυχία [66]. Στις αρχές της δεκαετίας του 1980, εμφανίζονται για πρώτη φορά τα κυψελωτά συστήματα κινητών επικοινωνιών 1ης γενιάς (1G), όπως το NMT (Nordic Mobile Telephone) στη βόρεια Ευρώπη και τη Σαουδική Αραβία, το C-Netz στη Γερμανία, τη Πορτογαλία και τη Νότια Αφρική, το TACS (Total Access Communication System) στο Ηνωμένο Βασίλειο και το AMPS (Analog Advanced Mobile Phone System) στην Αμερική. Το βασικό χαρακτηριστικό όλων των παραπάνω συστημάτων είναι ότι αποτελούν αναλογικά συστήματα επικοινωνιών και δεν υποστηρίζουν τη δυνατότητα περιαγωγής (roaming). Στη συνέχεια, στις αρχές της δεκαετίας του 1990 εμφανίστηκαν τα πρώτα ψηφιακά συστήματα κινητών επικοινωνιών που αποτέλεσαν τα δίκτυα 2ης γενιάς (2G). Η ψηφιοποίηση των συστημάτων επικοινωνιών επέτρεψε τη βελτίωση της ποιότητας ως προς τη φωνή καθώς και τη χρήση της υπηρεσίας σύντομων μηνυμάτων SMS (Short Message Service). Σε αντίθεση με τα συστήματα 1ης γενιάς όπου παρατηρήθηκαν ποικίλες τεχνολογίες,

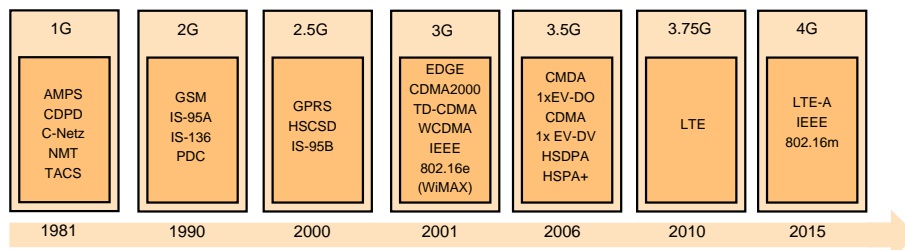
το GSM (Global System for Mobile communications) που παρουσιάστηκε το 1991, και είχε ως σκοπό τη δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού συστήματος κινητών επικοινωνιών, κυριάρχησε στα συστήματα επικοινωνιών 2ης γενιάς. Στην αρχική του μορφή, το GSM παρείχε υπηρεσίες φωνής και σύντομων μηνυμάτων SMS με χρήση μεταγωγής κυκλώματος. Άλλες τεχνολογίες 2ης γενιάς που αναπτύχθηκαν αποτελούν τα IS-136, γνωστό και ως D-AMPS (Digital AMPS), το IS-95A γνωστό ως CDMAone που χρησιμοποιήθηκε κυρίως στην Αμερική και το PDC (Personal Digital Cellular) που χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά στην Ιαπωνία.

Η εξέλιξη των δικτύων 2G ονομάστηκε 2.5G και εισήγαγε τη χρήση υπηρεσιών μεταγωγής πακέτου, επιπροσθέτως των υπηρεσιών μεταγωγής κυκλώματος (υπηρεσίες φωνής). Οι κύριες τεχνολογίες 2.5G είναι το GPRS (General Packet Radio Service) και το IS-95B που αποτελούν εξέλιξη του GSM και του IS-95A, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, ακολούθησαν το EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) και το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Το UMTS βασίζεται σε CDMA (Code Division Multiple Access) πολυπλεξία και χρησιμοποιεί WCDMA (Wideband-CDMA) και TD-CDMA (Time Division - CDMA) σχήματα κωδικοποίησης. Το UMTS υιοθετήθηκε στις χώρες στις οποίες είχε επικρατήσει το σύστημα GSM, καθώς και στην Ιαπωνία με την ονομασία FOMA (Freedom of Mobile Multimedia Access). Αντίπαλο σύστημα του UMTS αποτέλεσε το CDMA2000, το οποίο είναι εξέλιξη του IS-95, και επικράτησε στην Αμερική και στην Κορέα.

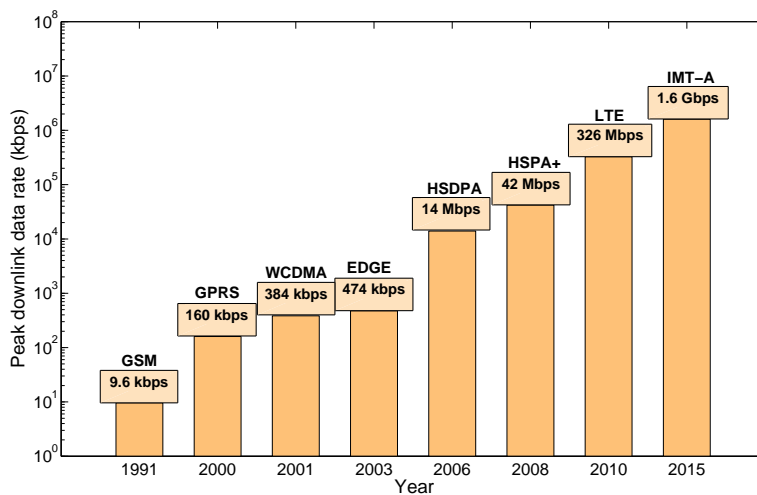
Συνέχεια της εξέλιξης των συστημάτων κινητών επικοινωνιών αποτέλεσε το HSPA (High Speed Packet Access) σύστημα, που περιλαμβάνει το HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) και το HSUPA (High Speed Uplink Packet Access). Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται ως 3.5G παρέχοντας μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Το HSPA βασίζεται στο WCDMA καθιστώντας το έτσι συμβατό με το UMTS σύστημα. Έπειτα από την εμφάνιση του HSPA ακολούθησε το HSPA+, προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Αντίστοιχα, η εξέλιξη του CDMA2000 συντελέστηκε με τα συστήματα 1xEV-DO και 1xEV-DV.

Ακόλουθο σημείο στην εξελικτική πορεία των συστημάτων κινητών επικοινωνιών αποτέλεσε η εμφάνιση των συστημάτων LTE (Long Term Evolution) το 2010. Στόχος του LTE είναι η αύξηση της επίδοσης του συστήματος προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης με χαμηλότερο κόστος. Εξαιτίας του γεγονότος ότι το σύστημα LTE σχεδιάστηκε από το μηδέν, δεν είναι συμβατό με το UMTS. Τα συστήματα LTE χαρακτηρίζονται ως 3.75G και αποτελούν ένα σημαντικό βήμα προς την εμφάνιση των δικτύων 4G (LTE-Advanced και IEEE 802.16m) τα οποία θα είναι πλήρως συμβατά με το πρότυπο IMT-Advanced που έχει θέσει η ITU-R.

Η εξέλιξη των κινητών συστημάτων επικοινωνιών που περιγράφηκε παραπάνω, συνοψίζεται στο Σχήμα 1.1, ενώ στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης της ζεύξης καθόδου για τα συστήματα αυτά.



Σχήμα 1.1: Εξέλιξη των ασύρματων συστημάτων επικοινωνίας.



Σχήμα 1.2: Μέγιστοι ρυθμοί μετάδοσης ζεύξης καθόδου για τα έτη 1990-2015.

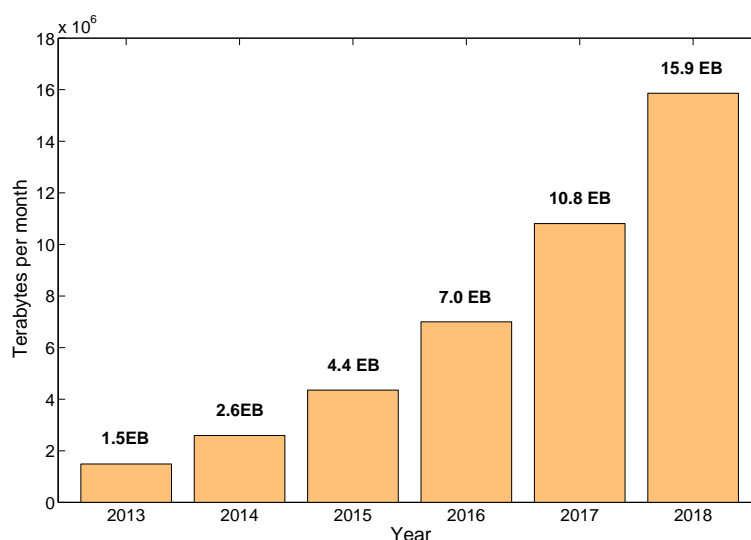
1.2 Τάσεις της Αγοράς

Οι κύριοι παράγοντες οι οποίοι επηρέασαν και επηρεάζουν την ανάπτυξη των συστημάτων κινητών επικοινωνιών είναι τρεις: κοινωνικοί, οικονομικοί και πολιτικοί. Οι απαιτήσεις των καταναλωτών, οι οικονομικές επιδόσεις των παρόχων κινητών επικοινωνιών καθώς και οι κυβερνητικές πολιτικές επηρεάζουν άμεσα την τεχνολογική εξέλιξη και τα κεφάλαια που επενδύονται σε αυτή. Αρχικά, κινητήριο παράγοντα στην εξέλιξη των δικτύων αποτέλεσε η ραγδαία αύξηση του αριθμού των συνδρομητών. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 ο αριθμός των συνδρομητών ήταν περίπου 5 εκατομμύρια, ενώ σε μια δεκαετία ο αριθμός αυτός άγγιξε τα 500 εκατομμύρια. Η ραγδαία αύξηση των συνδρομητών ευνοήθηκε και από την τεχνολογική πρόοδο στη μικροηλεκτρονική, η οποία επέτρεψε τη δημιουργία φθηνότερων κινητών τερματικών. Η ραγδαία αύξηση του αριθμού των συνδρομητών συνεχίστηκε, και το 2002 ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας ξεπέρασε τον αριθμό των συνδρομητών σταθερής τηλεφωνίας [66].

Αποτέλεσμα της συνεχούς αυτής αύξησης ήταν ο αριθμός των συνδρομητών να οδηγηθεί σύντομα στον κορεσμό στις ανεπτυγμένες χώρες. Για το λόγο αυτό, και προκειμένου οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών (mobile operators) να διατηρήσουν τα κέρδη τους, συντελέστηκε μια προσπάθεια δημιουργίας νέων υπηρεσιών διαθέσιμων στα κινητά τερματικά. Τέτοιες υπηρεσίες είναι τα κοινωνικά δίκτυα, οι υπηρεσίες βασισμένες στη θέση του συνδρομητή, το βίντεο κατ' απαίτηση, τα διαδραστικά παιχνίδια, η υψηλής ποιότητας μουσική, κτλ. Οι υπηρεσίες αυτές χαρακτηρίζονται ως ρυθμοβόρες και οδηγούν σε μια εκρηκτική αύξηση της ζήτησης δεδομένων από τους συνδρομητές, και στην αντίστοιχη διασφάλιση των κερδών για τους παρόχους [66].

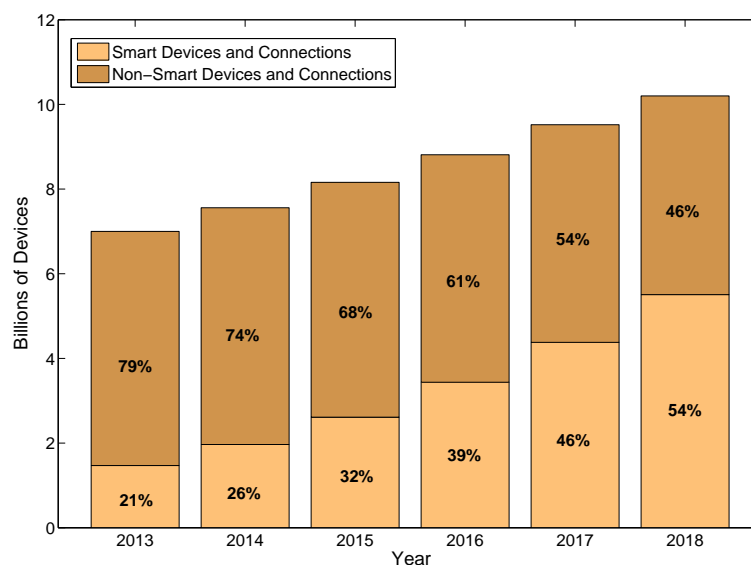
Σύμφωνα με μια πρόσφατη μελέτη της Cisco [12], το ποσοστό αύξησης της κίνησης των δεδομένων κινητών επικοινωνιών το 2013 έφτασε το 81%, με την κίνηση σε απόλυτα νούμερα να υπολογίζεται σε 1.5 exabytes ανά μήνα κατά τα τέλη του 2013, εν αντιθέσει με 820 petabytes που ήταν το 2012. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, η αύξηση της ζήτησης αναμένεται να συνεχιστεί, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 1.3, και να φτάσει τα 15.9 exabytes ανά μήνα το 2018.

Κύρια συνεισφορά στην αύξηση της ζήτησης των δεδομένων έχει διαδραματίσει η αύξηση του αριθμού των κινητών τερματικών. Το 2013 ο αριθμός των συσκευών και των αντίστοιχων συνδέσεων έφτασε τα 7 δισεκατομμύρια. Η αύξηση του αριθμού των



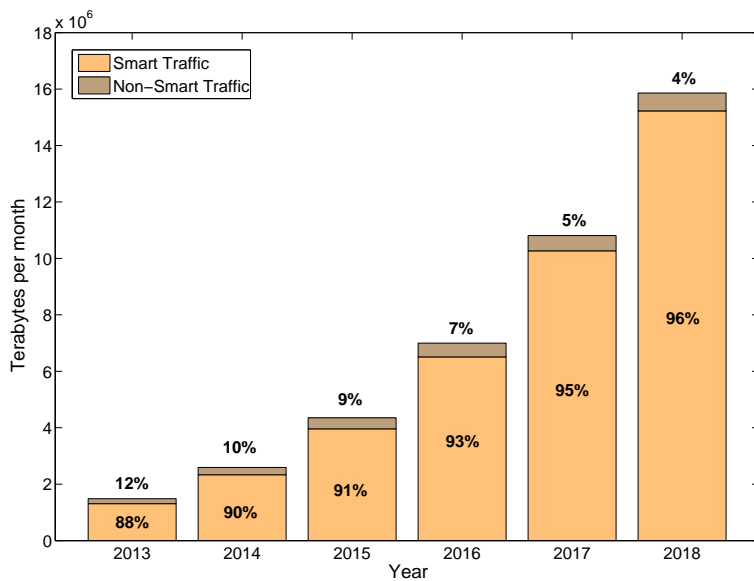
Σχήμα 1.3: Πρόβλεψη όγκου δεδομένων κινητών επικοινωνιών.

συσκευών δεν είναι ομοιόμορφη, αλλά παρατηρείται μια τάση προς τα «έξυπνα» τεματικά (Σχήμα 1.4). Η κίνηση που προέρχεται από τα «έξυπνα» τεματικά αντιστοιχούσε στο 88% της κίνησης το 2013, και αναμένεται το ποσοστό αυτό να φτάσει το 96% το 2018, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.5 [12].

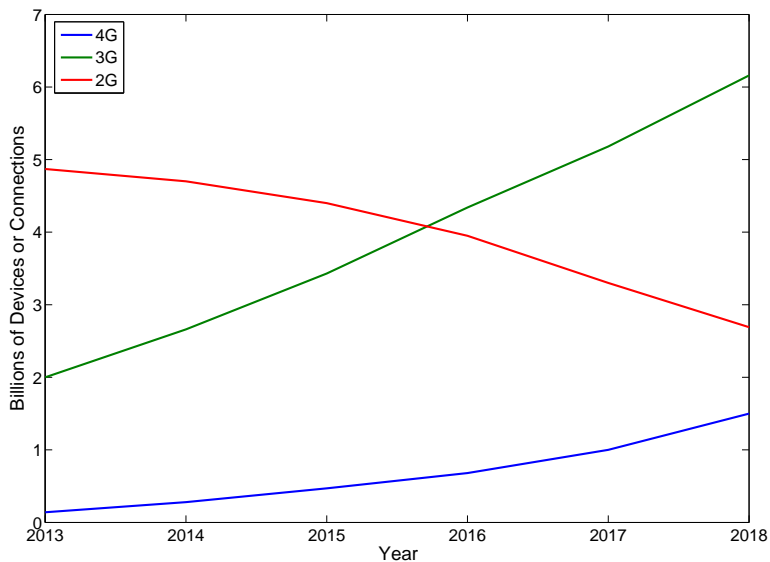


Σχήμα 1.4: Πρόβλεψη αριθμού έξυπνων κινητών συσκευών και συνδέσεων.

Καθίσταται, λοιπόν, σαφές ότι η εκρηκτική αύξηση των ρυθμοβόρων εφαρμογών των κινητών τεματικών, καθώς και η απαίτηση για βέλτιστη διαχείριση του εύρους ζώνης οδηγούν στην ανάγκη υιοθέτησης των συστημάτων επικοινωνιών 4G προκειμένου οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών να αντεπεξέλθουν στην αυξανόμενη ζήτηση δεδομένων και να προσφέρουν γρήγορη συνδεσιμότητα εν κινήσει. Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται πως προβλέπεται να εξελιχθεί η μετάβαση από τα συστήματα 2G στα συστήματα 3G και 4G.








Σχήμα 1.5: Επίδραση των έξυπνων κινητών συσκευών στην αύξηση της συνολικής κίνησης.



Σχήμα 1.6: Πρόβλεψη αριθμού κινητών συσκευών ανά τύπο δικτύου.

Χαρακτηριστικό γεγονός αποτελεί ότι ενώ το 2013 τα συστήματα 3G και 3.5G ευθύνονταν για το 60% της κίνησης και τα συστήματα 4G για το 30%, το 2018 η κατάσταση αναμένεται να αλλάξει και τα ποσοστά εκτιμώνται ότι θα φτάσουν το 46% και το 51%, αντίστοιχα, παρόλο που το μερίδιο των συνδέσεων 4G θα είναι μόλις 15%.

Τα «έξυπνα» κινητά τερματικά, τα πινακίδια (tablets) καθώς και οι φορητοί υπολογιστές αποτελούν τις κύριες γεννήτριες κίνησης σε ένα δίκτυο κινητών επικοινωνιών, καθώς προσφέρουν στους συνδρομητές δυνατότητες που δεν υποστηρίζονταν από συσκευές παλαιότερης γενιάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένα «έξυπνο» κινητό τερματικό παράγει την ίδια κίνηση που δημιουργούν 49 συμβατικά κινητά τερματικά, ενώ ένας φορητός υπολογιστής δημιουργεί κίνηση που αντιστοιχεί σε 227 συμβατικά κινητά τερματικά, όπως εξηγείται στο Σχήμα 1.7.

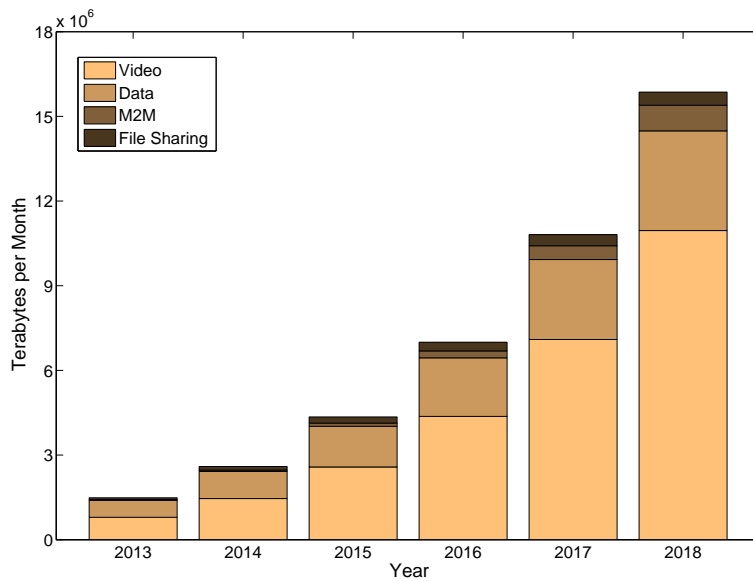
M2M Module	=	6 x	
Wearable Device	=	7 x	
Smartphone	=	49 x	
Tablet	=	127 x	
Laptop	=	227 x	

Σχήμα 1.7: Αντιστοίχιση κίνησης συσκευών υψηλών προδιαγραφών σε κίνηση που δημιουργείται από συμβατικές κινητές συσκευές.

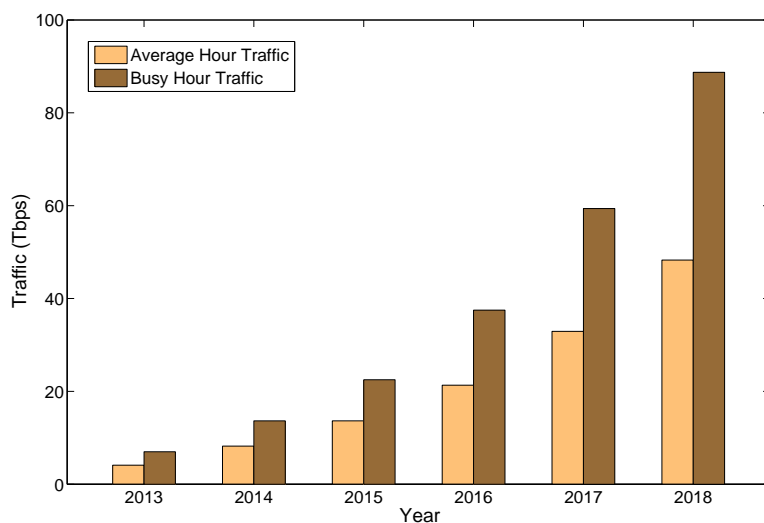
Κύρια συνεισφορά στην αύξηση της ζήτησης των δεδομένων αναμένεται να διαδραματίσουν οι υπηρεσίες βίντεο, οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης. Συγκεκριμένα, το 2018 εκτιμάται ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιούν οι υπηρεσίες βίντεο θα αντιστοιχούν στο 69% της κίνησης, το οποίο σε απόλυτα νούμερα αντιστοιχεί σε 11 exabytes ανά μήνα. Κύριο χαρακτηριστικό της κίνησης βίντεο αποτελεί το γεγονός ότι το μεγαλύτερο μέρος της παράγεται συγκεκριμένες ώρες της ημέρας, κυρίως απογευματινές, εν αντιθέσει με την υπόλοιπη κίνηση που εκτείνεται καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Η αύξηση της κίνησης που οφείλεται σε υπηρεσίες βίντεο σε συνδυασμό με το παραπάνω χαρακτηριστικό οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το μέγιστο προς μέσο (peak-to-average) ποσοστό της κίνησης θα αυξηθεί. Επομένως, η κίνηση τις ώρες αιχμής αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό σε σχέση με τη μέση κίνηση και συγκεκριμένα αναμένεται να είναι 83% μεγαλύτερη το 2018, σε αντίθεση με το 2013 που ήταν 66%.

1.3 Χαρακτηριστικά Ποιότητας Υπηρεσίας Δικτύου Πρόσβασης

Ο πάροχος κινητών επικοινωνιών, από τη μεριά του, καλείται να καλύψει τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες των συνδρομητών του, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προσφέροντας υψηλή ποιότητα υπηρεσίας. Κύριο χαρακτηριστικό των απαιτήσεων των



Σχήμα 1.8: Πρόβλεψη κίνησης δεδομένων ως προς τον τύπο της υπηρεσίας.



Σχήμα 1.9: Πρόβλεψη εξέλιξης κίνησης ωρών αιχμής και μέσης κίνησης.

Υπηρεσία	Προσδοκία Εμπειρίας Χρήστη	Χαρακτηριστικά Επίδοσης
Διαδίκτυο	Χαμηλή - Βέλτιστης προσπάθειας	Μεταβαλλόμενη κατανάλωση εύρους ζώνης. Ανεκτή σε καθυστέρηση και απώλειες.
Εταιρικές Υπηρεσίες	Υψηλή - Κρίσιμα δεδομένα	Υψηλή κατανάλωση εύρους ζώνης. Υψηλή ευαισθησία σε καθυστέρηση. Υψηλή ασφάλεια.
Ομότιμες Υπηρεσίες	Χαμηλή - Βέλτιστης προσπάθειας	Πολύ υψηλή κατανάλωση εύρους ζώνης. Ανεκτή σε καθυστέρηση και απώλειες.
Υπηρεσίες Φωνής	Υψηλή - Χαμηλή καθυστέρηση και διακύμανση αυτής	Χαμηλή κατανάλωση εύρους ζώνης. Καθυστέρηση <150ms και διακύμανση καθυστέρησης <30ms.
Υπηρεσίες Βίντεο	Υψηλή - Χαμηλή διακύμανση καθυστέρησης και μηδενικές απώλειες πακέτων	Υψηλή κατανάλωση εύρους ζώνης. Ευαισθησία ως προς τις απώλειες πακέτων.
Διαδραστικές Υπηρεσίες και Παιχνίδια	Υψηλή - Χαμηλή απώλεια πακέτων	Μεταβαλλόμενη κατανάλωση εύρους ζώνης. Καθυστέρηση <150ms και διακύμανση καθυστέρησης <30ms.

Πίνακας 1.1: Συνοπτικός πίνακας χαρακτηριστικών επίδοσης ανά τύπο υπηρεσίας.

συνδρομητών αποτελεί η ετερογένεια των αναγκών τους. Οι διαφορετικές υπηρεσίες που εξυπηρετεί ο πάροχος χαρακτηρίζονται από διαφορετικές απαιτήσεις επίδοσης του δικτύου και επηρεάζουν αντίστοιχα την ποιότητα υπηρεσίας που αντιλαμβάνεται ο χρήστης. Για παράδειγμα, υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ υπηρεσιών πραγματικού χρόνου, όπως είναι η συνομιλία μέσω βίντεο και οι υπηρεσίες φωνής σε σχέση με τις υπηρεσίες βέλτιστης προσπάθειας, όπως είναι η περιήγηση στο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα, οι υπηρεσίες πραγματικού χρόνου πρέπει να δεσμεύουν ένα ελάχιστο ποσό εγγυημένου εύρους ζώνης και είναι πιο ευαίσθητες ως προς τις απώλειες και την καθυστέρηση. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι απαιτήσεις επίδοσης για διάφορα είδη υπηρεσιών [36].

Η ετερογένεια των απαιτήσεων δεν είναι μόνο χαρακτηριστικό των διαφορετικών χρηστών του δικτύου, αλλά και του ίδιου του χρήστη, ο οποίος μπορεί παράλληλα να χρησιμοποιεί παραπάνω από μια υπηρεσίες, όπως για παράδειγμα υπηρεσίες FTP και υπηρεσίες κλήσης βίντεο, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Για την εξυπηρέτηση των ετερογενών αναγκών των χρηστών, τα δίκτυα LTE χρησιμοποιούν κατάλληλους κομιστές (Evolved Packet System Bearers). Οι κομιστές αυτοί παρέχουν είτε εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης (Guaranteed bit rate - GBR) για τον οποίο διατίθενται μόνιμα οι κατάλληλοι πόροι, είτε μη εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης (non-GBR), ο οποίος χρησιμοποιείται για εφαρμογές όπως η περιήγηση στο διαδίκτυο, και δεν εκχωρούνται μόνιμα πόροι στον κομιστή [3].

Στην πλευρά του δικτύου πρόσβασης (access network), αποτελεί ευθύνη του ίδιου του Σταθμού Βάσης (Base Station) να διασφαλίσει την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσίας προς τους συνδρομητές με τη χρήση κατάλληλων κομιστών. Κάθε κομιστής συνδέεται με ένα δείκτη κλάσης ποιότητας υπηρεσίας (Quality Class Indicator - QCI). Οι κλάσεις ποιότητας υπηρεσίας έχουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αφορούν την προτεραιότητα, την καθυστέρηση και την απώλεια πακέτων, και έχουν προτυποποιηθεί προκειμένου να υπάρχει κοινή αντίληψη μεταξύ των κατασκευαστών του εξοπλισμού για τον τρόπο διαχείρισης της κίνησης [3]. Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι προτυποποιημένες

QCI	Είδος Πόρων	Προτεραιότητα	Καθυστερήση (ms)	Ρυθμός Απώλειας Πακέτων	Παραδείγματα Υπηρεσιών
1	Εγγυημένος ρυθμός	2	100	10^{-2}	Τηλεφωνική κλήση
2	Εγγυημένος ρυθμός	4	150	10^{-3}	Κλήση Βίντεο
3	Εγγυημένος ρυθμός	5	300	10^{-6}	Άνευ συνδιάλεξης βίντεο συνεχούς ροής με χρήση καταχωρητή
4	Εγγυημένος ρυθμός	3	50	10^{-3}	Παιχνίδια πραγματικού χρόνου
5	Μη εγγυημένος ρυθμός	1	100	10^{-6}	Σηματοδοσία
6	Μη εγγυημένος ρυθμός	7	100	10^{-3}	Φωνής. Βίντεο συνεχούς ροής πραγματικού χρόνου. Διαδραστικά παιχνίδια
7	Μη εγγυημένος ρυθμός	6	300	10^{-6}	Βίντεο συνεχούς ροής με χρήση καταχωρητή
8	Μη εγγυημένος ρυθμός	8	300	10^{-6}	Υπηρεσίες TCP, FTP, e-mail, p2p διαμοιρασμός αρχείων
9	Μη εγγυημένος ρυθμός	9	300	10^{-6}	

Πίνακας 1.2: Πίνακας προτυποποιημένων κλάσεων ποιότητας υπηρεσίας δικτύων LTE.

κλάσεις υπηρεσίας των δικτύων LTE.

1.4 Αντικείμενο της Διατριβής

Σύμφωνα με όσα διατυπώθηκαν παραπάνω, οι απαιτήσεις των χρηστών αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό και οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών οδεύουν προς την υιοθέτηση των συστημάτων 4G ώστε να ικανοποιήσουν αυτή τη ζήτηση. Από τη μεριά τους, οι πάροχοι, προκειμένου να επιτύχουν τους ρυθμούς μετάδοσης και τις υπόλοιπες απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν τα συστήματα 4G, έρχονται αντιμέτωποι με την ανάγκη για νέες καινοτόμες λύσεις διαχείρισης των πόρων.

Η αλματώδης αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου πρόσβασης, προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των συνδρομητών, απαιτεί μια ανάλογη αύξηση της χωρητικότητας του οπισθοζευκτικού δικτύου (backhaul network). Παραδοσιακά, το οπισθοζευκτικό δίκτυο είχε σχεδιαστεί για τις υπηρεσίες φωνής και δεν είναι ικανό να ανταπεξέλθει στις ανάγκες των δικτύων νέας γενιάς. Προς αυτή την κατεύθυνση, η σύγκλιση του ασύρματου δικτύου πρόσβασης με ένα οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο θεωρείται ως η πιο αποδοτική λύση για την εξυπηρέτηση τόσο των υπάρχουσών όσο και των μελλοντικών αναγκών των συνδρομητών [63].

Στη βάση αυτού του νέου αρχιτεκτονικού πλαισίου, ο πάροχος κινητών επικοινωνιών καλείται να διαχειριστεί τους διαθέσιμους πόρους με αποδοτικό τρόπο, παρέχοντας παράλληλα υψηλή ποιότητα υπηρεσίας προς τους τελικούς χρήστες. Παραδοσιακά ο σχεδιασμός του δικτύου και η κατανομή των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου βασιζόταν σε ανάλυση με υπολογιστικά φύλλα και γινόταν ξεχωριστά για κάθε κυψέλη οδηγώντας στην πρόβλεψη της αναμενόμενης κίνησης. Τέτοιες μέθοδοι απαιτούν

αρκετή προετοιμασία και συνήθως δεν λαμβάνουν υπόψη τους την κατάσταση των γειτονικών κυψελών, ενώ η επιτυχία τους και η ακρίβεια της πρόβλεψης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ικανότητα και την εμπειρία του μηχανικού που κάνει την ανάλυση [17]. Σημαντικό μειονέκτημα αυτών των μεθόδων αποτελεί το γεγονός ότι το αποτέλεσμα της διαδικασίας οδηγεί στην εκχώρηση των πόρων με στατικό τρόπο. Για το λόγο αυτό, οι παραπάνω μέθοδοι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα δίκτυα 4G, καθώς θα καθιστούσαν την ανάπτυξή τους ασύμφορη. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ένας Σταθμός Βάσης LTE που εξυπηρετεί τρεις τομείς, απαιτεί χωρητικότητα της τάξης του 1 Gbps για το οπισθοζευκτικό δίκτυο [19], ενώ ένας αντίστοιχος Σταθμός Βάσης 4G αναμένεται να απαιτεί οπισθοζευκτικό δίκτυο με χωρητικότητα της τάξης των 5 Gbps.

Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις παραπάνω απαιτήσεις, η παρούσα διατριβή μελετάει τη δυναμική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου σε μια συγκεκλιμένη αρχιτεκτονική υποδομή, αξιοποιώντας τους διαθέσιμους μηχανισμούς ανάθεσης του εύρους ζώνης που προσφέρονται από τα οπτικά δίκτυα, και περιγράφει ένα σχήμα για την αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου με χρήση μεθόδων μηχανικής μάθησης. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η χρήση μεθόδων πρόβλεψης για την αποδοτική εκχώρηση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Επιπλέον, αξιολογείται η επίδοση διαφορετικών ειδών νευρωνικών δικτύων για την υλοποίηση της διαδικασίας της πρόβλεψης, και θίγονται σημαντικά διαχειριστικά ζητήματα ως προς τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος διαχείρισης πόρων.

1.5 Σχετικές Εργασίες

1.5.1 Διαχείριση πόρων οπισθοζευκτικού δικτύου

Το πρόβλημα της διαχείρισης των πόρων ενός Σταθμού Βάσης έχει απασχολήσει αρκετές ερευνητικές προσπάθειες και έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις προς αυτή την κατεύθυνση. Το μεγαλύτερο μέρος αυτών των εργασιών μελετάει το πρόβλημα στο ασύρματο μέσο προτείνοντας καινοτόμους αλγορίθμους για την αποδοτική εκχώρηση των πόρων.

Το πρόβλημα της διαστασιολόγησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου σε δίκτυα HSUPA μελετάται στην εργασία [47]. Οι Li et al. παρουσιάζουν τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαστασιολόγηση του εύρους ζώνης στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, και εξετάζουν την επίδραση που έχουν σε αυτή τα διαφορετικά μοντέλα κίνησης, ο αριθμός των συνδρομητών και οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας των χρηστών, θεωρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους. Προκειμένου να μελετήσουν την επίδραση αυτή, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν κατάλληλες προσομοιώσεις και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το εύρος ζώνης του οπισθοζευκτικού δικτύου εξαρτάται από την εκρηκτικότητα της ανθρωπιστικής κίνησης.

Στην εργασία [39], οι Kim et al. μελετούν τη χρήση τοπικών δικτύων συμπληρωματικά με τα κυψελωτά δίκτυα ως προς την κάλυψη μιας περιοχής. Συγκεκριμένα, ασχολούνται με το πρόβλημα της δικαιοσύνης μεταξύ των ροών της κίνησης των ζεύξεων ανόδου (uplink) και καθόδου (downlink) στο πρότυπο IEEE 802.11 και προτείνουν μια προσαρμοστική μέθοδο για την εκχώρηση των πόρων ανάλογα με τις μεταβολές του φορτίου της κίνησης. Για την αξιολόγηση της μεθόδου τους χρησιμοποιούν ανάλυση Markov και με τη χρήση κατάλληλων προσομοιώσεων αποδεικνύουν τη βελτίωση της χρησιμοποίησης του συστήματος μειώνοντας την πιθανότητα της σύγκρουσης πλαισίων.

Το πρόβλημα της εκχώρησης πόρων σε κόμβους αναμετάδοσης κυψελωτών δικτύων μελετάται στις εργασίες [52], [46] και [96]. Οι κόμβοι αναμετάδοσης χρησιμοποιούνται για την επέκταση της κάλυψης του δικτύου του παρόχου και επικοινωνούν με το Σταθμό Βάσης. Στην εργασία [52], οι συγγραφείς εξετάζουν το πρόβλημα της βέλτιστης διαχείρισης των πόρων σε κόμβους αναμετάδοσης που είναι τοποθετημένοι σε μέσα μεταφοράς και μοιράζονται από διαφορετικούς παρόχους χρησιμοποιώντας τη λύση διαπραγματεύσεως κατά Nash. Στην εργασία [46] εξετάζεται η περίπτωση που οι κόμβοι αναμετάδοσης χρησιμοποιούν διαφορετικά φέροντα για τη ζεύξη πρόσβασης και για την οπισθόζευξη και αναλύεται η επίδοση τριών διαφορετικών στρατηγικών εκχώρησης πόρων. Στην εργασία [96], οι Yi και Lei μελετούν την εκχώρηση των πόρων της ζεύξης καθόδου του οπισθοζευκτικού δικτύου και προτείνουν μια μέθοδο εκχώρησης που βασίζεται σε δύο βήματα. Αρχικά, υπολογίζεται η ζήτηση των πόρων για κάθε κόμβο αναμετάδοσης με βάση το μέγεθος του ενδιαμέσου καταχωρητή τους, όπως αυτός γίνεται γνωστός μέσω ανατροφοδότησης. Στη συνέχεια, γίνεται η εκχώρηση των πόρων με βάση τη ζήτηση από το προηγούμενο βήμα, ενώ παράλληλα, το σχήμα εκχώρησης προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τους χρησιμοποιούμενους πόρους για όλους τους κόμβους αναμετάδοσης ικανοποιώντας ταυτόχρονα τους περιορισμούς ως προς τη ζήτηση. Το προτεινόμενο σχήμα που παρουσιάζουν εμφανίζει βελτιωμένη επίδοση σε σχέση με άλλα σχήματα της βιβλιογραφίας, ενώ η υπολογιστική του πολυπλοκότητα είναι χαμηλή.

Το πρόβλημα της διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου παρουσιάζεται και στην εργασία [51], όπου εξετάζεται ένα οπισθοζευκτικό δίκτυο, το οποίο αποτελείται από πολλαπλούς κόμβους καθένας εκ των οποίων εξυπηρετεί μια πικοκυψέλη. Οι Marie et al. προκειμένου να επιτύχουν την αποδοτική εκχώρηση των πόρων στις πικοκυψέλες προτείνουν μια προσέγγιση διαχείρισης των πόρων, η οποία βασίζεται στη ζήτηση της κίνησης στις πικοκυψέλες και μεγιστοποιεί μια συνάρτηση οφέλους, η οποία χαρακτηρίζει κάθε μια από αυτές.

Τη χρήση γνωστικών στρατηγικών για την εκχώρηση των πόρων σε ένα ασύρματο οπισθοζευκτικό δίκτυο πολλαπλών βημάτων, μελετούν οι Zhao και Grace στην εργασία [100]. Προκειμένου να ενισχύσουν την απόδοση χρήσης του φάσματος και για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας προτείνουν μια πολιτική δυναμικής επιλογής καναλιών από τους Σταθμούς Βάσης που στηρίζεται στις πληροφορίες παρεμβολών που αποκτώνται από τη διαδικασία ανίχνευσης του φάσματος.

Η παιγνιοθεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος εκχώρησης παρουσιάζεται στις εργασίες [78],[102] και [103]. Συγκεκριμένα, στην εργασία [78], οι συγγραφείς αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εκχώρησης του εύρους ζώνης ως ένα πρόβλημα ανταγωνισμού, σύμφωνα με το οποίο οι χρήστες ανταγωνίζονται για το εύρος ζώνης του Σταθμού Βάσης και κατέχουν ένα συγκεκριμένο ποσό πλούτου το οποίο διαθέτουν για τις προσφερόμενες υπηρεσίες. Προκειμένου να αγοράσουν το εύρος ζώνης, οι χρήστες καταθέτουν προσφορές στους Σταθμούς Βάσης, οι οποίοι, εν τέλει, κατανέμουν το εύρος ζώνης σε αντιστοιχία με τις προσφορές των χρηστών. Οι συγγραφείς μελετούν τις ιδιότητες της ισορροπίας κατά Nash για το συγκεκριμένο παίγνιο και αποδεικνύουν την ύπαρξη και τη μοναδικότητα της για την περίπτωση που κάθε χρήστης έχει πρόσβαση σε όλους τους Σταθμούς Βάσης. Επιπλέον, μελετούν και την πιο ρεαλιστική περίπτωση όπου οι χρήστες έχουν περιορισμένη πρόσβαση στους Σταθμούς Βάσης και καταλήγουν στο συμπέρασμα της ύπαρξης max-min δικαιοσύνης ως προς την εκχώρηση του εύρους ζώνης, με την υπόθεση ότι ο αριθμός των χρηστών αυξάνεται, ενώ ο αριθμός των Σταθμών Βάσης παραμένει σταθερός.

Η δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης μελετάται στις εργασίες [102] και [103] των Zhu et al. με τη χρήση εξελικτικής θεωρίας παιγνίων (evolutionary game theory). Συγκεκριμένα στην εργασία [102], οι συγγραφείς διαχωρίζουν το πρόβλημα σε δύο διαφορετικά παίγνια. Αρχικά, μοντελοποιούν τη δυναμική επιλογή των υπηρεσιών από τους χρήστες σαν ένα εξελικτικό παίγνιο εφαρμόζοντας τη δυναμική των αντιγραφών (replicator dynamics), και στη συνέχεια, με βάση το αποτέλεσμα του παιγνίου διαμορφώνουν ένα νέο διαφορικό παίγνιο εκχώρησης πόρων που μοντελοποιεί τον ανταγωνισμό μεταξύ των διαφορετικών παρόχων υπηρεσίας. Λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική επιλογή υπηρεσιών από τους χρήστες, οι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να εκχωρήσουν το εύρος ζώνης με βέλτιστο τρόπο προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους. Στην εργασία αυτή, θεωρούν στρατηγικές ανοιχτού βρόχου οι οποίες δεν απαιτούν πληροφορίες ανάδρασης, και ανάγουν το πρόβλημα από τη μεριά των παρόχων σε ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου, μελετώντας ταυτόχρονα την περίπτωση της συνεργατικής και της μη συνεργατικής διαδικασίας εκχώρησης από τους παρόχους. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι το σημείο ισορροπίας κατά Nash μεγιστοποιεί την κοινωνική ευημερία (social welfare).

Μια επέκταση του παραπάνω προβλήματος, παρουσιάζεται από τους ίδιους συγγραφείς στην εργασία [103], όπου περιγράφεται το πρόβλημα της δυναμικής εκχώρησης του εύρους ζώνης υπό καθεστώς αβεβαιότητας. Συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση του ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών για τις παρεχόμενες υπηρεσίες γίνεται με τη χρήση της δυναμικής των αντιγραφών, όπου η τυχαία μη λογική επιλογή των χρηστών αποτυπώνεται σαν μια στοχαστική διατάραξη στην εξέλιξη της κατανομής της επιλογής των υπηρεσιών. Από τη μεριά των παρόχων υπηρεσιών, το πρόβλημα της εκχώρησης εύρους ζώνης μοντελοποιείται ως ένα στοχαστικό διαφορικό παίγνιο και μελετάται η περίπτωση των στρατηγικών κλειστού βρόχου, όπου χρησιμοποιούνται πληροφορίες ανάδρασης για τη ρύθμιση της διαδικασίας ελέγχου. Η επίλυση αυτού του προβλήματος είναι ένα Μαρκοβιανό τέλειο (perfect) σημείο ισορροπίας Nash. Τέλος, εκτός από τη διαδικασία της μη συνεργατικής εκχώρησης εύρους ζώνης, μελετάται και η περίπτωση συνεργασίας μεταξύ των παρόχων προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το συνολικό όφελος. Η αξιολόγηση του προτεινόμενου σχήματος γίνεται με χρήση αναλυτικών προσομοιώσεων.

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται εμφανές ότι η πλειονότητα των εργασιών αυτών μελετάει το πρόβλημα της διαχείρισης των πόρων για την περίπτωση ενός ασύρματου οπισθοζευκτικού δικτύου. Ωστόσο, όπως διατυπώθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου πρόσβασης απαιτεί μια ανάλογη αύξηση της χωρητικότητας του οπισθοζευκτικού δικτύου προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες των συνδρομητών. Η σύγκλιση των οπτικών δικτύων με τα ασύρματα δίκτυα μπορεί να ικανοποιήσει την απαίτηση αυτή, προσφέροντας υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση διέλευσης. Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία αρκετές ερευνητικές μελέτες που εστιάζουν στο πρόβλημα της διαχείρισης των πόρων σε συγκεκλιμένα οπτικά-ασύρματα δίκτυα (converged optical-wireless networks). Η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ένα συγκεκλιμένο δίκτυο απαιτεί διαφορετικές και καινοτόμες προσεγγίσεις σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους διαχείρισης των πόρων, καθώς πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ετερογενών δικτύων.

Οι Wang et al., στην εργασία [91], μελετούν την περίπτωση σύγκλισης των ασύρματων δικτύων αισθητήρων με τα οπτικά δίκτυα. Συγκεκριμένα, παραθέτουν μια ανάλυση της από άκρο σε άκρο επίδοσης του συγκεκλιμένου δικτύου που βασίζεται στη θεωρία

αναμονής. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προτείνουν ένα μηχανισμό δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης που μειώνει την καθυστέρηση των πακέτων, παρέχοντας, παράλληλα, υψηλότερο εύρος ζώνης.

Στην εργασία [49] και στην επέκταση αυτής [43], εξετάζεται η σύγκλιση των δικτύων EPON (Ethernet Passive Optical Network) και WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Οι συγγραφείς προτείνουν ένα σχήμα δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης που βασίζεται σε πλαίσια και παρέχει υψηλή ποιότητα υπηρεσίας στο συγκεκριμένο δίκτυο. Ειδικότερα, το προτεινόμενο σχήμα μειώνει την από άκρο σε άκρο καθυστέρηση της κίνησης, επιτρέπει την αποδοτικότερη εκχώρηση του εύρους ζώνης και αυξάνει τη χρησιμοποίηση του δικτύου.

Η σύγκλιση των δικτύων EPON και WiMAX απασχόλησε και τους Mirahmadi et al., όπου στην εργασία [53] προτείνουν μια μεθοδολογία για τη βελτίωση των μηχανισμών δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης που βασίζεται στην πρόβλεψη της εισερχόμενης κίνησης. Η πρόβλεψη αφορά το χρονικό διάστημα άφιξης του επόμενου πλαισίου WiMAX και ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, εκχωρείται εύρος ζώνης στην ONU (Optical Network Unit) χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι διαφορετικές κλάσεις υπηρεσίας, ενώ στο δεύτερο μέρος, η ONU διαμοιράζει το εκχωρημένο εύρος ζώνης στις κλάσεις υπηρεσίας που καλείται να εξυπηρετήσει ο Σταθμός Βάσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι η χρήση της διαδικασίας της πρόβλεψης συνεισφέρει στη μείωση της καθυστέρησης, και συνεπώς, στην παροχή βελτιωμένης ποιότητας υπηρεσίας για τους συνδρομητές ενός δικτύου WiMAX.

Το πρόβλημα της επικοινωνίας μεταξύ των Σταθμών Βάσης σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο LTE-WDM PON (Wavelength Division Multiplexing PON) μελετάται στην εργασία [71]. Οι Ramantas et al. χρησιμοποιούν ένα παθητικό οπτικό δίκτυο WDM σε τοπολογία δακτυλίου για την διασύνδεση των Σταθμών Βάσης μεταξύ τους (διεπαφή X2). Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική που παρουσιάζουν προσφέρει εξισορρόπηση φορτίου και επανεκχώρηση του εύρους ζώνης μεταξύ των Σταθμών Βάσης.

Σημαντική συνεισφορά στο πρόβλημα της διαχείρισης των πόρων σε συγκεκριμένα δίκτυα αποτελούν οι εργασίες των Ranaweera et al., [75], [73], [76], [74]. Στην εργασία [74] μελετάται η παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε συγκεκριμένα δίκτυα EPON-WiMAX. Ειδικότερα, εξετάζεται η ποιότητα υπηρεσίας για διαφορετικές κλάσεις κίνησης και προτείνεται ένας μηχανισμός για τη διαχείριση των πόρων μεταξύ ONU και Σταθμού Βάσης, ο οποίος σε συνδυασμό με την κατάλληλη αντιστοίχιση των κλάσεων υπηρεσίας των δικτύων EPON και WiMAX βελτιώνει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο συγκεκριμένο δίκτυο. Στην εργασία [76] εξετάζεται η περίπτωση της σύγκλισης των δικτύων LTE και GEPON (Gigabit Ethernet PON) και προτείνεται ένας μηχανισμός εκχώρησης πόρων, ο οποίος βασίζεται στην αναγνώριση της υποκείμενης αρχιτεκτονικής του δικτύου. Ο μηχανισμός αυτός χρησιμοποιεί μια απλοϊκής μορφής διαδικασία πρόβλεψης για την άφιξη των μελλοντικών πακέτων επιτυγχάνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, καλύτερη διαχείριση του εύρους ζώνης στο συγκεκριμένο δίκτυο.

Στην εργασία [73] μελετάται η επίδραση της διάρκειας του κύκλου εκχώρησης ενός δικτύου GEPON στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε συγκεκριμένα δίκτυα LTE-GEPON υπό διαφορετικούς μηχανισμούς διαχείρισης πόρων. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η επιλογή της διάρκειας του κύκλου εκχώρησης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην παροχή ποιότητας υπηρεσίας, καθώς τα διαφορετικά είδη κίνησης έχουν διαφορετική συμπεριφορά που εξαρτάται από τη διάρκεια του κύκλου και το μηχανισμό διαχείρισης των πόρων. Τέλος, η διαχείριση των πόρων σε συγκεκριμένα δίκτυα LTE-GEPON εξετάζεται και στην εργασία [75], όπου προτείνεται ένας μηχανι-

σμός εκχώρησης που βασίζεται στην πρόβλεψη της άφιξης μελλοντικών πακέτων στο συγκεκριμένο δίκτυο. Ο χρήστης που λαμβάνει άδεια να αποστείλει πακέτα πρέπει να περιμένει μια συγκεκριμένη περίοδο πριν τη μετάδοση, η οποία στην περίπτωση της λειτουργίας με αμφίδρομη επικοινωνία διαίρεσης συχνότητας είναι 4 υποπλάσια. Επομένως, ο Σταθμός Βάσης γνωρίζει ακριβώς τα πακέτα της ζεύξης ανόδου που θα λάβει για τα επόμενα 4 υποπλάσια. Ο συνολικός αριθμός πακέτων που λαμβάνεται από το Σταθμό Βάσης σε αυτή τη διάρκεια μπορεί να αναπαρασταθεί από μια βηματική συνάρτηση, η οποία χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των πακέτων που θα αφιχθούν. Σε κάθε θυρίδα μετάδοσης της ζεύξης ανόδου ο Σταθμός Βάσης, ο οποίος συνδέεται με την ONU, αιτείται από το OLT (Optical Line Terminal) το κατάλληλο εύρος ζώνης το οποίο περιλαμβάνει την πρόβλεψη του Σταθμού Βάσης για τον επόμενο κύκλο εκχώρησης, καθώς και το μήκος της τρέχουσας ουράς. Τέλος, με χρήση προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο αυτό σχήμα μειώνει την καθυστέρηση και τη διακύμανση αυτής, προσφέροντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, βελτιωμένη παροχή ποιότητας υπηρεσίας για την κίνηση εγγυημένου ρυθμού.

Η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης των πόρων σε συγκεκριμένα οπτικά-ασύρματα δίκτυα παρουσιάζεται στην εργασία [14]. Οι Coimbra et al. μελετούν ένα δίκτυο που αποτελείται από δύο μέρη: ένα δίκτυο πρόσβασης, το οποίο περιλαμβάνει ασύρματους δρομολογητές σε τοπολογία πλέγματος και ένα οπισθοζευκτικό οπτικό δίκτυο που συνδέει το δίκτυο πρόσβασης με το δίκτυο κορμού του παρόχου. Η επικοινωνία του δικτύου πρόσβασης με το οπισθοζευκτικό δίκτυο γίνεται με κατάλληλους δρομολογητές πύλες που συνδέονται με τις ONUs. Προκειμένου να επιτευχθεί η δίκαιη κατανομή των πόρων μεταξύ των δρομολογητών του δικτύου, προτείνουν έναν αλγόριθμο που βασίζεται σε ένα επαναλαμβανόμενο παίγνιο σύμφωνα με το οποίο κάθε δρομολογητής επιθυμεί να προωθήσει όσο περισσότερη κίνηση μπορεί με το μικρότερο ρυθμό απωλειών. Ο αλγόριθμος αυτός επιτυγχάνει τη διασφάλιση του εύρους ζώνης για κόμβους με χαμηλές απαιτήσεις, παρέχοντας παράλληλα ίδιες καθυστερήσεις σε όλους τους κόμβους.

Επιπλέον μελέτες ως προς τη διαχείριση των πόρων σε συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές παρουσιάζονται στις εργασίες [95],[7],[60], [64] και [48]. Στην εργασία [95], οι Yan et al. προτείνουν ένα σχήμα διαχείρισης των πόρων σε συγκεκριμένα δίκτυα EPON-WiMAX που βελτιώνει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας προσφέροντας υψηλότερο εύρος ζώνης στο δίκτυο. Στην εργασία [7], οι Bock et al. μελετούν διαφορετικές αρχιτεκτονικές συγκεκριμένων δικτύων για τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης της κίνησης και της παροχής υψηλών ρυθμών μετάδοσης. Στην εργασία [60], οι συγγραφείς παρουσιάζουν μια αρχιτεκτονική συγκεκριμένων δικτύων GEPON και WiMAX και μελετούν τα θέματα που άπτονται της παροχής ποιότητας υπηρεσίας προτείνοντας ένα σχήμα αντιστοίχισης των κλάσεων υπηρεσίας των δικτύων WiMAX σε κλάσεις υπηρεσίας των δικτύων GEPON. Στην εργασία [64], οι Orphanoudakis et al. αξιολογούν διαφορετικές αρχιτεκτονικές που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία ως προς την καταλληλότητά τους για την ανάπτυξη ενός συγκεκριμένου οπτικού-ασύρματου δικτύου. Στην εργασία [48], οι Lim et al. ασχολούνται με την ποιότητα υπηρεσίας σε συγκεκριμένα δίκτυα LTE-PON και παραθέτουν διαφορετικά σενάρια αντιστοίχισης των κλάσεων υπηρεσίας των δικτύων LTE στις ουρές του PON.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των παραπάνω εργασιών συμπεραίνεται ότι η χρήση μεθόδων πρόβλεψης μπορεί να βελτιώσει την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε ένα συγκεκριμένο οπτικό-ασύρματο δίκτυο. Ωστόσο, η πρόβλεψη που χρησιμοποιήθηκε στις εργασίες αυτές αφορά ένα διάστημα ολίγων εκατοστών του δευτερολέπτου

και είχε ως σκοπό τη δημιουργία αποδοτικότερων μηχανισμών δυναμικής εκχώρησης του εύρους ζώνης. Πέραν τούτου, σε όλες τις παραπάνω μελέτες γίνεται η παραδοχή ότι το οπτικό δίκτυο μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του ασύρματου δικτύου πρόσβασης, γεγονός που δεν συμβαίνει πάντα. Η παρούσα διατριβή αξιοποιεί τους διαθέσιμους μηχανισμούς εκχώρησης του εύρους ζώνης που προσφέρονται από τα οπτικά δίκτυα και περιγράφει ένα σχήμα για την αποδοτική διαχείριση των πόρων του δικτύου με χρήση μεθόδων πρόβλεψης. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η δυναμική διαστασιολόγηση του δικτύου και η σύναψη συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας (Service Level Agreements - SLAs) μεταξύ παρόχων κινητών επικοινωνιών και οπτικού δικτύου στην περίπτωση μίσθωσης των κυκλωμάτων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Η επιλογή της μεθόδου πρόβλεψης που θα χρησιμοποιηθεί αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας για την επίδοση ενός τέτοιου συστήματος διαχείρισης πόρων. Για το σκοπό αυτό, παρατίθενται στη συνέχεια οι σχετικές εργασίες της βιβλιογραφίας που αφορούν την πρόβλεψη των πόρων σε ένα δίκτυο, προκειμένου να επιλεγούν οι κατάλληλοι μηχανισμοί για την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος.

1.5.2 Πρόβλεψη πόρων

Στη βιβλιογραφία υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός εργασιών που αφορούν την πρόβλεψη των απαραίτητων πόρων σε ένα δίκτυο. Στις εργασίες αυτές, η πρόβλεψη μπορεί να αφορά περίοδο είτε ολίγων λεπτών, είτε αρκετών μηνών σε περίπτωση που διερευνάται η γενική τάση που καταγράφει η κίνηση σε ένα δίκτυο. Ως προς τη χρονική κλίμακα της πρόβλεψης, διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις [16]:

- πραγματικού χρόνου, η οποία αφορά την πρόβλεψη μερικών λεπτών.
- βραχυπρόθεσμη, η οποία είναι διάρκειας μερικών ωρών και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό μη αναμενόμενης λειτουργίας.
- μεσοπρόθεσμη, η οποία είναι διάρκειας μερικών ημερών και χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της κατανομής των πόρων.
- μακροπρόθεσμη, η οποία αφορά περίοδο μηνών ή ετών και χρησιμοποιείται για τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων ως προς την ανάπτυξη του δικτύου.

Ωστόσο, μια πιο αποδοτική κατηγοριοποίηση των εργασιών αυτών βασίζεται στις μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να γίνει η πρόβλεψη. Με βάση αυτόν τον τρόπο διαχωρισμού, διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες: οι εργασίες που χρησιμοποιούν γραμμικές μεθόδους πρόβλεψης και οι εργασίες που χρησιμοποιούν μη γραμμικές μεθόδους. Παρακάτω παρατίθενται, ενδεικτικά, ένας αριθμός των παραπάνω εργασιών.

1.5.2.1 Γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης

Στην κατηγορία των γραμμικών μοντέλων πρόβλεψης ανήκουν οι απλές μέθοδοι αυτοπαλινδρόμησης (Autoregressive - AR), οι απλές μέθοδοι κινητού μέσου (moving average - MA), καθώς και ο συνδυασμός αυτών (πχ. ARMA). Ο βασικός περιορισμός που θέτουν αυτές οι μέθοδοι είναι η προϋπόθεση ότι το μοντέλο που εξετάζεται έχει γραμμική μορφή. Συνεπώς, το αποτέλεσμα της πρόβλεψης στις μεθόδους αυτές είναι ένας γραμμικός συνδυασμός των ιστορικών τιμών της χρονοσειράς, καθιστώντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, μη εφικτή την αποτύπωση μη γραμμικών προτύπων [98].

Βασική προϋπόθεση για τη χρήση των μεθόδων AR, MA και ARMA αποτελεί η απαίτηση ότι η κίνηση που μελετάται είναι στάσιμη. Μια στάσιμη χρονοσειρά χαρακτηρίζεται από σταθερό μέσο, σταθερή διακύμανση και συνδιακύμανση που δεν εξαρτάται από το χρόνο [37]. Προκειμένου να αρθεί ο περιορισμός αυτός δημιουργήθηκε η μέθοδος της αυτοπαλινδρόμησης ολοκληρωμένου κινητού μέσου (autoregressive integrated moving average - ARIMA). Μια χρονοσειρά μη στάσιμων δεδομένων μπορεί να μετατραπεί σε στάσιμη, διαφορίζοντας τα δεδομένα μία ή περισσότερες φορές. Αυτό αποτελεί το αντικείμενο της μεθόδου ARIMA [26].

Οι Zhou et al. στην εργασία [101] προτείνουν τη χρήση της μεθόδου αυτοπαλινδρόμησης κλασματικά ολοκληρωμένου κινητού μέσου όρου (autoregressive fractionally integrated moving average - ARFIMA) για την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου και αποδεικνύουν ότι το προτεινόμενο σχήμα τους έχει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τα παραδοσιακά μοντέλα χρονοσειρών.

Στην εργασία [26], οι ερευνητές μελετούν την κίνηση του δικτύου κορμού του εθνικού ιδρύματος επιστημών των ΗΠΑ (National Science Foundation). Συγκεκριμένα, επειδή η κίνηση του δικτύου δεν είναι στάσιμη, χρησιμοποιούν τη μέθοδο ARIMA για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης κίνησης. Το προτεινόμενο μοντέλο επέτυχε να προβλέψει με ακρίβεια τη μεταβολή της κίνησης για διάστημα ενός έτους επιτρέποντας τον ασφαλή σχεδιασμό του δικτύου.

Οι Jung et al. στην εργασία [37] μελετούν διάφορα μοντέλα χρονοσειρών για την πρόβλεψη του αριθμού των πακέτων στο δίκτυο προκειμένου να αποφύγουν φαινόμενα συμφόρησης και να επιτρέψουν την αποδοτική και δυναμική διαχείριση του δικτύου. Συγκεκριμένα, η μελέτη τους αφορά τις μεθόδους AR, MA, ARMA και ARIMA και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι με την ταξινόμηση των παρατηρήσεων σε καθημερινή βάση η μέθοδος AR εμφανίζει πολύ καλά αποτελέσματα.

Οι Paragiannaki et al., στην εργασία τους [68] παρουσιάζουν μια μεθοδολογία για την ανάπτυξη του IP δικτύου κορμού. Αρχικά αποδεικνύουν την ύπαρξη περιοδικότητας ως προς τη ζήτηση της κίνησης και με βάση αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό κυματιδιακής πολλαπλής ανάλυσης (wavelet multiresolution analysis) για την εξομάλυνση της κίνησης και τον προσδιορισμό της συνολικής μακροπρόθεσμης τάσης, ενώ για την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου χρησιμοποιείται η μέθοδος ARIMA. Το προτεινόμενο μοντέλο χαρακτηρίζεται από μεγάλη ακρίβεια ως προς την πρόβλεψη εμφανίζοντας ένα μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μικρότερο από 15% για περίοδο 6 μηνών και 17% για περίοδο ενός έτους.

Οι Sant et al. στην εργασία [79] εξετάζουν την προβλεψιμότητα της δικτυακής κίνησης χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές μεθόδους: την ARIMA και μια μέθοδο διαδικασίας Poisson διαμορφωμένη κατά Markov (Markov-Modulated Poisson Process). Τα αποτελέσματα της εργασίας τους παρέχουν ένα άνω όριο για τη βέλτιστη επίδοση της πρόβλεψης της κίνησης σε πραγματικό χρόνο, ενώ με βάση τα πειραματικά τους αποτελέσματα καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η πρόβλεψη είναι πιο αποδοτική όταν αφορά αθροιστική κίνηση (όπως στα δίκτυα κορμού) ή όταν οι βραχυπρόθεσμες απότομες μεταβολές της κίνησης έχουν αφαιρεθεί από τα δεδομένα.

Τέλος, μια διαφορετική προσέγγιση στις γραμμικές μεθόδους πρόβλεψης παρουσιάζεται στην εργασία [1], όπου εξετάζεται η δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης σε κίνηση βίντεο μεταβλητού ρυθμού. Συγκεκριμένα, ο συγγραφέας χρησιμοποίησε τη μέθοδο της προσαρμοστικής γραμμικής πρόβλεψης για την εκτίμηση του απαιτούμενου εύρους ζώνης των μελλοντικών πλαισίων του βίντεο (frames). Η χρησιμοποιούμενη μέθοδος δεν απαιτεί προγενέστερη γνώση των στατιστικών της κίνησης ούτε προϋποθέτει

στασιμότητα, καθιστώντας την ικανή να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Για την υλοποίηση της δυναμικής εκχώρησης μελετάται το μοντέλο υπηρεσίας δικτύου που επιτρέπει την επαναδιαπραγμάτευση σταθερού ρυθμού δεδομένων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν ότι το μέγεθος της ουράς μειώνεται 15-160 φορές σε σύγκριση με τη χρήση σταθερού ρυθμού εκχώρησης. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που η διαδικασία της επαναδιαπραγμάτευσης συμβαίνει σε χρόνο της τάξης αρκετών δευτερολέπτων, η ουρά μειώνεται 16-30 φορές.

1.5.2.2 Μη γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης

Κύριο μειονέκτημα των γραμμικών μοντέλων πρόβλεψης που αναφέρθηκαν παραπάνω αποτελεί η αδυναμία αποτύπωσης μη γραμμικών προτύπων χρονοσειρών. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα περισσότερα φαινόμενα που συμβαίνουν γύρω μας χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητες, η χρήση των παραπάνω μεθόδων θα οδηγούσε σε μειωμένη ακρίβεια ως προς το αποτέλεσμα της πρόβλεψης. Επομένως, γίνεται σαφής η ανάγκη χρήσης μη γραμμικών μοντέλων για την αποτύπωση συγκεκριμένων προβλημάτων. Αν και στη βιβλιογραφία έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι γι' αυτό το σκοπό, κύριοι εκπρόσωποι αυτής της κατηγορίας είναι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks). Το κύριο πλεονέκτημα των νευρωνικών δικτύων είναι η ικανότητά τους να αποτυπώνουν μη γραμμικά πρότυπα, προσαρμόζοντας κατάλληλα το μοντέλο με βάση το σύνολο των ιστορικών παρατηρήσεων. Αυτό το χαρακτηριστικό, επιτρέπει στα νευρωνικά δίκτυα να αποτυπώνουν ένα ευρύ φάσμα συναρτήσεων με μεγάλη ακρίβεια. Τα νευρωνικά δίκτυα θεωρούνται από πολλούς ερευνητές ως η πιο κατάλληλη μέθοδος πρόβλεψης καθώς δεν απαιτούν προγενέστερη γνώση του μοντέλου, το οποίο καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά των ιστορικών παρατηρήσεων [98].

Οι Cortez et al. στην εργασία [16] επισημαίνουν τη σημασία της πρόβλεψης για την καλύτερη διαχείριση των πόρων ενός δικτύου. Στη συγκεκριμένη εργασία, μελετάται η διαδικασία πρόβλεψης της κίνησης του διαδικτύου και συγκρίνονται διάφορα μοντέλα πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, μελετάται η μέθοδος Holt-Winters, το μοντέλο ARIMA και τα νευρωνικά δίκτυα, και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν την υπεροχή της χρήσης των νευρωνικών δικτύων απέναντι στις άλλες μεθόδους. Σημειώνεται ότι η υπεροχή των νευρωνικών δικτύων γίνεται μεγαλύτερη στην περίπτωση που τα δεδομένα της κίνησης χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητες, τεκμηριώνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την ικανότητα τους να προβλέπουν αποδοτικά μη γραμμικές χρονοσειρές, σε αντίθεση με τα άλλα δύο γραμμικά μοντέλα.

Στην εργασία [104] μελετάται η χρήση νευρωνικών δικτύων οπισθοδιάδοσης (back-propagation) του σφάλματος για την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου. Συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (particle swarm optimization) με στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στους αλγορίθμους αποικίας μελισσών (bee colony) για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και την κατάλληλη επιλογή των παραμέτρων του. Η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων αποτελεί μια εξελικτικά υπολογιστική μέθοδο που ωστόσο δεν μπορεί να εγγυηθεί τη σύγκλιση στην ολική βέλτιστη λύση, εν αντιθέσει με τους αλγορίθμους αποικίας μελισσών που εγγυώνται την εύρεση ενός ολικά βέλτιστου σημείου.

Μια παρόμοια προσέγγιση παρουσιάζεται και στην εργασία των Fang et al. [22]. Οι συγγραφείς προτείνουν τη χρήση μεθόδων διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machines) για την πρόβλεψη της δικτυακής κίνησης. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, οι παράμετροι των διανυσμάτων υποστήριξης έχουν προκύψει με χρήση αλγορίθμων

βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων βασισμένους στο φαινόμενο του γατόφαρου¹. Τα σωματίδια που παίζουν το ρόλο του γατόφαρου μπορούν να οδηγήσουν τα άλλα σωματίδια που έχουν παγιδευτεί σε ένα τοπικό ελάχιστο, σε μια διαφορετική περιοχή αναζήτησης λύσεων, βελτιώνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, την επίδοση του μοντέλου.

Μια ακόμη προσέγγιση που χρησιμοποιεί νευρωνικά δίκτυα για τη βέλτιστη διαχείριση του εύρους ζώνης προτείνεται στην εργασία [89]. Συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή, μελετάται η χρήση ενός εξελιγμένου καρτεσιανού νευρωνικού δικτύου γενετικού προγραμματισμού (Cartesian Genetic Programming Evolved Neural Network) για την πρόβλεψη του μεγέθους του επόμενου πλαισίου κίνησης βίντεο MPEG-4 με βάση τα 10 προηγούμενα πλαίσια στον προσωρινό καταχωρητή (buffer) για κάθε χρήστη.

Ο Rutka στην εργασία [77] μελετάει τη χρήση ενός πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου και ενός δικτύου συνάρτησης ακτινικής βάσης (Radial Basis Function - RBF) για την πρόβλεψη της κίνησης του διαδικτύου, η οποία χαρακτηρίζεται από αυτομοιότητα. Μέσα από την ανάλυση που παρουσιάζει, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα εμφανίζουν πολύ καλή συμπεριφορά στην πρόβλεψη της κίνησης που χαρακτηρίζεται από αυτομοιότητα, εν αντιθέσει με τα δίκτυα συνάρτησης ακτινικής βάσης λόγω του υπολογιστικού φόρτου που απαιτείται.

Τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται και στην εργασία [10]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς μελετούν την επίδοση διαφόρων αλγορίθμων εκπαίδευσης του πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το νευρωνικό δίκτυο που έχει εκπαιδευτεί με χρήση των αλγορίθμων Levenberg-Marquardt και της ελαστικής οπισθόφορης διάδοσης σφάλματος (resilient back propagation) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου επιτρέποντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη βέλτιστη διαχείρισή της.

Μια επιπλέον εργασία σχετική με την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου παρουσιάζεται στο [99]. Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς μελετούν το σχεδιασμό και την επίδοση των μεθόδων ARMA, ARIMA και ενός μοντέλου που συνδυάζει τα νευρωνικά δίκτυα με την ασαφή λογική (fuzzy logic), με την ονομασία α -SNF, και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του αριθμού των ιστορικών δεδομένων εκπαίδευσης δεν βελτιώνει την ακρίβεια της πρόβλεψης.

Στην εργασία [62], οι Oravec et al. χρησιμοποιούν τα νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη της κίνησης βίντεο και την αποδοτική εκχώρηση του εύρους ζώνης. Ως μοντέλα για την πρόβλεψη μελετούν τη χρήση ενός πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου, ενός δικτύου συνάρτησης ακτινικής βάσης και ενός δικτύου οπισθόφορης διάδοσης σφάλματος χρόνου (backpropagation through time neural networks). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυσή τους, και τα τρία είδη νευρωνικών παρουσιάζουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, με τα δίκτυα οπισθόφορης διάδοσης σφάλματος χρόνου να εμφανίζουν ελαφρώς καλύτερη επίδοση. Τέλος, οι συγγραφείς συγκρίνουν τα αποτελέσματα των νευρωνικών δικτύων με παραδοσιακές γραμμικές μεθόδους πρόβλεψης αποδεικνύοντας την καλύτερη επίδοση που έχουν τα νευρωνικά δίκτυα σε προβλήματα πρόβλεψης της κίνησης σε ένα δίκτυο.

Οι Ding et al. στην εργασία τους [18] παρουσιάζουν ένα μοντέλο πρόβλεψης της κίνησης που βασίζεται στο μετασχηματισμό κυματιδίων. Συγκεκριμένα, η κίνηση που έχει συλλεχθεί από το δίκτυο αποσυντίθεται χρησιμοποιώντας το μετασχηματισμό κυματιδίων και ανασχηματίζεται χρησιμοποιώντας ένα απλό αλγόριθμο διακλάδωσης (branch algorithm). Στη συνέχεια, γίνεται η πρόβλεψη για τις συνιστώσες χαμηλής

¹Το φαινόμενο του γατόφαρου αναφέρεται στην επίδραση που έχει ένας ισχυρός ανταγωνιστής στο να βελτιώνονται αυτοί που είναι λιγότερο ανταγωνιστικοί.

συχνότητας της κίνησης χρησιμοποιώντας μια βελτιωμένη θεωρία Gray. Έπειτα ακολουθεί η πρόβλεψη για τις συνιστώσες υψηλής συχνότητας, όπου στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται ένα νευρωνικό δίκτυο οπισθόφορης διάδοσης σφάλματος. Τέλος, τα επιμέρους αποτελέσματα συνθέτονται για την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου. Το προτεινόμενο μοντέλο εμφανίζει καλά αποτελέσματα και είναι κατάλληλο για εφαρμογές μικρής χρονικής κλίμακας.

Τέλος, οι Moh et al. στην εργασία [55] μελετούν την δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης σε δίκτυα ασύγχρονης μεταφοράς (Asynchronous Transfer Mode - ATM) με χρήση μεθόδων πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούν τα νευρωνικά δίκτυα για να προβλέψουν κίνηση μεταβλητού ρυθμού (variable bit rate), και με βάση τα αποτελέσματα της πρόβλεψης προτείνουν ένα σχήμα δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης. Το προτεινόμενο σχήμα εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με υπάρχοντα μοντέλα εκχώρησης εύρους ζώνης, ενώ το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να προβλέψει την κίνηση με ένα μέσο τετραγωνικό σφάλμα περίπου 0.34%.

Συμπερασματικά, με βάση τις ανωτέρω εργασίες, γίνεται σαφής η καταλληλότητα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη της κίνησης του δικτύου. Η παρούσα διατριβή λαμβάνει υπόψη της τα αποτελέσματα των εργασιών αυτών και μελετάει την επίδοση διαφορετικών ειδών τεχνητών νευρωνικών δικτύων για τη διαδικασία της πρόβλεψης των απαραίτητων πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου πρόβλεψης επιτρέπει στον πάροχο κινητών επικοινωνιών την αποδοτική διαχείριση των πόρων, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος του οπισθοζευκτικού δικτύου και παρέχοντας υψηλή ποιότητα υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του.

1.6 Διάρθρωση της Διατριβής

Το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας δομείται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται αναλυτικά οι εναλλακτικές τεχνολογίες υλοποίησης του οπισθοζευκτικού δικτύου και τεκμηριώνεται η επιλογή της χρήσης των οπτικών δικτύων για την ανάπτυξη των κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς. Επιπλέον, στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται οι απαιτήσεις ενός οπισθοζευκτικού δικτύου νέας γενιάς, όπως καθορίζονται από την Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance και περιγράφεται συνοπτικά η δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης στα οπτικά δίκτυα. Τέλος, γίνεται αναφορά και στα βασικά χαρακτηριστικά ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας το οποίο συνάπτεται μεταξύ παρόχου κινητών επικοινωνιών και οπτικού δικτύου για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας προς τους τελικούς συνδρομητές.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται η περιγραφή του προτεινόμενου συστήματος δυναμικής διαχείρισης των πόρων. Ειδικότερα, αφού αιτιολογηθεί η ανεπάρκεια των υπάρχουσων μεθόδων προγραμματισμού και διαστασιολόγησης του δικτύου, περιγράφεται το προτεινόμενο σύστημα και αναλύονται οι επιλογές της φυσικής αρχιτεκτονικής. Τέλος, εισάγεται η έννοια του ευφυούς πράκτορα ως υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος και παρουσιάζονται συνοπτικά οι λειτουργίες του.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται η κύρια λειτουργία του ευφυούς πράκτορα, αυτή της πρόβλεψης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Αρχικά, περιγράφονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κίνησης του δικτύου και αποδεικνύεται η ύπαρξη περιοδικοτήτων στην αθροιστική ζήτηση των συνδρομητών, γεγονός που διευκολύνει τη διαδικασία της πρόβλεψης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα είδη των νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιούνται και παρατίθενται τα αρχικά αποτελέσματα της επίδοσής τους. Έπειτα, γίνεται η ανάλυση ευαισθησίας της πρόβλεψης και παρουσιάζεται η εξάρτηση της

επίδοσης των νευρωνικών δικτύων συναρτήσει των βασικών χαρακτηριστικών τους που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη. Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται σε πρακτική και σε θεωρητική βάση θέματα που άπτονται στη βελτιστοποίηση της επίδοσης του συστήματος διαχείρισης πόρων. Ειδικότερα, μελετάται η επίδραση των στατιστικών χαρακτηριστικών του συνόλου εκπαίδευσης στην επίδοση του συστήματος, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση της σχέσης ανταλλαγής μεταξύ της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης και του υπολογιστικού κόστους που επιφέρει η διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου συναρτήσει της συχνότητας με την οποία συντελείται και του μεγέθους των δεδομένων που χρησιμοποιούνται γι' αυτή.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι υπόλοιπες βασικές λειτουργίες του ευφυούς πράκτορα. Αρχικά, μελετάται η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των πόρων χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό τεχνητών νευρωνικών δικτύων και χρονοσειρών για την καλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επίσης, περιγράφεται η διαδικασία αντιμετώπισης έκτακτων καταστάσεων, ενώ στη συνέχεια, παρατίθεται η διαδικασία αίτησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η διαδικασία αυτή αφορά τον πάροχο κινητών επικοινωνιών και διαφέρει ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε παρόχου, στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια απλοποιημένη υλοποίηση της με χρήση γραμμικού προγραμματισμού. Το κεφάλαιο αυτό κλείνει με την αξιολόγηση της επίδοσης του ευφυούς πράκτορα και τη σύγκριση του προτεινόμενου συστήματος δυναμικής διαχείρισης των πόρων με τις παραδοσιακές μεθόδους στατικής εκχώρησης.

Στο Κεφάλαιο 6 μελετάται η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης των πόρων. Αρχικά, περιγράφεται το εν λόγω πρόβλημα στην πλευρά του Σταθμού Βάσης όπου ο πάροχος κινητών επικοινωνιών καλείται να ικανοποιήσει τις ανάγκες των συνδρομητών του, ενώ στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία δύο πάροχοι κινητών επικοινωνιών μοιράζονται την ίδια οπτική οπισθοζευκτική υποδομή και ανταγωνίζονται για τους πόρους του οπτικού δικτύου προκειμένου να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των συνδρομητών τους. Καθένα από τα προβλήματα αυτά μοντελοποιείται με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων και μελετάται η ευστάθεια του δυναμικού συστήματος υπό τη δυναμική των αντιγραφών, ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν τεκμηριώνονται μέσω κατάλληλων προσομοιώσεων.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 γίνεται η ανακεφαλαίωση της διατριβής και παρουσιάζονται τα θέματα μελλοντικής έρευνας που επεκτείνουν την παρούσα εργασία.

Κεφάλαιο 2

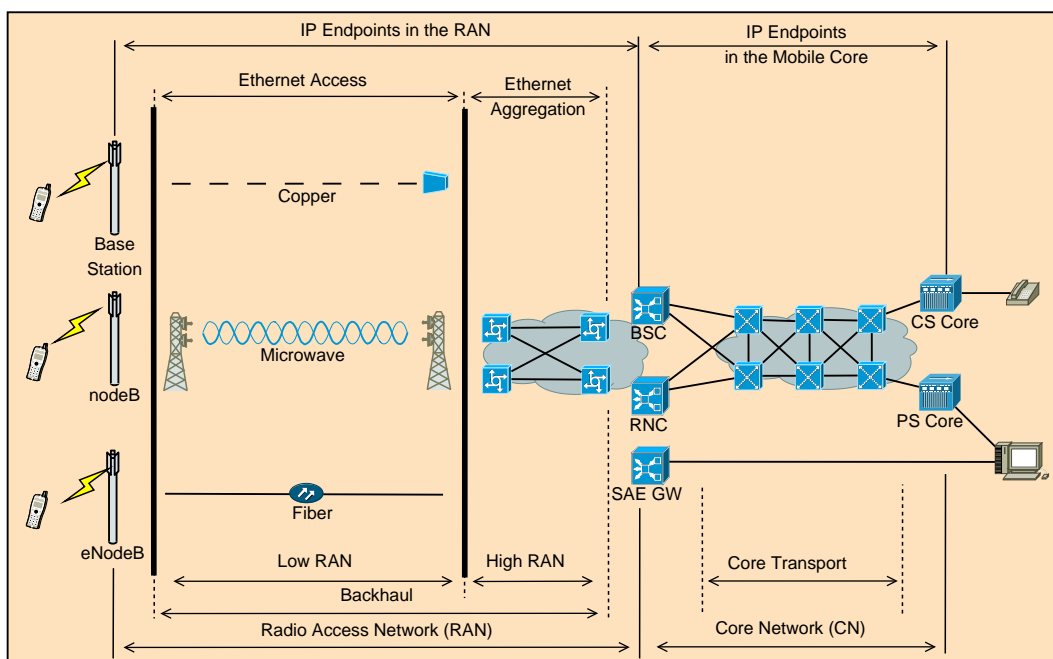
Οπισθοζευκτικό Δίκτυο

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το οπισθοζευκτικό δίκτυο, το οποίο αποτελεί σημείο μελέτης της διατριβής. Αρχικά, τεκμηριώνεται η κομβική σημασία του για την επιτυχία της ανάπτυξης των δικτύων νέας γενιάς, και στη συνέχεια, περιγράφονται οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την υλοποίησή του, αναλύοντας τα χαρακτηριστικά της κάθε μιας. Έπειτα, παρουσιάζονται οι απαιτήσεις ενός οπισθοζευκτικού δικτύου για την υποστήριξη των κινητών δικτύων νέας γενιάς, όπως έχουν περιγραφεί από τη Next Generation Mobile Network (NGMN) Alliance. Επιπλέον, περιγράφεται η συγκεκλιμένη οπτική-ασύρματη υποδομή ως η πιο αποδοτική λύση που μπορεί να υποστηρίξει τις αυξανόμενες απαιτήσεις των συνδρομητών, και παρουσιάζονται οι μηχανισμοί δυναμικής ανάθεσης του εύρους ζώνης που υλοποιούνται από το οπτικό δίκτυο. Τέλος, περιγράφονται τα συμφωνητικά επίπεδα υπηρεσίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας σε μια συγκεκλιμένη δικτυακή υποδομή.

2.1 Γενικά

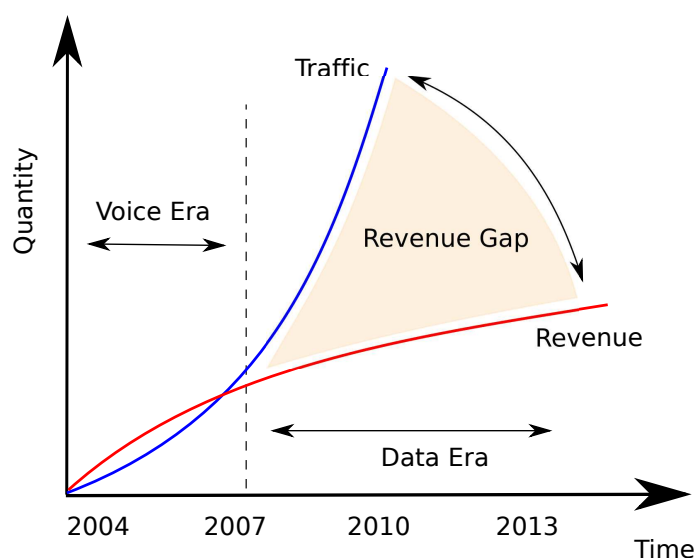
Το οπισθοζευκτικό δίκτυο είναι το δίκτυο μετάδοσης των δεδομένων που συνδέει το Σταθμό Βάσης με τον ελεγκτή του Σταθμού Βάσης και το δίκτυο κορμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1 [11]. Παραδοσιακά, το οπισθοζευκτικό δίκτυο κατασκευάστηκε με γνώμονα τη μεταφορά κίνησης φωνής και δόθηκε σε αυτό υποδεέστερη σημασία σε σύγκριση με άλλα μέρη του δικτύου. Ωστόσο, η αύξηση της κίνησης στο δίκτυο πρόσβασης λόγω των ρυθμοβόρων υπηρεσιών που χρησιμοποιούν οι συνδρομητές, έχει οδηγήσει στην ανάγκη υποστήριξης υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης στο δίκτυο του παρόχου. Αν και η είσοδος στην αγορά των δικτύων LTE και των επερχόμενων δικτύων 4G υπόσχεται να ικανοποιήσει τις ανάγκες των συνδρομητών του δικτύου πρόσβασης, παρέχοντας υψηλή ποιότητα υπηρεσίας, διαφαίνεται ο κίνδυνος το οπισθοζευκτικό δίκτυο να μην είναι ικανό να εξυπηρετήσει την εκρηκτική κίνηση των δεδομένων και να αποτελέσει σημείο συμφόρησης (bottleneck) στο δίκτυο του παρόχου. Ειδικότερα, σύμφωνα με την ITU, τα δίκτυα 4G πρέπει να είναι ικανά να παρέχουν μέγιστους ρυθμούς δεδομένων της τάξης των 100Mbps υπο συνθήκες υψηλής κινητικότητας και 1Gbps για στάσιμους χρήστες. Αυτή η ριζική αύξηση των απαιτήσεων των δικτύων 4G σε σύγκριση με τα δίκτυα 3G έχει οδηγήσει πολλούς παρόχους κινητών επικοινωνιών στην ανάγκη αναβάθμισης του οπισθοζευκτικού τους δικτύου.

Ορόσημο για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αποτέλεσε το έτος 2007, καθώς η παγκόσμια κίνηση δεδομένων ξεπέρασε την κίνηση φωνής, σηματοδοτώντας την έναρξη της «εποχής των δεδομένων» [81]. Μετά το 2007 οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών



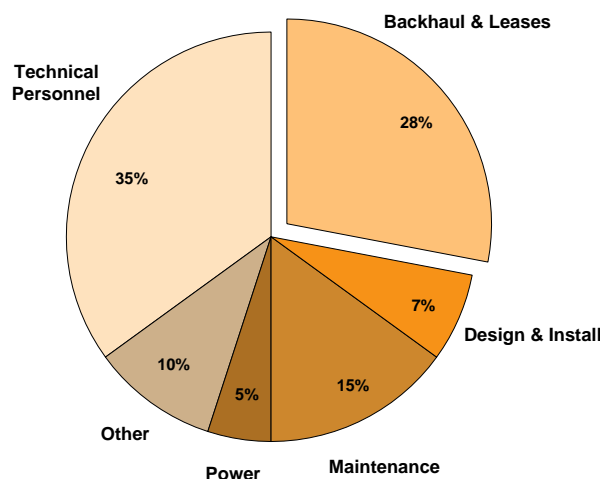
Σχήμα 2.1: Απεικόνιση οπισθοζευκτικού δικτύου.

είναι αντιμέτωποι με την πρόκληση της αύξησης των εσόδων τους από τις νέες ρυθμοβόρες υπηρεσίες. Ουσιαστικά, η νέα αυτή εποχή των δεδομένων έχει δημιουργήσει ένα σημαντικό πρόβλημα στο κομμάτι αυτό, καθώς μια αύξηση στη χωρητικότητα των δεδομένων κατά 10 φορές, δημιουργεί μια δυσανάλογη αύξηση των εσόδων τους, της τάξης του 20-30%. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.2, η αποσύνδεση της αύξησης των εσόδων με την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου οδηγεί στην ανάγκη εύρεσης και εφαρμογής καινοτόμων λύσεων από την πλευρά των παρόχων κινητών επικοινωνιών για τη διαχείριση του κόστους του οπισθοζευκτικού δικτύου. Καθώς το μίγμα της κίνησης αλλάζει και τα δεδομένα που μεταφέρονται αποτελούν το κυρίαρχο κομμάτι της κίνησης, η αύξηση της ζήτησης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη αύξηση των εσόδων για έναν πάροχο όπως συμπεραίνεται από το Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση τάσης κίνησης δεδομένων και εσόδων παρόχου κινητών επικοινωνιών.

Ενδεικτικά, η κατανομή του λειτουργικού κόστους για το δίκτυο ενός παρόχου κινητών επικοινωνιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3, όπου γίνεται εμφανές ότι η συνεισφορά του οπισθοζευκτικού δικτύου στο συνολικό λειτουργικό κόστος μπορεί να φτάσει το 30% [81]. Χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι το 2011 το συνολικό λειτουργικό κόστος των οπισθοζευκτικών δικτύων υπολογίστηκε σε 60 δισεκατομμύρια δολάρια¹, ενώ το 2016 το συνολικό κόστος αναμένεται να φτάσει τα 257 δισεκατομμύρια δολάρια [38].



Σχήμα 2.3: Καταμερισμός λειτουργικού κόστους παρόχου κινητών επικοινωνιών.

2.2 Τεχνολογίες Οπισθοζευκτικού Δικτύου

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η αύξηση των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης των συνδρομητών δημιουργεί την ανάγκη αναβάθμισης του οπισθοζευκτικού δικτύου του παρόχου κινητών επικοινωνιών για την αποφυγή δημιουργίας σημείων συμφόρησης. Τα βασικά κριτήρια που πρέπει να ικανοποιεί η υποδομή του οπισθοζευκτικού δικτύου είναι [34]:

- Ευελιξία. Το οπισθοζευκτικό δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει τόσο τις παραδοσιακές υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος, όσο και τις νέες υπηρεσίες βασισμένες σε IP.
- Κλιμακωσιμότητα. Το οπισθοζευκτικό δίκτυο πρέπει να είναι ικανό να υποστηρίξει τις μελλοντικές τεχνολογίες.
- Αποδοτικό οικονομικά. Το οπισθοζευκτικό δίκτυο πρέπει να ικανοποιεί τη ζήτηση της κίνησης από τους πελάτες, αυξάνοντας ταυτόχρονα τα έσοδα για τους παρόχους.

¹Για τον υπολογισμό του συνολικού λειτουργικού κόστους λήφθηκαν υπόψη τα διαφορετικά λειτουργικά κόστη που δημιουργούνται από τη χρήση χαλκού, οπτικής ίνας, μικροκυμάτων και δορυφόρων ως υποδομής για το οπισθοζευκτικό δίκτυο.

Η υποδομή του οπισθοζευκτικού δικτύου μπορεί να είναι βασισμένη είτε σε ασύρματη τεχνολογία, είτε σε ενσύρματη. Παρακάτω αναλύονται όλες οι ασύρματες και ενσύρματες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη του οπισθοζευκτικού δικτύου.

2.2.1 Ασύρματες τεχνολογίες οπισθοζευκτικού δικτύου

2.2.1.1 Μικροκυματική τεχνολογία

Η χρήση των μικροκυματικών συστημάτων για την επικοινωνία στο οπισθοζευκτικό δίκτυο αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη επιλογή για τους παρόχους κινητών επικοινωνιών [8]. Η εγκατάστασή τους είναι σχετικά γρήγορη και αποτελούν ιδανική επιλογή για περιοχές όπου η ενσύρματη επικοινωνία δεν είναι εφικτή. Η μετάδοση με τη χρήση μικροκυματικής τεχνολογίας μπορεί να γίνει σε διάφορα εύρη συχνοτήτων είτε αδειοδοτημένα, είτε μη αδειοδοτημένα. Οι αδειοδοτημένες συχνότητες είναι μεταξύ 6-38 GHz, ενώ οι μη αδειοδοτημένες είναι αυτές των 2.4 GHz και 5.8 GHz [87]. Η χρήση των μη αδειοδοτημένων συχνοτήτων μπορεί να μειώσει το αρχικό κόστος της επένδυσης, αλλά εγείρει ζητήματα παρεμβολών.

Είναι γεγονός ότι το φάσμα της συχνότητας που χρησιμοποιείται έχει άμεση σχέση με τη χωρητικότητα και με την απόσταση κάλυψης. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι καθώς αυξάνεται η συχνότητα εκπομπής, αυξάνεται και η χωρητικότητα του εύρους ζώνης, αλλά με το αντίστοιχο κόστος της μείωσης της περιοχής κάλυψης. Μια από τις βασικές απαιτήσεις των μικροκυματικών συστημάτων είναι η ανάγκη ύπαρξης οπτικής επαφής για την επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων του δικτύου, γεγονός που περιορίζει την απόσταση της μετάδοσης σε ένα αστικό μητροπολιτικό περιβάλλον. Αντίθετα, σε ένα αγροτικό περιβάλλον, όταν επιτυγχάνεται η οπτική επαφή μεταξύ πομπού και δέκτη, τα μικροκυματικά συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν εύκολα και να μεταφέρουν το σήμα σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα μικροκυματικά συστήματα, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην εύκολη ανάπτυξη των δικτύων 2G και 3G. Ωστόσο, η ζήτηση της κίνησης που αναμένεται να δημιουργηθεί με τα δίκτυα 4G εκτιμάται ότι θα ξεπεράσει τη χωρητικότητα που προσφέρουν τα μικροκυματικά συστήματα. Συγκεκριμένα, ένα οπισθοζευκτικό δίκτυο που χρησιμοποιεί μικροκυματική τεχνολογία μπορεί να υποστηρίξει χωρητικότητα μέχρι 400 Mbps σε πλήρως αμφίδρομη λειτουργία. Για παράδειγμα, το μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος καναλιού δεν ξεπερνάει συνήθως τα 56 MHz και με χρήση υψηλής κωδικοποίησης (πχ. 256-QAM), η ζεύξη μπορεί να μεταδώσει περίπου 350 Mbps ανά κανάλι. Γίνεται επομένως κατανοητό πως για να υποστηριχθούν μεγαλύτεροι ρυθμοί μετάδοσης απαιτούνται περισσότερα κανάλια, γεγονός που εγείρει θέματα παρεμβολών μεταξύ τους [81].

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της χρήσης των μικροκυματικών συστημάτων για το οπισθοζευκτικό δίκτυο αποτελεί η δυσμενής επίδραση που έχουν οι ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις. Καθώς η συχνότητα που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση αυξάνεται, υπάρχει μια αντίστοιχη αύξηση στο εύρος ζώνης που μπορεί να μεταφερθεί, αλλά αυξάνει και η δυσμενής επίδραση που έχουν οι περιβαλλοντικοί παράγοντες στην επίδοση του συστήματος (πχ. απώλειες λόγω βροχής) [38],[20].

2.2.1.2 Τεχνολογία χιλιοστομετρικών κυμάτων

Ο όρος χιλιοστομετρικό κύμα (millimeter wave) αφορά κάθε είδους ραδιοεπικοινωνία που γίνεται στη ζώνη συχνοτήτων 30-300 GHz [81]. Παρόλα αυτά, ο όρος του χιλιοστομετρικού κύματος χρησιμοποιείται συνήθως για να περιγράψει τη ραδιοεπικοινωνία στη ζώνη συχνοτήτων 60-80 GHz. Αν και η τεχνολογία των χιλιοστομετρικών κυμάτων μπορεί να προσφέρει υψηλή χωρητικότητα ικανοποιώντας τις ανάγκες του οπισθοζευκτικού δικτύου, υπάρχουν σημαντικά θέματα αξιοπιστίας και κλιμακωσιμότητας που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Πρόσφατα, οι προμηθευτές εξοπλισμού χιλιοστομετρικών κυμάτων κατάφεραν να πετύχουν ρυθμούς αποστολής της τάξης των 800 Mbps² σε πλήρως αμφίδρομη λειτουργία (full-duplex). Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι προκειμένου η τεχνολογία των χιλιοστομετρικών κυμάτων να προσεγγίσει μια χωρητικότητα της τάξης του 1 Gbps, απαιτείται το εύρος δέσμης της κεραίας να είναι αυστηρά εστιασμένο και το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται να είναι πολύ μεγάλο (10 GHz Tx/Rx). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται σημαντικά ζητήματα αξιοπιστίας λόγω των διαλείψεων εξαιτίας της βροχής που επηρεάζει δυσμενώς τις επικοινωνίες σε υψηλές συχνότητες. Υπενθυμίζεται ότι η εξασθένιση λόγω βροχής στις συχνότητες 1-100 GHz είναι μέγιστη στην περιοχή μεταξύ 60-80 GHz, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως από τα χιλιοστομετρικά κύματα. Μια δυνατή βροχή (25 mm/hr) προκαλεί μια απώλεια της τάξης των 10 db/km που έχει ως αποτέλεσμα η χωρητικότητα των 800 Mbps να μειώνεται στα 50 Mbps. Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα που εγείρεται από τη χρήση των χιλιοστομετρικών κυμάτων είναι η ανάγκη ύπαρξης οπτικής επαφής μεταξύ των σημείων επικοινωνίας και η απαίτηση για αυστηρή ευθυγράμμιση της δέσμης της κεραίας, και δεδομένου ότι μέχρι σήμερα δεν υπάρχει εσωτερικός μηχανισμός εντοπισμού και διόρθωσης της ευθυγράμμισης, απαιτείται η φυσική παρουσία τεχνικών για την επιδιόρθωση του προβλήματος. Επιπλέον, λόγω του προβλήματος της ευθυγράμμισης η εγκατάσταση του εξοπλισμού που χρησιμοποιεί χιλιοστομετρικά κύματα πρέπει να αποφεύγεται σε πύργους που έχουν ιδιότητες ταλάντωσης και συστροφής μεγαλύτερες από 1 μοίρα³.

Πέραν των παραπάνω προβλημάτων, γίνεται εμφανές ότι η τεχνολογία των χιλιοστομετρικών κυμάτων απαιτεί μεγάλο εύρος διαθέσιμου φάσματος, προκειμένου να ικανοποιήσει τις υψηλές ανάγκες των χρηστών, και προσφέρει περιορισμένη ευελιξία στη μακροπρόθεσμη αύξηση της χωρητικότητας.

Η χρήση του αδειοδοτημένου εύρους ζώνης για τα χιλιοστομετρικά κύματα έχει μικρότερο κόστος σε σύγκριση με τα μικροκυματικά συστήματα. Ωστόσο, το κόστος αυτό εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό κομμάτι του συνολικού κόστους για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών, ενώ η απόκτηση άδειας χρήσης εξαρτάται από τη ρυθμιστική αρχή κάθε χώρας. Από την άλλη πλευρά, η χρήση του μη αδειοδοτημένου εύρους ζώνης ενέχει σημαντικούς επενδυτικούς κινδύνους. Για παράδειγμα, αν μετά την ανάπτυξη του δικτύου, ένας άλλος πάροχος εγκαταστήσει κι αυτός εξοπλισμό που λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο εύρος ζώνης, τότε υπάρχει η πιθανότητα η συνολική χωρητικότητα του δικτύου να υποδιπλασιαστεί.

²Συνήθως, αυτός ο ρυθμός μετάδοσης διαφημίζεται ως 2 Gbps και αφορά ημιαμφίδρομη (half-duplex) επικοινωνία, καθώς και μη χρησιμοποιήσιμη χωρητικότητα λόγω του επίβαρου μετάδοσης (transmission overhead).

³Η πλειονότητα των πύργων που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν βαθμό ταλάντωσης μεγαλύτερο από 2 μοίρες.

2.2.1.3 Οπτική επικοινωνία ελευθέρου χώρου

Η οπτική επικοινωνία ελευθέρου χώρου (Free Space Optics) είναι μια μέθοδος που ομοιάζει με τα μικροκυματικά συστήματα και βασίζεται στη μετάδοση οπτικού σήματος από λέιζερ υψηλής ισχύος. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας απαιτεί την ύπαρξη οπτικής επαφής μεταξύ πομπού και δέκτη και χαρακτηρίζεται από την ευκολία εγκατάστασης του εξοπλισμού, όπως συμβαίνει και στα μικροκυματικά συστήματα. Ωστόσο, εν αντιθέσει με τα μικροκυματικά συστήματα, δεν απαιτείται η αδειοδότηση φάσματος, γεγονός που μειώνει το κόστος χρήσης τους, ενώ η χωρητικότητα που επιτυγχάνουν μπορεί να ξεπεράσει το 1 Gbps σε μια απόσταση 1.6 km [81].

Ένα από τα μειονεκτήματα των οπτικών συστημάτων για επικοινωνία ελευθέρου χώρου είναι η εξάρτησή τους από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, αν και δεν επηρεάζονται από τις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις, όπως συμβαίνει με τα μικροκυματικά συστήματα, επηρεάζονται δυσμενώς από την ομίχλη και το νέφος. Για το σκοπό αυτό, πολλοί παρόχοι κινητών επικοινωνιών έχουν χρησιμοποιήσει τα συστήματα αυτά ως εναλλακτικές οδεύσεις ενός μικροκυματικού οπισθοζευκτικού δικτύου [20].

2.2.1.4 Δορυφορικά συστήματα

Μια εναλλακτική επιλογή για το οπισθοζευκτικό δίκτυο αποτελεί η χρήση δορυφόρου. Ένα δορυφορικό οπισθοζευκτικό δίκτυο χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή καμία από τις παραπάνω επιλογές, όπως για παράδειγμα σε απομακρυσμένες τοποθεσίες και νησιά. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της επιλογής είναι η γρήγορη εγκατάστασή τους και η ικανότητα να καλύπτουν μια ευρεία περιοχή. Αντίθετα, στα κύρια μειονεκτήματα των δορυφορικών συστημάτων συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος χρήσης και η καθυστέρηση διάδοσης. Συγκεκριμένα, η τυπική καθυστέρηση διάδοσης για τις δορυφορικές ζεύξεις είναι περίπου 270 msec επιπροσθέτως της καθυστέρησης επεξεργασίας, ενώ η αποδεκτή από άκρη σε άκρη καθυστέρηση για τις υπηρεσίες φωνής είναι 250 msec. Επιπλέον, το κόστος για το εύρος ζώνης αναμετάδοσης της τάξης των 768 kbps κυμαίνεται από 3000\$-6000\$ ανά μήνα, ενώ για εύρος ζώνης 1544 kbps το κόστος αυτό αυξάνεται στα 5000\$-12000\$ ανά μήνα [87].

2.2.2 Ενσύρματες τεχνολογίες οπισθοζευκτικού δικτύου

2.2.2.1 Συνδρομητικές γραμμές χαλκού T1/E1

Οι συνδρομητικές γραμμές χαλκού T1/E1 αποτελούν μια αρκετά δημοφιλή πρακτική στην Αμερική για τη διασύνδεση του δικτύου κορμού με το δίκτυο πρόσβασης. Η χρήση τους ως τεχνολογίας οπισθοζευκτικού δικτύου ήταν μια αρκετά αποδοτική επιλογή για τα δίκτυα υπηρεσιών φωνής που απαιτούσαν ένα σταθερό εύρος ζώνης ανά κλήση. Ωστόσο, η ευρεία ανάπτυξη των υπηρεσιών δεδομένων δημιουργεί νέες προκλήσεις. Ένα οπισθοζευκτικό δίκτυο που χρησιμοποιεί γραμμές χαλκού T1/E1 μπορεί να υποστηρίξει χωρητικότητα 1.5-2 Mbps. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι ένας πάροχος κινητών επικοινωνιών πρέπει να μισθώσει περισσότερες γραμμές προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ανάγκες των συνδρομητών του, αυξάνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, το λειτουργικό κόστος του δικτύου. Τέλος, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα αυτών των δικτύων αποτελεί το γεγονός ότι παρέχουν καθορισμένο εύρος ζώνης και δεν προσφέρουν στατιστική πολυπλεξία, η οποία θα ήταν υψηλά αποδοτική για τη μεταφορά

εχρηκτικής κίνησης [8].

2.2.2.2 Ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές

Η χρήση ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (Digital Subscriber Lines - DSL) αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική επιλογή για την υλοποίηση του οπισθοζευκτικού δικτύου σε αστικές και προαστιακές περιοχές όπου υπάρχουν ήδη εγκατεστημένες γραμμές. Υπάρχουν τρεις τεχνολογίες ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη ενός οπισθοζευκτικού δικτύου:

- Γραμμές G.SHDSL. Το G.SHDSL έχει τη μεγαλύτερη εμβέλεια και μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς της τάξης των 2.5 Mbps ανά ζεύγος καλωδίων.
- Γραμμές ADSL2+. Το ADSL2+ μπορεί να υποστηρίξει ταχύτητα κατερχόμενης ζεύξης 20 Mbps και για απόσταση έως 1.5 km.
- Γραμμές VDSL. Το VDSL προσφέρει τους υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης της τεχνολογίας DSL, υποστηρίζοντας ασύμμετρες ταχύτητες μετάδοσης έως 52 Mbps για αποστάσεις μέχρι 1 km.

Όπως γίνεται αντιληπτό, προκειμένου να μπορέσει μια ψηφιακή συνδρομητική γραμμή να υποστηρίξει τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης σε δίκτυα πρόσβασης επόμενης γενιάς, πρέπει να εφαρμοστούν τεχνικές σύνδεσης Ethernet (Ethernet bonding) ενός αριθμού ζευγών, όπως αναφέρεται στο πρότυπο της ITU-T G.998.2 [33].

2.2.2.3 Παθητικά οπτικά δίκτυα

Οι οπτικές τεχνολογίες σημείου προς πολλαπλά σημεία (Point-to-Multipoint), όπως είναι τα Ethernet παθητικά οπτικά δίκτυα (Ethernet PON - EPON) και τα Gigabit οπτικά δίκτυα (Gigabit PON - GPON), χρησιμοποιούνται από πολλούς παρόχους ενσύρματων επικοινωνιών και σκοπός τους είναι να αντικαταστήσουν τις ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές DSL για την παροχή ευρυζωνικών υπηρεσιών. Καθώς η εγκατάσταση αυτών των δικτύων εξαπλώνεται ραγδαία σε μητροπολιτικές και προαστιακές περιοχές, η χρήση τους ως κομμάτι ενός οπισθοζευκτικού δικτύου κινητών επικοινωνιών αναμένεται να αυξηθεί. Εν αντιθέσει με τις ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές, τα οπτικά δίκτυα παρέχουν υψηλή χωρητικότητα σε μεγάλες αποστάσεις [20]. Λόγω αυτών των χαρακτηριστικών τους, τα δίκτυα αυτά θεωρούνται ότι αποτελούν την πλέον συνετή επιλογή για την παροχή υψηλής χωρητικότητας στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, ικανής να ανταποκριθεί στις τρέχουσες αλλά και στις μελλοντικές απαιτήσεις του δικτύου πρόσβασης. Ωστόσο, αν δεν υπάρχει ήδη η οπτική υποδομή, η εγκατάστασή τους είναι χρονοβόρα και χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος. Συγκεκριμένα, η εγκατάσταση οπτικών ινών ανά μίλι σε πυκνοκατοικημένες περιοχές κυμαίνεται μεταξύ 250000\$-700000\$ [81]. Για το λόγο αυτό, αποτελεί συνήθης πρακτική η ενοικίαση του δικτύου οπτικών ινών προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση των δεδομένων μεταξύ του δικτύου πρόσβασης και του δικτύου κορμού του παρόχου κινητών επικοινωνιών. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα οπτικά δίκτυα στοχεύουν κυρίως την αγορά των καταναλωτών, αναμένεται ότι οι ανταγωνιστικές τιμές θα προσφέρουν ένα χαμηλό λειτουργικό κόστος για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών [20].

2.3 Σύγκριση Τεχνολογιών Οπισθοζευκτικού Δικτύου

Η ορθή επιλογή της τεχνολογίας του οπισθοζευκτικού δικτύου αποτελεί σημαντική πρόκληση για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών προκειμένου να καταφέρει να ικανοποιήσει τις υψηλές απαιτήσεις των συνδρομητών του με αποδοτικό και οικονομικό τρόπο. Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει μια μόνο σωστή επιλογή, αλλά αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ζήτηση του εύρους ζώνης, τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής κτλ.

Η επιλογή της χρήσης οπτικών δικτύων στο φυσικό στρώμα του οπισθοζευκτικού δικτύου αποτελεί χωρίς αμφιβολία την πιο κατάλληλη επιλογή για τα δίκτυα επόμενης γενιάς καθώς παρέχει απεριόριστη χωρητικότητα και χαμηλή καθυστέρηση. Ωστόσο το υψηλό κόστος της εγκατάστασης τους, τα καθιστά αποδοτικά μόνο σε περιοχές που υπάρχει πολύ υψηλή ζήτηση σε εύρος ζώνης (πχ. μητροπολιτικές περιοχές).

Από την άλλη μεριά, η χρήση των γραμμών DSL αν και μπορεί να ικανοποιήσει τις τρέχουσες ανάγκες του οπισθοζευκτικού δικτύου, θεωρείται μια βραχύβια λύση λόγω των περιορισμών που υπάρχουν στην τεχνολογία αυτή. Αντίστοιχα, η χρήση των συνδρομητικών γραμμών T1/E1 αν και αποδείχτηκε ικανοποιητική για τα δίκτυα προηγούμενης γενιάς, δεν μπορεί να ανταπεξέλθει στις τρέχουσες απαιτήσεις υψηλής χωρητικότητας.

Η χρήση ενός ασύρματου οπισθοζευκτικού δικτύου έχει αρκετά πλεονεκτήματα ως προς το κόστος και την ευκολία εγκατάστασης και αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή ανάμεσα στους παρόχους, ειδικά σε περιοχές με ιδιαίτερα γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, τα ασύρματα δίκτυα έχουν περιορισμένη χωρητικότητα (μέχρι 1 Gbps) και επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των τεχνολογιών που αναλύθηκαν παραπάνω.

2.4 Απαιτήσεις Οπισθοζευκτικού Δικτύου

Αρχικά πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή και η ανάπτυξη ενός οπισθοζευκτικού δικτύου είναι ευθύνη του ίδιου του παρόχου κινητών επικοινωνιών, και οι απαιτήσεις που θέτει γι' αυτό ποικίλουν μεταξύ των διαφορετικών παρόχων. Παρόλα αυτά, η NGMN (Next Generation Mobile Networks) Alliance, έχει θέσει ένα σύνολο από υψηλού επιπέδου απαιτήσεις όσον αφορά το οπισθοζευκτικό δίκτυο, προκειμένου να μπορεί να υποστηρίξει τις ανάγκες των δικτύων νέας γενιάς [56]. Συγκεκριμένα, ως προς τη διαθεσιμότητα του οπισθοζευκτικού δικτύου, το ποσοστό που θέτει ως στόχο η NGMN Alliance για έναν πάροχο είναι 99.99%. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το 99.99% του χρόνου, δεν θα πρέπει να ανακύπτουν διακοπές στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, οι οποίες θα οδηγήσουν σε διακοπή της σύνδεσης των κινητών συνδρομητών. Σημειώνεται ότι το ποσοστό αυτό αφορά μόνο το οπισθοζευκτικό δίκτυο και δεν περιλαμβάνει προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν στο Σταθμό Βάσης ή στην ασύρματη ζεύξη. Η τάξη μεγέθους του χρόνου μιας διακοπής (περιλαμβανομένης της ασύρματης ζεύξης, του οπισθοζευκτικού δικτύου, κτλ.) συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 500ms-2s.

Επιπλέον, η NGMN Alliance ορίζει και την ανάγκη ύπαρξης ευέλικτων συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας προκειμένου να μπορούν να ικανοποιηθούν, με χαμηλό κόστος, οι ανάγκες των διαφορετικών κομματιών του οπισθοζευκτικού δικτύου που ε-

Τεχνολογία	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μικροκυματική	Γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση. Χαμηλό κόστος	Ανάγκη οπτικής επαφής. Επίδραση καιρικών φαινομένων. Κόστος αγοράς φάσματος.
Χιλιομετρικά κύματα	Γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση	Ανάγκη οπτικής επαφής. Επίδραση καιρικών φαινομένων. Κόστος αγοράς φάσματος. Αυστηρή ευθυγράμμιση δέσμης κεραίων.
Δορυφορική	Χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές. Γρήγορη εγκατάσταση	Υψηλό κόστος. Καθυστέρηση μετάδοσης. Χαμηλή χωρητικότητα.
Οπτική επικοινωνία ελεύθερου χώρου	Γρήγορη και εύκολη εγκατάσταση. Δεν απαιτεί αδειοδοτημένο φάσμα	Ανάγκη οπτικής επαφής. Επίδραση καιρικών φαινομένων.
Συνδρομητικές γραμμές χαλκού T1/E1	Προϋπάρχουσα εγκατάσταση	Σταθερό εύρος ζώνης. Χαμηλή χωρητικότητα.
Ψηφιακές συνδρομητικές γραμμές (DSL)	Προϋπάρχουσα εγκατάσταση	Αρνητική επίδραση της απόστασης στη παρεχόμενη χωρητικότητα.
Παθητικά οπτικά δίκτυα	Απεριόριστη χωρητικότητα. Μη εξάρτηση από απόσταση. Κλιμακωσιμότητα	Μεγάλος χρόνος εγκατάστασης. Υψηλό κόστος.

Πίνακας 2.1: Συνοπτικός πίνακας σύγκρισης τεχνολογιών οπισθοζευκτικού δικτύου.

ξυπηρετούν σταθμούς βάσης με διαφορετικές απαιτήσεις. Ως προς τη συμβατότητα του οπισθοζευκτικού δικτύου, αυτό πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει τόσο δίκτυα παλαιότερης γενιάς (2G, 2.5G, 3G) όσο και δίκτυα επόμενης γενιάς τα οποία είναι βασισμένα στο IP πρωτόκολλο.

Τέλος, όσον αφορά το απαιτούμενο εύρος ζώνης, ορίζεται ως απαίτηση η υποστήριξη δύο ρυθμών μετάδοσης, ενός μέσου ρυθμού και ενός μέγιστου ρυθμού μετάδοσης, με ευέλικτο και χβαντισμένο τρόπο. Συγκεκριμένα, συνιστάται ο μέσος ρυθμός, ο οποίος αντιστοιχεί στον εκχωρημένο ρυθμό μετάδοσης (Committed Information Rate - CIR), και ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης (Peak Information Rate - PIR) να δίνονται σε βήματα των:

- 2 Mbps για εύρος ρυθμού από 2-30 Mbps.
- 10 Mbps για εύρος ρυθμού από 30-100 Mbps.
- 100 Mbps για εύρος ρυθμού μεγαλύτερο των 100 Mbps.

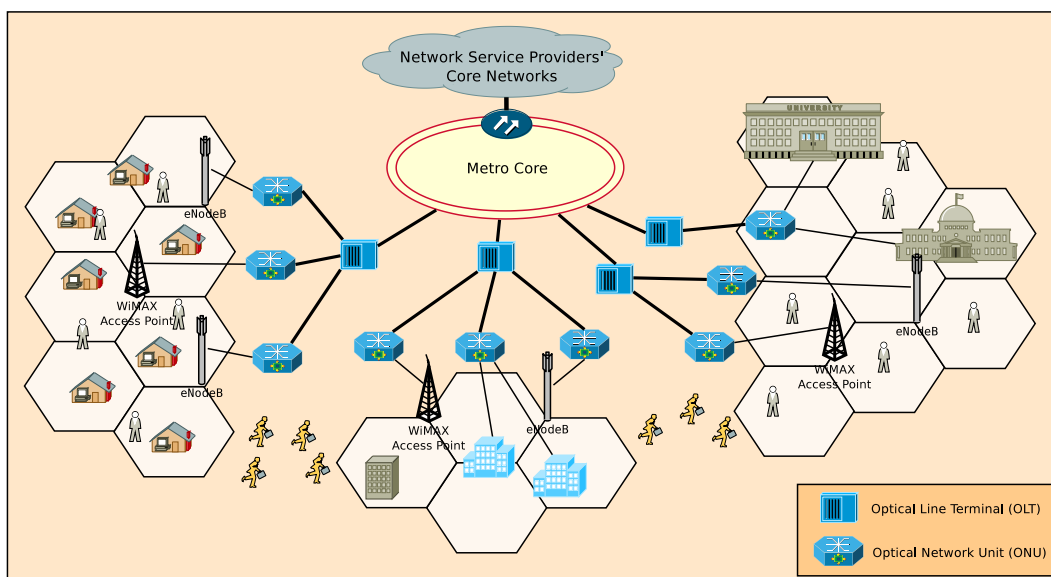
προσφέροντας έτσι ένα μοντέλο κοστολόγησης που αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι απαιτήσεις του παρόχου κινητών επικοινωνιών.

2.5 Οπτική-Ασύρματη Συγκεκλιμένη Υποδομή

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα οπτικά δίκτυα αποτελούν τη βέλτιστη επιλογή για την υποστήριξη ενός οπισθοζευκτικού δικτύου νέας γενιάς. Η απεριόριστη χωρητικότητα που προσφέρουν μπορεί να ικανοποιήσει τόσο τις τρέχουσες απαιτήσεις του δικτύου πρόσβασης, όσο και αυτές των κινητών συστημάτων επικοινωνιών επόμενης

γενεάς. Προς αυτή την κατεύθυνση έχει προταθεί η σύγκλιση των ασύρματων δικτύων πρόσβασης με ένα οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο (Σχήμα 2.4) [4], [71], [72]. Η σύγκλιση αυτών των δύο ετερογενών δικτύων αποτελεί μια ασφαλή και αποδοτική λύση προκειμένου ο πάροχος κινητών επικοινωνιών να μπορεί να ικανοποιήσει τόσο τις τρέχουσες όσο και τις μελλοντικές απαιτήσεις των συνδρομητών του [63].

Η σύγκλιση οπτικών και ασύρματων δικτύων έχει ήδη ξεκινήσει εδώ και ορισμένα χρόνια, παρέχοντας υπηρεσίες οπτικής οπισθοζευξης στους παρόχους κινητών επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, η Bright House Networks, η οποία αποτελεί την 6η μεγαλύτερη εταιρεία παροχής ενσύρματων επικοινωνιών στην Αμερική, ξεκίνησε το 2006 την εγκατάσταση ενός οπτικού δικτύου EPON. Το οπτικό της δίκτυο χρησιμοποιείται από πολλούς παρόχους κινητών επικοινωνιών ως οπισθοζευκτικό δίκτυο, ενώ παράλληλα η εταιρεία παρέχει υπηρεσίες FTTx σε επιχειρηματικούς καταναλωτές. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί η εταιρεία CenturyLink, η οποία είναι η 3η μεγαλύτερη εταιρεία επικοινωνιών στην Αμερική, και παρέχει υπηρεσίες σε οικιακούς καταναλωτές, εταιρικούς καταναλωτές, σε κυβερνητικές υπηρεσίες και σε πελάτες χονδρικής. Το 2009, η CenturyLink ανακοίνωσε τη μετάβαση του οπισθοζευκτικού της δικτύου από τις παραδοσιακές T1 γραμμές στη χρήση του οπτικού δικτύου GPON της Calix [41].



Σχήμα 2.4: Σύγκλιση ασύρματων και οπτικών δικτύων.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ενός GPON για το οπισθοζευκτικό δίκτυο του παρόχου κινητών επικοινωνιών συνοψίζονται στα παρακάτω [2]:

- Ελαχιστοποίηση κέντρων μεταγωγής. Λόγω της επικοινωνίας σημείου προς πολλαπλά σημεία που επιτρέπει το GPON, σε μια θύρα ενός OLT⁴ (Optical Line Terminal) συνδέονται μέχρι 64 ONUs⁵ (Optical Network Units), ελαχιστοποιώντας τα κέντρα μεταγωγής.
- Υψηλή αξιοπιστία και χαμηλό λειτουργικό κόστος. Τα παθητικά οπτικά δίκτυα προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία και ελαχιστοποιούν το λειτουργικό κόστους του παρόχου.

⁴Το OLT αποτελεί τη ρίζα του οπτικού δικτύου διανομής.

⁵Η ONU είναι οντότητα του οπτικού δικτύου και αποτελεί τη διεπαφή του δικτύου πρόσβασης του τελικού χρήστη με το οπτικό δίκτυο διανομής.

- Αποδοτική τοπολογία. Η δένδροειδής τοπολογία απαιτεί την εγκατάσταση λιγότερων οπτικών ινών σε σύγκριση με τοπολογίες σημείο προς σημείο ή αρχιτεκτονικές δακτυλίου.
- Κλιμακωσιμότητα και διαχρονικότητα. Ένα παθητικό οπτικό δίκτυο παρέχει απεριόριστο εύρος ζώνης και δεν απαιτείται η αντικατάστασή του για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των δικτύων επόμενης γενεάς.
- Συνέργεια με υπηρεσίες σταθερής πρόσβασης. Ένα πάροχος κινητών επικοινωνιών που εγκαθιστά οπτικές ίνες για το οπισθοζευκτικό δίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιήσει την υποδομή αυτή για την παροχή υπηρεσιών σταθερής πρόσβασης.
- Παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Το GPON υλοποιεί κατάλληλους μηχανισμούς που επιτρέπουν την πολυπλεξία διαφορετικών ροών υπηρεσίας παρέχοντας ποιότητα υπηρεσίας με βάση συμφωνητικά επιπέδου υπηρεσίας ανά είδος υπηρεσίας.

2.5.1 Δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης σε οπτικά δίκτυα

Εκτός από τις απαιτήσεις του οπισθοζευκτικού δικτύου, όπως έχουν διατυπωθεί από τη NGMN Alliance για τη διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσίας προς τους τελικούς χρήστες, το ίδιο το οπτικό δίκτυο διαθέτει κατάλληλους μηχανισμούς που εξασφαλίζουν την παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις υποδείξεις της ITU (ITU-T G.984.3 [32]), τα δίκτυα GPON υποστηρίζουν μηχανισμούς δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης (Dynamic Bandwidth Allocation - DBA). Εν συντομία, η δυναμική εκχώρηση εύρους ζώνης επιτρέπει σε ένα OLT να ανακαταείμει τις ευκαιρίες μετάδοσης των ONUs στη ροή ανόδου (upstream). Σε αντίθεση με τη στατική εκχώρηση εύρους ζώνης, ο μηχανισμός της δυναμικής εκχώρησης βελτιώνει τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης της ροής ανόδου στο GPON, επιτρέποντας στο οπτικό δίκτυο να προσαρμόζεται κατάλληλα στις μεταβολές της κίνησης στην ONU. Για την υλοποίηση του μηχανισμού αυτού, χρησιμοποιούνται οι T-CONTs (transmission containers). Οι T-CONTs είναι οντότητες στην ONU που μεταφέρουν την κίνηση και βελτιώνουν τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης της ροής ανόδου στο οπτικό δίκτυο.

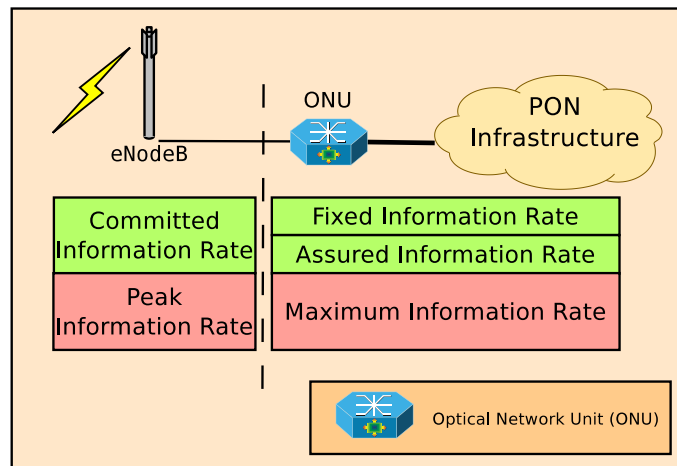
Στο GPON κάθε οντότητα στην οποία εκχωρείται εύρος ζώνης στη ροή ανόδου συμβολίζεται με μια ταυτότητα εκχώρησης (allocation ID - Alloc-ID). Μια Alloc-ID είναι ένας αριθμός 12-bit, τον οποίο εκχωρεί το OLT σε μια ONU προκειμένου να αναγνωρίσει μια οντότητα μεταφοράς κίνησης στην οποία εκχωρείται εύρος ζώνης ροής ανόδου, στα πλαίσια μιας ONU. Τέτοιες οντότητες μπορούν να αναπαρασταθούν είτε από μια T-CONT, είτε από το διάυλο διαχείρισης και ελέγχου του οπτικού δικτύου (Optical Network Unit Management and Control Channel - OMCC). Επομένως, κάθε T-CONT, το οποίο προσδιορίζεται από μία Alloc-ID, αναπαριστά μια λογική ζεύξη επικοινωνίας ανάμεσα στο OLT και στην ONU. Σε κάθε T-CONT παρέχεται ένας περιγραφέας κίνησης (traffic descriptor) που καθορίζει τρία διαφορετικά είδη εύρους ζώνης: ένα σταθερό εύρος ζώνης (fixed bandwidth), ένα διασφαλισμένο εύρος ζώνης (assured bandwidth) και ένα μέγιστο εύρος ζώνης (maximum bandwidth). Το εύρος ζώνης πέραν της διασφαλισμένης τιμής μπορεί αν είναι είτε μη διασφαλισμένο, είτε βέλτιστης προσπάθειας. Περισσότερες λεπτομέρειες για το μηχανισμό δυναμικής ανάθεσης εύρους ζώνης παρατίθενται στο Παράρτημα Α'.

Το σταθερό εύρος ζώνης αναπαριστά το ποσοστό της χωρητικότητας της ροής ανόδου την οποία εκχωρεί στατικά το OLT σε δεδομένη Alloc-ID, ανεξαρτήτως των απαιτήσεων της κίνησης που έχει αυτή ή του συνολικού φόρτου στο οπτικό δίκτυο. Το διασφαλισμένο εύρος ζώνης αναπαριστά το ποσοστό της χωρητικότητας της ροής ανόδου που αναμένεται να εκχωρήσει το OLT σε μια δεδομένη Alloc-ID, εφόσον αυτό απαιτηθεί από την κίνηση που ικανοποιεί η ONU, ανεξαρτήτως του συνολικού φόρτου στο οπτικό δίκτυο. Σημειώνεται, ότι εφόσον ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της κίνησης, το OLT μπορεί να εκχωρήσει μέρος ή το σύνολο του διασφαλισμένου εύρους ζώνης σε άλλες Alloc-IDs. Τέλος, το μέγιστο εύρος ζώνης αναπαριστά το άνω όριο του συνολικού εύρους ζώνης το οποίο μπορεί να εκχωρηθεί σε μια Alloc-ID.

Γενικά, οι προδιαγραφές των υπηρεσιών ροής συνήθως περιλαμβάνουν τουλάχιστον δύο ρυθμούς: τον εκχωρημένο ρυθμό (CIR) και το μέγιστο ρυθμό μετάδοσης (PIR). Στη ροή καθόδου (downstream), το OLT έχει την ευθύνη για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας με βάση τις προδιαγραφές της εκάστοτε υπηρεσίας και τους διαθέσιμους πόρους.

Στη ροή ανόδου (upstream), η παροχή ποιότητας υπηρεσίας απαιτεί το χαρακτηρισμό των συγκεντρωτικών προδιαγραφών των υπηρεσιών που πολυπλέκονται σε μια T-CONT. Συγκεκριμένα, το άθροισμα του σταθερού και του διασφαλισμένου εύρους ζώνης του περιγραφέα της κίνησης ενός T-CONT δεν πρέπει να είναι μικρότερο (τυπικά ίσο) με το άθροισμα των εκχωρημένων ρυθμών μετάδοσης των επιμέρους ροών. Επίσης, το μέγιστο εύρος ζώνης του περιγραφέα της κίνησης του T-CONT δεν πρέπει να είναι μικρότερο από την ανώτερη τιμή του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης (PIRs) των επιμέρους ροών, και όχι μεγαλύτερο από το άθροισμά τους.

Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται μια ενδεικτική αντιστοίχιση των ρυθμών μετάδοσης του οπτικού και του ασύρματου δικτύου σε μια συγκεκριμένη υποδομή.



Σχήμα 2.5: Αντιστοίχιση ρυθμών μετάδοσης σε συγκεκριμένο ασύρματο-οπτικό δίκτυο.

2.6 Δυναμικά Συμφωνητικά Επιπέδου Υπηρεσίας

Με βάση τα παραπάνω, γίνεται κατανοητό ότι η χρήση ενός οπτικού οπισθοζευκτικού δικτύου αποτελεί την πλέον βέλτιστη επιλογή για την ικανοποίηση τόσο των τρεχουσών, όσο και των μελλοντικών απαιτήσεων των συνδρομητών. Κύριο μειονέκτημα της

χρήσης ενός οπτικού δικτύου αποτελεί το υψηλό κόστος εγκατάστασης των οπτικών ινών, γεγονός που καθιστά μια τέτοια επένδυση ασύμφορη. Προκειμένου να υπερκεραστεί το εμπόδιο αυτό, η μίσθωση των κυκλωμάτων ενός ήδη εγκατεστημένου οπτικού δικτύου θεωρείται ως η πιο αποδοτική λύση για την υλοποίηση της σύγκλισης των οπτικών και των ασύρματων δικτύων. Η μίσθωση αυτή πρέπει να συνοδεύεται από ένα συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας (SLA), στο οποίο πρέπει να ορίζονται με δυναμικό τρόπο οι παράμετροι του δικτύου κινητών επικοινωνιών.

2.6.1 Χαρακτηριστικά συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας

Ένα συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας [85] αποτελεί μια επίσημη διαπραγματευθείσα συμφωνία μεταξύ δύο εταίρων και αποτελεί ένα συμβόλαιο μεταξύ ενός παρόχου υπηρεσιών και ενός πελάτη. Η σχεδίαση ενός τέτοιου συμφωνητικού έχει ως στόχο να δημιουργήσει μια κοινή αντίληψη στα αντισυμβαλλόμενα μέρη σχετικά με την ποιότητα υπηρεσίας, τις προτεραιότητες και τις ευθύνες, καλύπτοντας παράλληλα πολλές πτυχές της σχέσης μεταξύ των δύο εταίρων, όπως η παροχή των υπηρεσιών, η κοστολόγηση, η επίδοση των υπηρεσιών κτλ. Ωστόσο, παρόλο που σε ένα συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας μπορούν να περιγραφούν πολλά ζητήματα, ο κύριος σκοπός του είναι η συμφωνία μεταξύ των εταίρων σε επίπεδο παρεχόμενων υπηρεσιών.

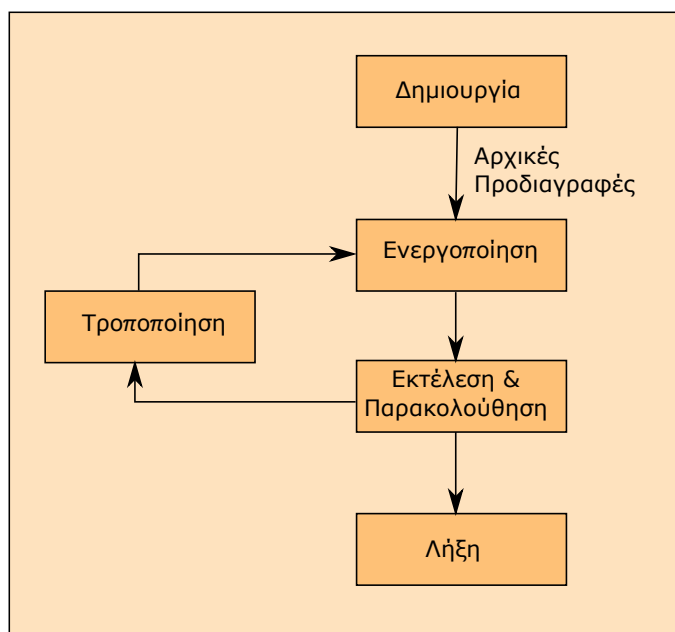
Στα πλαίσια ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας πρέπει να οριστούν με καθορισμένο και σαφή τρόπο οι δείκτες και οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας που εγγυώνται από τον πάροχο των υπηρεσιών, η μέθοδος μέτρησης των δεικτών ποιότητας, η περίοδος και η συχνότητα των αναφορών επίδοσης, καθώς και οι ευθύνες των δύο εταίρων. Για το σκοπό αυτό, θεωρείται απαραίτητο να περιγράφονται με ακρίβεια οι τιμές κατωφλίων των παραπάνω παραμέτρων, ορίζοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, τις προδιαγραφές των υπηρεσιών. Η περιγραφή των δεικτών ποιότητας στα πλαίσια ενός τέτοιου συμφωνητικού πρέπει να γίνεται με συνεπή τρόπο, να είναι κατανοητή από τα αντισυμβαλλόμενα μέρη και να είναι απαλλαγμένη από τεχνικές λεπτομέρειες.

Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των παραμέτρων ποιότητας που σχετίζονται με την παρεχόμενη τεχνολογία και των ανεξάρτητων παραμέτρων ποιότητας. Ειδικότερα, οι τεχνολογικοί δείκτες ποιότητας σχετίζονται με την τεχνολογία του δικτύου, όπως για παράδειγμα η ανεκτή καθυστέρηση, ο ρυθμός δεδομένων και ο ρυθμός λαθών. Αντίθετα, οι ανεξάρτητες παράμετροι ποιότητας αφορούν τα κριτήρια λειτουργικής επίδοσης και σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα της παρεχόμενης υπηρεσίας και το μέγιστο χρόνο αποκατάστασης βλαβών.

Προκειμένου να διασφαλιστεί η τήρηση των συμφωνηθεισών παραμέτρων ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας, η μέτρηση των παραμέτρων αυτών για τον εντοπισμό αποκλίσεων από τις προσυμφωνημένες τιμές θεωρείται απαραίτητη και από τους δύο εταίρους. Οι μετρήσεις μπορεί να γίνονται είτε αυτόματα, είτε χειροκίνητα και να ακολουθεί η ενημέρωση του αντισυμβαλλόμενου αν εντοπιστεί κάποια απόκλιση από τις τιμές που ορίζονται στο συμφωνητικό. Σε περίπτωση αναφοράς παραβίασης του συμφωνητικού, πρέπει οι αντισυμβαλλόμενοι να συγκρίνουν τις μετρηθείσες τιμές των παραμέτρων και αν βεβαιωθεί η παραβίαση τότε ενεργοποιούνται οι αντίστοιχες ρήτρες που ορίζονται στο συμφωνητικό και σχετίζονται με αποζημιώσεις προς τον εταίρο του οποίου τα συμφέροντα έχουν θιγεί.

Ο κύκλος ζωής ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας ξεκινάει από τη δημιουργία του, κατά την οποία καθορίζονται οι παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και οι ρή-

τρεις παραβίασης. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ενεργοποίηση του όπου το συμφωνητικό τίθεται σε λειτουργία. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, αν τα αντισυμβαλλόμενα μέρη διαπιστώσουν ότι το παρεχόμενο συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες των συνδρομητών, ακολουθεί η διαδικασία επαναδιαπραγμάτευσης των παραμέτρων που έχουν οριστεί. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνεται αυτοματοποιημένα μέσω κατάλληλων μηχανισμών που θα τροποποιούν τις παραμέτρους που περιγράφονται στο συμφωνητικό. Τέλος, ο τερματισμός του συμφωνητικού γίνεται κατά τη λήξη της περιόδου ισχύος και οι δικτυακοί πόροι μπορούν να διατεθούν σε άλλον πελάτη του παρόχου υπηρεσιών [15].



Σχήμα 2.6: Φάσεις κύκλου ζωής ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας.

2.6.2 Συμφωνητικά επιπέδου υπηρεσίας για το οπισθοζευκτικό δίκτυο

Ο πάροχος κινητών επικοινωνιών καλείται να εξυπηρετήσει ένα συνεχώς αυξανόμενο όγκο κίνησης που τα παραδοσιακά οπισθοζευκτικά δίκτυα αδυνατούν να υποστηρίξουν. Ειδικότερα, με βάση τα πρότυπα της τεχνολογίας LTE, η οποία μπορεί να προσφέρει μέγιστη χωρητικότητα της τάξης των 326 Mbps ανά κυψέλη, ένας Σταθμός Βάσης που εξυπηρετεί τρεις κυψέλες απαιτεί ένα οπισθοζευκτικό δίκτυο με χωρητικότητα 1 Gbps. Αν η δέσμευση της χωρητικότητας αυτής γίνει με στατικό τρόπο, καθίσταται εμφανές ότι η ανάπτυξη ενός δικτύου LTE θα ήταν ασύμφορη [15].

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η οπισθοζευκτική τεχνολογία που μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις χωρητικότητας του δικτύου πρόσβασης είναι τα παθητικά οπτικά δίκτυα, τα οποία προσφέρουν τους κατάλληλους μηχανισμούς δυναμικής εκχώρησης εύρους ζώνης. Η εκχώρηση αυτή πρέπει να γίνει με χρήση ενός κατάλληλου συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας, το οποίο θα διασφαλίζει και τα δύο μέρη ως προς την παροχή ποιότητας υπηρεσίας μέσα από το δίκτυό τους. Ειδικότερα, σε ένα συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ ενός παρόχου κινητών επικοινωνιών και ενός παρόχου οπτικού δικτύου πρέπει να περιλαμβάνονται τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

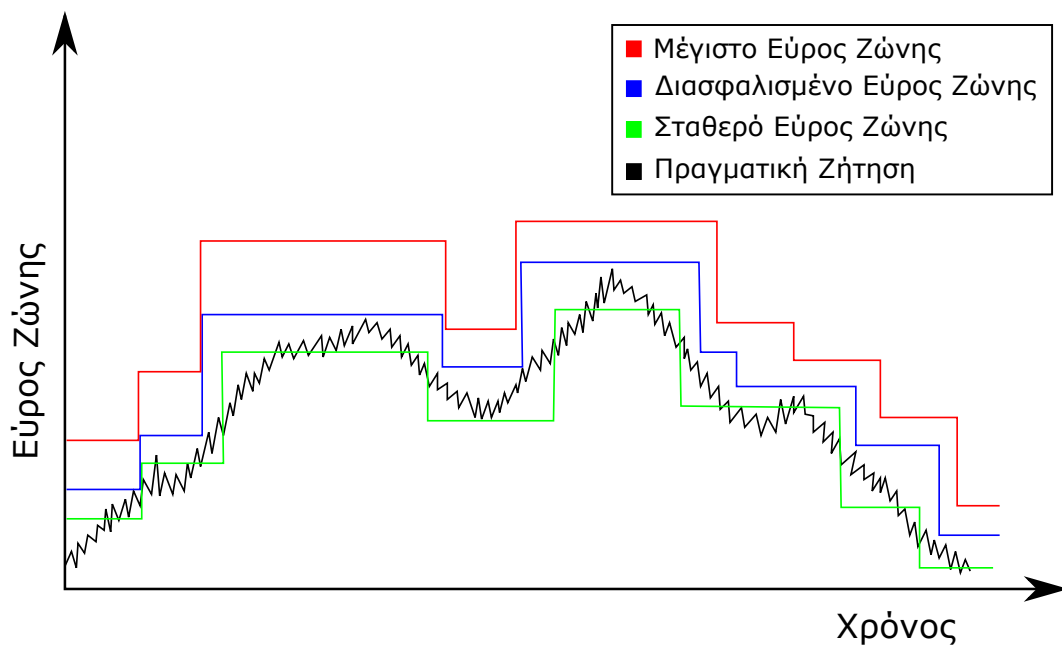
- Καθορισμός των δεικτών επίδοσης. Ειδικότερα πρέπει να καθορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:
 - Ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων (εγγυημένος και επιπρόσθετος ρυθμός μετάδοσης)
 - Καθυστέρηση (delay).
 - Διακύμανση της καθυστέρησης (jitter)
 - Απώλεια πακέτων (packet loss).
 - Ρυθμός σφαλμάτων (bit error rate).
- Καθορισμός των ρυθμών μετάδοσης σε βήματα, όπως ορίζει η NGMN Alliance [56].
- Βέλτιστη χρήση των πόρων του οπτικού δικτύου επιτυγχάνοντας οικονομίες κλίμακας.
- Κλιμακωτές χρεώσεις με βάση τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που περιγράφονται στο συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας.

Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοψίζονται σε έναν ενδεικτικό παράδειγμα συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7.

Με τη χρήση ενός δυναμικού συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου του οπτικού δικτύου επιτυγχάνεται η βέλτιστη και οικονομικά αποδοτικότερη χρήση των πόρων. Ένα τέτοιο παράδειγμα απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8, όπου φαίνεται η κίνηση του Σταθμού Βάσης, ο οποίος επιλέγει δυναμικά τις τιμές των παραμέτρων του ρυθμού μετάδοσης που περιγράφονται στο συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται για την παραμετροποίηση του οπτικού δικτύου προκειμένου να ικανοποιηθεί η ζήτηση που προβλέπεται για το συγκεκριμένο Σταθμό Βάσης με αποδοτικό τρόπο, επιτρέποντας τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων [15].

Συμφωνητικό Επιπέδου Υπηρεσίας												
		Κατηγορίες Παραμέτρων Υπηρεσιών										
		Σχετικές με την Τεχνολογία	Ανεξάρτητες									
Δείκτες Ποιότητας	Οπτική σε Επίπεδο Σημείου Πρόσβασης	Min Guaranteed Information Rate Max Additional Information Rate Max Packet Transfer Delay Max Packet Jitter Max Packet Loss Max Bit Error Rate	Min Availability Time Max Time to Repair Min Time Between Failures									
	Συνολική Οπτική	Mean Guaranteed Information Rate Mean Additional Information Rate Mean Packet Transfer Delay Mean Packet Jitter Mean Packet Loss Mean Bit Error Rate	Mean Availability Time Mean Time to Repair Mean Time Between Failures									
Ρυθμοί Μετάδοσης Δεδομένων	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Guaranteed</th> <th>Additional</th> </tr> <tr> <th>Fixed</th> <th>Assured</th> <th>Non Assured</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x_1 Mbps</td> <td>x_2 Mbps</td> <td>y Mbps</td> </tr> </tbody> </table> <p>όπου τα x_1, x_2 και y παίρνουν τιμές σε βήματα που ορίζονται από την NGMN. Επιπλέον, είναι δυνατός ο προκαθορισμός διαφορετικών τιμών x_1, x_2 και y συναρτήσει του χρόνου.</p>			Guaranteed		Additional	Fixed	Assured	Non Assured	x_1 Mbps	x_2 Mbps	y Mbps
	Guaranteed		Additional									
Fixed	Assured	Non Assured										
x_1 Mbps	x_2 Mbps	y Mbps										
Χρεώσεις	...											
Ρήτρες	Οι ρήτρες είναι συνάρτηση του βαθμού ικανοποίησης των παραμέτρων ποιότητας.											

Σχήμα 2.7: Τυπικό παράδειγμα συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας.



Σχήμα 2.8: Παράδειγμα υλοποίησης συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας.

Κεφάλαιο 3

Δυναμική Διαχείριση των Πόρων

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η προσέγγιση για τη δυναμική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου, η οποία θα αναλυθεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής. Αρχικά, παρατίθεται μια αναφορά στις παραδοσιακές μεθόδους προγραμματισμού και διαστασιολόγησης του δικτύου προκειμένου να αιτιολογηθεί η ανεπάρκεια αυτών των μεθόδων για το σκοπό της διαχείρισης των πόρων ενός οπισθοζευκτικού δικτύου ικανού να υποστηρίξει τις απαιτήσεις των συστημάτων κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς. Στη συνέχεια, περιγράφεται η ιδέα ενός συστήματος που θα επιτρέπει τη δυναμική διαχείριση των πόρων του δικτύου και μελετώνται οι λύσεις φυσικής αρχιτεκτονικής για το σύστημα αυτό, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε μιας εξ' αυτών. Τέλος, εισάγεται η έννοια του ευφυούς πράκτορα για την υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης των πόρων και περιγράφονται όλες οι απαραίτητες διεργασίες που επιτελεί.

3.1 Παραδοσιακές Μέθοδοι Προγραμματισμού και Διαστασιολόγησης του Δικτύου

Ο προγραμματισμός του δικτύου διαφέρει για συστήματα διαφορετικών γενεών. Στα δίκτυα 2G, ο προγραμματισμός γινόταν με βασικό σκοπό την αύξηση της περιοχής κάλυψης του δικτύου. Η εξέλιξη αυτών των δικτύων, τα δίκτυα 3G, προκειμένου να αντεπεξέλθουν στην αύξηση της ζήτησης λόγω των νέων προσφερόμενων υπηρεσιών, απαιτούσαν πιο λεπτομερείς διεργασίες ως προς την ανάλυση της χωρητικότητας και τον προγραμματισμό του δικτύου για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ των Σταθμών Βάσης. Το αποτέλεσμα που προέκυπτε από τη διαδικασία αυτή προσδιόριζε τις θέσεις των Σταθμών Βάσης, καθώς και τις απαραίτητες παραμέτρους λειτουργίας τους. Σημειώνεται ότι αυτή η διαδικασία του προγραμματισμού του δικτύου συντελείται στην αρχική φάση της εγκατάστασης του και υλοποιείται με χρήση κατάλληλων προγραμμάτων λογισμικού [31].

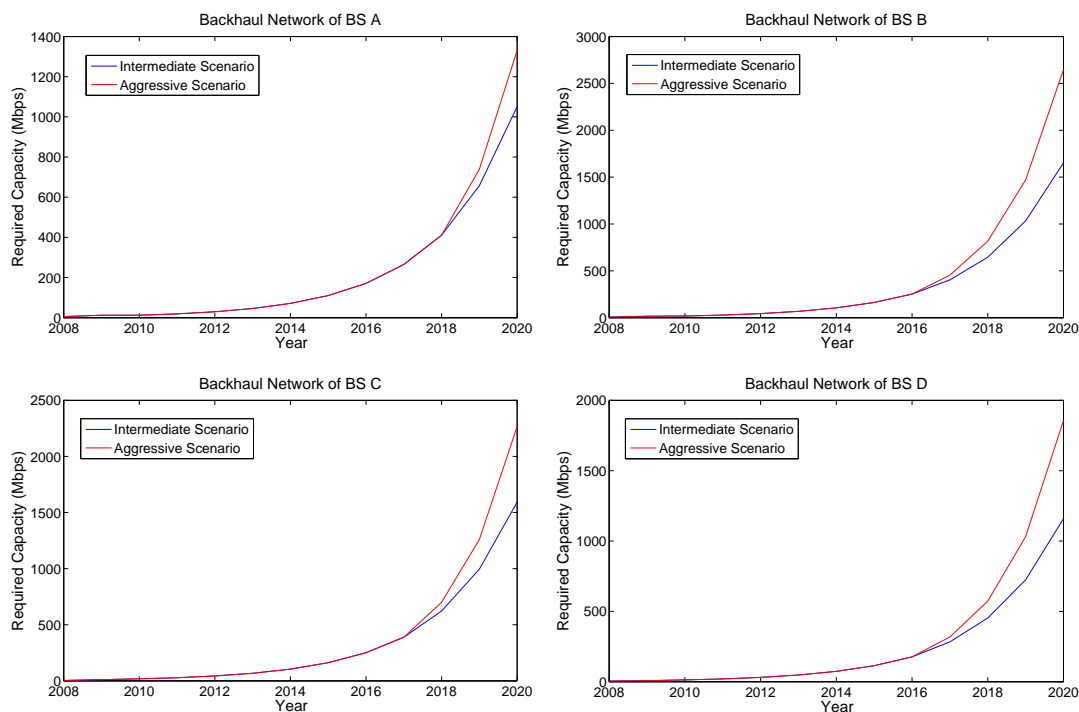
Έπειτα από την εγκατάσταση του δικτύου του παρόχου κινητών επικοινωνιών, λαμβάνει χώρα, ανά συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, η διαδικασία βελτιστοποίησης του δικτύου. Η διαδικασία αυτή έχει ως σκοπό να βελτιώσει τη συνολική ποιότητα του δικτύου όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από τους συνδρομητές του, καθώς και να διασφαλίσει ότι οι πόροι του δικτύου χρησιμοποιούνται με αποδοτικό τρόπο. Η βελτιστοποίηση του δικτύου περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια:

- Μετρήσεις επίδοσης.

- Ανάλυση των αποτελεσμάτων μέτρησης.
- Ενημέρωση των παραμέτρων του δικτύου.

Αν η διαδικασία της βελτιστοποίησης δεν επιφέρει την επιθυμητή αύξηση της χωρητικότητας τότε θα πρέπει να ακολουθηθεί η κατάλληλη διαδικασία αναγνώρισης και αναβάθμισης αυτής. Σκοπός της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι να διασφαλίσει ότι η αναβάθμιση του δικτύου θα ολοκληρωθεί πριν την εμφάνιση υψηλών επιπέδων αποκλεισμού κλήσεων. Αν η αναβάθμιση υλοποιηθεί προγενέστερα από ότι απαιτείται, τότε θα οδηγήσει σε μη αναγκαία αύξηση του κόστους του παρόχου κινητών επικοινωνιών. Για το σκοπό αυτό, οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών πρέπει να συλλέγουν μετρήσεις από το δίκτυο τους που σχετίζονται με τους κύριους δείκτες ποιότητας (Key Performance Indicator - KPI) σε τακτά χρονικά διαστήματα. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις αυτές πρέπει να καταγράφονται ανά χρονικά διαστήματα της τάξης των 15 λεπτών ή της μιας ώρας για την καλύτερη εποπτεία του δικτύου και να αφορούν κάθε κυψέλη ξεχωριστά [42].

Σε κάθε περίπτωση το αποτέλεσμα των παραπάνω μεθόδων είναι η στατική εκχώρηση των πόρων, και η επιτυχία αυτών εξαρτάται από την εμπειρία του μηχανικού που ασχολείται με το συγκεκριμένο πρόβλημα [17]. Συνήθως, με βάση τις μετρηθείσες τιμές των δεδομένων του δικτύου κατασκευάζονται εναλλακτικά σενάρια πρόβλεψης της κίνησης δίδοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, ένα άνω και ένα κάτω όριο αναβάθμισης της χωρητικότητας. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η προβλεπόμενη χωρητικότητα του οπισθοζευκτικού δικτύου για ένα αισιόδοξο και ένα μετριοπαθές σενάριο μεταβολής της μέγιστης ζήτησης για τέσσερις Σταθμούς Βάσης του δικτύου ενός παρόχου κινητών επικοινωνιών που δραστηριοποιείται στην Ελλάδα.



Σχήμα 3.1: Πρόβλεψη χωρητικότητας οπισθοζευκτικού δικτύου για τέσσερις Σταθμούς Βάσης και δύο διαφορετικά είδη σεναρίων.

3.2 Δυναμική Διαχείριση Πόρων σε Συγκεκλιμένα Δίκτυα

Όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η είσοδος των νέων ρυθμοβόρων υπηρεσιών έχει οδηγήσει στην αύξηση της ζήτησης στο δίκτυο πρόσβασης. Αν και η ζήτηση αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί με τη χρήση των δικτύων 4G, υπάρχει ο κίνδυνος να δημιουργηθεί συμφόρηση στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, το οποίο εξ' αρχής δεν είχε σχεδιαστεί με σκοπό να ικανοποιήσει τους υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης που παρέχουν τα δίκτυα νέας γενιάς (4G). Η πιο ασφαλής προσέγγιση προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί η σύγκλιση του ασύρματου δικτύου πρόσβασης με ένα οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο, το οποίο δυνητικά μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των δικτύων LTE αλλά και των επερχόμενων δικτύων νέας γενιάς (LTE-Advanced).

Στη βάση του πλαισίου αναφοράς μιας συγκεκλιμένης οπτικής-ασύρματης υποδομής, οι στατικές μέθοδοι εκχώρησης που χρησιμοποιούνταν παραδοσιακά από έναν πάροχο κινητών επικοινωνιών δεν μπορούν πλέον να θεωρηθούν κατάλληλες για τα ασύρματα δίκτυα 4G. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενα, η κίνηση του δικτύου χαρακτηρίζεται από εκρηκτικότητα και μια στατική εκχώρηση του εύρους ζώνης που θα ικανοποιούσε ένα δυσμενές σενάριο (worst case scenario) ζήτησης θα οδηγούσε σε υπερδιαστασιολόγηση και μη αποδοτική χρήση του εύρους ζώνης. Το πρόβλημα αυτό οξύνεται περισσότερο στην περίπτωση που το οπτικό δίκτυο δεν ανήκει στον ασύρματο πάροχο, αλλά τα κυκλώματά του μισθώνονται από αυτόν. Γίνεται, λοιπόν, σαφές ότι μια στατική εκχώρηση του εύρους ζώνης θα ήταν ασύμφορη για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών και έρχεται σε αντίθεση με την οδηγία για οικονομικά αποδοτική παροχή υπηρεσιών που υπάρχει στο πρότυπο των δικτύων 4G.

Συνεπώς, η δυναμική διαχείριση του εύρους ζώνης του οπισθοζευκτικού δικτύου κρίνεται απαραίτητη για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας προς τους τελικούς χρήστες στα πλαίσια μιας συγκεκλιμένης οπτικής-ασύρματης αρχιτεκτονικής υποδομής. Συγκεκριμένα, ο πάροχος κινητών επικοινωνιών πρέπει να δύναται να διαχειρίζεται δυναμικά το εύρος ζώνης του οπισθοζευκτικού δικτύου δεσμεύοντας ή αποδεσμεύοντας τους αντίστοιχους πόρους, και εκμεταλλευόμενος κατάλληλα το μηχανισμό δυναμικής εκχώρησης του εύρους ζώνης, όπως αυτός υλοποιείται από το οπτικό δίκτυο.

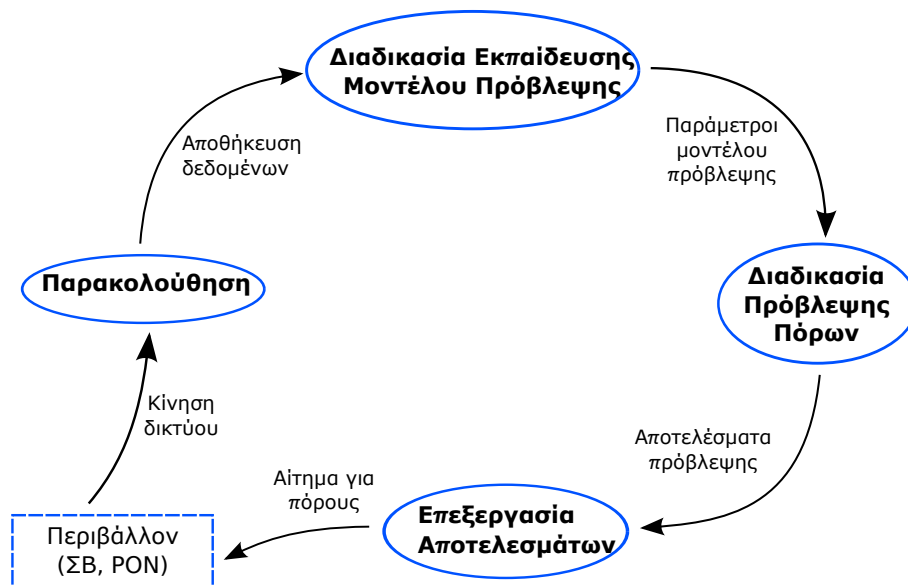
3.2.1 Σύστημα δυναμικής διαχείρισης πόρων

Η δυναμική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου απαιτεί την ύπαρξη ενός κατάλληλου συστήματος που θα είναι ικανό να συλλέγει τα δεδομένα της κίνησης του δικτύου, να τα αποθηκεύει και να τα επεξεργάζεται κατάλληλα. Σκοπός της επεξεργασίας αυτής είναι να καταστήσει το σύστημα ικανό να μάθει τα χαρακτηριστικά της αθροιστικής ζήτησης των χρηστών, με τη βοήθεια μεθόδων μηχανικής μάθησης, και να παρέχει εκτίμηση για την επερχόμενη ζήτηση στο Σταθμό βάσης. Μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική μηχανικής μάθησης θεωρείται η χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ένα σύνολο από απλά συστήματα επεξεργασίας που αποκαλούνται νευρώνες, πλήρως διασυνδεδεμένα μεταξύ τους, τα οποία λειτουργούν παράλληλα και έχουν την ικανότητα να μαθαίνουν με χρήση παραδειγμάτων.

Συγκεκριμένα, το σύστημα αυτό είναι ένας ευφυής πράκτορας¹ (intelligent agent),

¹Η ευφυΐα ορίζεται ως η ικανότητα ενός συστήματος να αντιλαμβάνεται και να κατανοεί γεγονότα. Ο όρος χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα σύστημα, το οποίο μπορεί να προσαρμόζει τις ενέργειές του με βάση συγκεκριμένα εξωτερικά γεγονότα. Ουσιαστικά πρόκειται για ένα προσαρμοστικό σύ-

ο οποίος συλλέγει τα δεδομένα ενός Σταθμού Βάσης σε διακριτές χρονικές περιόδους, τα αποθηκεύει και με βάση τα συλλεχθέντα δεδομένα προβλέπει την επερχόμενη ζήτηση χρησιμοποιώντας ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Επομένως, ο ευφυής πράκτορας μπορεί να αιτείται εκ των προτέρων την εκχώρηση των κατάλληλων πόρων από το οπτιζευκτικό οπτικό δίκτυο, παρέχοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, μια βελτιωμένη εμπειρία ποιότητας υπηρεσίας για τον τελικό χρήστη. Μια απλή σχηματική αναπαράσταση του προτεινόμενου μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2: Απλή σχηματική αναπαράσταση των λειτουργιών του ευφυούς πράκτορα

3.3 Φυσική Αρχιτεκτονική Συστήματος Διαχείρισης Πόρων

Η συλλογή και η επεξεργασία των δεδομένων από το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης πόρων μπορεί να γίνει με κεντρικοποιημένο ή με κατανεμημένο τρόπο. Συγκεκριμένα, διακρίνονται οι κάτωθι δυνατές περιπτώσεις υλοποίησης:

- Χρήση μιας κεντρικής οντότητας που συλλέγει παραμέτρους ποιότητας από το κεντρικό σύστημα διαχείρισης και συντήρησης του παρόχου του δικτύου.
- Χρήση μιας κεντρικής οντότητας που συλλέγει παραμέτρους ποιότητας από το κεντρικό σύστημα κοστολόγησης του παρόχου του δικτύου.
- Χρήση μιας κεντρικής οντότητας που συλλέγει παραμέτρους ποιότητας μέσω κατανεμημένων υπομονάδων που διαθέτουν αναλυτή πρωτοκόλλου για τη συλλογή δεδομένων και τοποθετούνται σε συγκεκριμένες δικτυακές επαφές.
- Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων στους Σταθμούς Βάσης, οι οποίοι επεξεργάζονται τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας ανά τεχνολογία και σε επίπεδο σημείου πρόσβασης από το κεντρικό σύστημα διαχείρισης και συντήρησης του παρόχου του δικτύου.

στημα που παρουσιάζεται ως ευφυές καθώς αλλάζει η συμπεριφορά του χωρίς κάποια παρέμβαση από το χρήστη [13].

- Χρήση πλήρους κατανεμημένων οντοτήτων που συλλέγουν στατιστικά και επεξεργάζονται παραμέτρους ποιότητας ανά τεχνολογία και σε επίπεδο σημείου πρόσβασης από το Σταθμό Βάσης του δικτύου.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι εναλλακτικοί τρόποι υλοποίησης, όπως περιγράφηκαν παραπάνω και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μιας αρχιτεκτονικής.

3.3.1 Κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική

3.3.1.1 Χαρακτηριστικά κεντριοποιημένης αρχιτεκτονικής

Στην κεντριοποιημένη αρχιτεκτονική, τα στατιστικά δεδομένα για τον υπολογισμό και την εξαγωγή των δεικτών ποιότητας συλλέγονται είτε από ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης και συντήρησης, είτε από ένα κεντρικό σύστημα κοστολόγησης που διαθέτει ο πάροχος.

Οι περισσότεροι κατασκευαστές προτείνουν λύσεις σύμφωνα με τις οποίες ένα κεντρικό σύστημα μπορεί να επιβλέπει πολλές τεχνολογίες πρόσβασης ταυτόχρονα, ακόμα και ετερογενείς, όπως τα σταθερά και τα κινητά δίκτυα. Αυτό αποτελεί ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αφού μια κεντρική οντότητα μπορεί να εξάγει τους δείκτες ποιότητας του δικτύου χωρίς να χρειάζεται να αναλύει επιμέρους εξειδικευμένα μηνύματα ανά τεχνολογία. Ωστόσο, χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός ότι ακόμα και σε υποδομές με κοινό κατασκευαστή, υπάρχουν επιμέρους συστήματα διαχείρισης και συντήρησης ανά τεχνολογία.

Όλα τα συστήματα διαχείρισης μπορούν να επικοινωνούν με την κεντρική οντότητα διαχείρισης των πόρων μέσω προτυποποιημένων 3GPP XML δομημένων αρχείων. Ειδικότερα, τέτοιου είδους μηνύματα μεταφέρονται για ήδη υπάρχοντες και προγραμματισμένους λειτουργικούς σκοπούς των συστημάτων διαχείρισης και συντήρησης.

Από την άλλη μεριά, ο κεντρικός μηχανισμός παρακολούθησης του συστήματος διαχείρισης συλλέγει πληροφορίες κίνησης χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SNMPv3 (Simple Network Management Protocol) προκειμένου να αντλήσει τα κατάλληλα μηνύματα από τις επιμέρους δικτυακές οντότητες ή σημεία πρόσβασης των χρηστών και να υπολογίσει τους δείκτες ποιότητας. Η εξαγωγή των δεικτών ποιότητας σε μορφή XML αρχείων δεν γίνεται σε πραγματικό χρόνο αλλά σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, όπως για παράδειγμα ανά 5 λεπτά. Επίσης, το είδος και το πλήθος των δεικτών ποιότητας περιορίζεται συνήθως σε συγκεκριμένο αριθμό προτυποποιημένων κατά 3GPP δεικτών και έτσι σε περιπτώσεις που απαιτείται ο υπολογισμός εξειδικευμένων δεικτών ποιότητας για νέες ή συνδυαστικές υπηρεσίες δεν είναι δυνατός ο απευθείας υπολογισμός τους, παρά μέσω έμμεσων υπολογισμών από ένα πλήθος άλλων μετρήσεων.

Η μέθοδος συλλογής των XML αρχείων μπορεί να γίνει είτε κατεβάζοντας με χρήση πρωτοκόλλου FTP τα ενημερωμένα XML αρχεία από το διαχειριστικό σύστημα, είτε επικοινωνώντας με JMS/XML πρωτόκολλο.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται επιγραμματικά τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κεντρικής αρχιτεκτονικής όπου η συλλογή των στατιστικών δεδομένων γίνεται με χρήση ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης και συντήρησης και ενός κεντρικού συστήματος κοστολόγησης.

3.3.1.2 Χαρακτηριστικά χρήσης κεντρικού συστήματος διαχείρισης και συντήρησης

Πλεονεκτήματα

- Λήψη απευθείας δεικτών επίδοσης χωρίς την ανάγκη ανάλυσης επιμέρους μηνυμάτων ανά τεχνολογία πρόσβασης.
- Χαμηλό κόστος, λόγω υλοποίησης διεπαφών σε επίπεδο λογισμικού ή ανάλυσης XML αρχείων.
- Δεν χρειάζεται η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού ή εξοπλισμού για τη διεπαφή με το σύστημα διαχείρισης και συντήρησης.
- Χρήση ενός μόνο πρωτοκόλλου για τη λήψη των δεικτών ποιότητας ανεξαρτήτως της τεχνολογίας.
- Συμβατότητα με όλους τους κατασκευαστές που τηρούν τη δομή 3GPP XML για την παροχή στατιστικών.

Μειονεκτήματα

- Περιορισμός στο είδος και στον αριθμό των παρεχόμενων δεικτών ποιότητας.
- Χρονικός περιορισμός ως προς την ανανέωση των στατιστικών και των δεικτών ποιότητας.

3.3.1.3 Χαρακτηριστικά χρήσης κεντρικού συστήματος κοστολόγησης

Πλεονεκτήματα

- Λειτουργικότητα και συμβατότητα ανεξαρτήτως κατασκευαστή.
- Ευελιξία στην επίβλεψη ετερογενών δικτύων που χρησιμοποιούν ίδιο τρόπο κοστολόγησης.
- Λήψη απευθείας δεικτών επίδοσης χωρίς την ανάγκη ανάλυσης επιμέρους μηνυμάτων ανά τεχνολογία πρόσβασης.
- Χρήση ενός μόνο πρωτοκόλλου για τη λήψη των δεικτών ποιότητας ανεξαρτήτως της τεχνολογίας.

Μειονεκτήματα

- Περιορισμός στο είδος και στον αριθμό των παρεχόμενων δεικτών ποιότητας.
- Χρονικός περιορισμός ως προς την ανανέωση των στατιστικών και των δεικτών ποιότητας, αφού οι αναφορές χρέωσης παράγονται στο τέλος χρήσης της υπηρεσίας.
- Δεν παρέχεται λεπτομερής και χαμηλού επιπέδου πληροφορία για βασικούς δείκτες σε υπηρεσίες δεδομένων IP.

3.3.2 Κατανεμημένη αρχιτεκτονική

3.3.2.1 Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων συλλογής στατιστικών

Η κατανεμημένη αρχιτεκτονική βασίζεται στην επικοινωνία μιας κεντρικής οντότητας με επιμέρους κατανεμημένες υπομονάδες, οι οποίες συνδέονται, σε φυσικό επίπεδο, στις διεπαφές διασύνδεσης των σημείων πρόσβασης (δηλαδή στους Σταθμούς Βάσης για τα ασύρματα δίκτυα). Κάθε υπομονάδα φέρει μια ενσωματωμένη υπολογιστική μονάδα που έχει τουλάχιστον δύο δικτυακές διεπαφές Ethernet σε λειτουργία γέφυρας (bridge mode) ώστε να μην επεμβαίνει στη δομή της δικτυακής πληροφορίας. Η υπολογιστική μονάδα φέρει σαν λογισμικό ειδικό αναλυτή δικτύου με υποστήριξη του εν λόγω προτυποποιημένου πρωτοκόλλου διασύνδεσης πάνω από Ethernet, προκειμένου, μέσα από την ανάλυση των μηνυμάτων, να εξαχθούν στοιχεία για την επίδοση του σημείου πρόσβασης. Μια τέτοια αρχιτεκτονική εκμεταλλεύεται πρακτικά τη πλειοψηφία των δικτυακών υποδομών κορμού που είναι βασισμένη σε Ethernet διεπαφές και σε χρήση IP δικτύωσης (LTE, WiMAX και WiFi) προσφέροντας μια σύγχρονη λύση με σχετικά χαμηλό κόστος. Οι διεπαφές πρέπει να είναι δυνατότητας τουλάχιστον 1Gbps και φυσικά ο επεξεργαστής θα μπορεί να αναλύει σε πραγματικό χρόνο και μέσω του αναλυτή πρωτοκόλλου, τα δεδομένα και να συλλέγει τα απαραίτητα στοιχεία μέσα από τα μηνύματα σε επίπεδο εφαρμογής. Η υλοποίηση του αναλυτή πρωτοκόλλου μπορεί να βασιστεί στη γνωστή βιβλιοθήκη TCPDUMP/LIBPCAP που χρησιμοποιείται από τους αναλυτές Wireshark, κλπ.

Πέραν όμως των επιμέρους κατανεμημένων υπομονάδων, υπάρχει και η κεντρική οντότητα που συλλέγει τα επιμέρους στατιστικά στοιχεία από τις διασκορπισμένες υπομονάδες. Για να μπορεί το παραπάνω σχήμα να είναι λειτουργικό πρέπει να υποστηρίζεται και στα δύο μέρη ένα πρωτόκολλο μεταφοράς στατιστικών στοιχείων και ένα πρωτόκολλο παραμετροποίησης των κατανεμημένων υπομονάδων. Δηλαδή, οι επιμέρους υπομονάδες πρέπει να παραμετροποιούνται αυτόματα. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση πρωτοκόλλων όπως το RT69. Έτσι κάθε υπομονάδα μπορεί να παραμετροποιείται αυτόματα με προδιαγεγραμμένα χαρακτηριστικά ανά τεχνολογία και σημείο πρόσβασης. Τέλος, πάνω από την ίδια υλοποίηση μπορούν να μεταφέρονται και στατιστικά στοιχεία κίνησης.

3.3.2.2 Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων επεξεργασίας δεδομένων

Μια εναλλακτική υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης των πόρων περιλαμβάνει την ενσωμάτωσή του στα υπάρχοντα δίκτυα μέσω κατάλληλων διεπαφών. Όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2, η απαιτούμενη χωρητικότητα που παρέχεται από το οπτικό δίκτυο μετάδοσης θα μεταβάλλεται ανάλογα με την προσφερόμενη κίνηση στο Σταθμό Βάσης. Συγκεκριμένα, ο Σταθμός Βάσης που βρίσκεται στο άκρο του οπτικού δικτύου μπορεί να εξυπηρετείται από μία ONU, ενώ η απαραίτητη λειτουργικότητα πρόβλεψης της κίνησης και διαπραγμάτευσης των πόρων ανά σημείο πρόσβασης, υλοποιείται με την ενσωμάτωση της προτεινόμενης οντότητας σε κάθε Σταθμό Βάσης. Στην περίπτωση αυτή, η συλλογή των στατιστικών της κίνησης που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη και την αναδιοργάνωση των πόρων του οπτικού δικτύου, προϋποθέτει την επικοινωνία με το κεντρικό σύστημα διαχείρισης του δικτύου.

3.3.2.3 Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων συλλογής στατιστικών και επεξεργασίας δεδομένων

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε η λύση της κατανεμημένης αρχιτεκτονικής με τη χρήση κατανεμημένων υπομονάδων συλλογής στατιστικών από το δίκτυο και μιας κεντρικής οντότητας για την επεξεργασία τους, και με τη χρήση κατανεμημένων οντοτήτων που επεξεργάζονται τα δεδομένα που συλλέγουν από το κεντρικό σύστημα διαχείρισης του δικτύου. Χαρακτηριστικό των δυο αυτών λύσεων είναι η απαίτηση για ένα κεντρικό σύστημα είτε για την επεξεργασία των δεδομένων, είτε για τη συλλογή των στατιστικών.

Αντίθετα, σε μια πλήρως κατανεμημένη αρχιτεκτονική, οι λειτουργίες αυτές πρέπει να εκτελούνται από τις επιμέρους κατανεμημένες υπομονάδες. Συνεπώς, ένα υβριδικό σχήμα των δύο παραπάνω λύσεων περιλαμβάνει τη χρήση κατανεμημένων οντοτήτων που είναι επιφορτισμένες με τις λειτουργίες συλλογής στατιστικών από το δίκτυο προκειμένου να μπορούν να εξαχθούν οι παράμετροι ποιότητας, καθώς και με λειτουργίες ευφυούς επεξεργασίας δεδομένων. Ουσιαστικά, στην περίπτωση αυτή, οι κατανεμημένες οντότητες είναι πλήρως αυτόνομες και η συλλογή και επεξεργασία των παραμέτρων ποιότητας γίνεται απ' ευθείας από το Σταθμό Βάσης μέσω των κατάλληλων διεπαφών εξόρυξης και αποθήκευσης δεδομένων.

3.3.2.4 Χαρακτηριστικά χρήσης κατανεμημένων οντοτήτων συλλογής στατιστικών

Πλεονεκτήματα

- Λειτουργικότητα και συμβατότητα ανεξαρτήτως κατασκευαστή.
- Εξαγωγή στατιστικών στοιχείων επίδοσης σε οποιοδήποτε επίπεδο.
- Ευελιξία στην επίβλεψη ετερογενών δικτύων.
- Χρήση κατανεμημένων οντοτήτων.
- Κατανομή των πόρων παρακολούθησης - ανατροφοδότησης - τοπικής πρόβλεψης.
- Δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων κίνησης σε πραγματικό χρόνο χωρίς χρονικούς περιορισμούς από το κεντρικό σύστημα διαχείρισης.

Μειονεκτήματα

- Κόστος υλοποίησης εκατοντάδων κατανεμημένων υπομονάδων σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα.
- Χρήση σχετικά ακριβών υπολογιστικών συστημάτων σε διεπαφές υψηλής χωρητικότητας (10 Gbps) και πιθανή αδυναμία εξαγωγής στοιχείων σε πραγματικό χρόνο.

Χαρακτηριστικά	Κεντροκοποιημένη Αρχιτεκτονική	Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό
Ύπαρξη κεντρικού συστήματος	Ναι	Μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις
Ύπαρξη κατανεμημένων μονάδων	Όχι	Ναι
Συμβατότητα ανεξαρτήτως κατασκευαστή	Ναι (με χρήση XML)	Ναι
Ευελιξία στην επίβλεψη ετερογενών δικτύων	Ναι (όταν χρησιμοποιούν τον ίδιο τρόπο κοστολόγησης)	Ναι
Ανάγκη εξειδικευμένου εξοπλισμού	Όχι	Ναι (ή τουλάχιστον υπάρχοντος εξοπλισμού με αναβαθμισμένο λογισμικό)
Περιορισμός στον αριθμό των εξαγόμενων δεικτών ποιότητας	Ναι	Όχι
Χρονικός περιορισμός ανανέωσης δεικτών ποιότητας	Ναι	Όχι
Εξαγωγή δεικτών ποιότητας	Απευθείας λήψη με χρήση ενός μόνο πρωτοκόλλου χωρίς την ανάγκη ανάλυσης επιμέρους μηνυμάτων ανά τεχνολογία πρόσβασης	Απευθείας υπολογισμός (με εξαγωγή στατιστικών στοιχείων επίδοσης σε οποιοδήποτε επίπεδο)

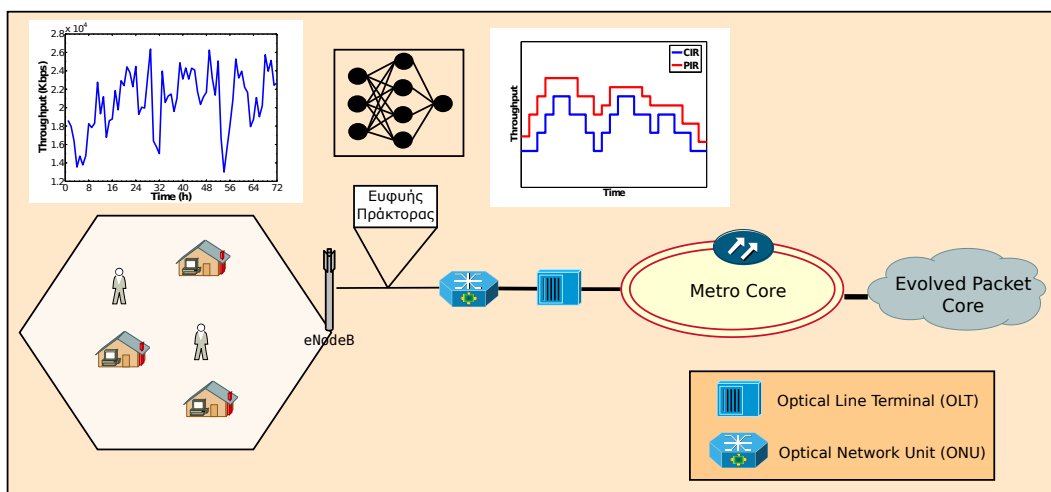
Πίνακας 3.1: Συνοπτικός πίνακας χαρακτηριστικών κεντροκοποιημένης και κατανεμημένης αρχιτεκτονικής.

3.4 Ευφυής Πράκτορας

Με βάση την παραπάνω ανάλυση και τα χαρακτηριστικά κάθε μιας αρχιτεκτονικής, κρίνεται απαραίτητη η χρήση των πλήρως κατανεμημένων οντοτήτων για την υλοποίηση του συστήματος δυναμικής διαχείρισης των πόρων. Οι κατανεμημένες αυτές οντότητες (ευφυείς πράκτορες) βρίσκονται στην πλευρά των Σταθμών Βάσης και είναι υπεύθυνες για την παρακολούθηση, την καταγραφή και την ευφυή επεξεργασία των δεδομένων. Σημειώνεται ότι η διαδικασία της ευφυούς επεξεργασίας των δεδομένων περιλαμβάνει την υλοποίηση κατάλληλων μηχανισμών πρόβλεψης με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, προκειμένου ο ευφυής πράκτορας να μπορεί να παρέχει μια ακριβή εκτίμηση για την επερχόμενη ζήτηση στο Σταθμό Βάσης.

Η επιλογή της πλήρους κατανεμημένης αρχιτεκτονικής συμμορφούται με την απαίτηση των δικτύων επόμενης γενιάς για αυτοοργάνωση. Τα αυτοοργανούμενα δίκτυα αποτελούνται από οντότητες που επιτρέπουν μια οργανωτική δομή η οποία δεν απαιτεί την ύπαρξη κάποιας κεντρικής διαχείρισης. Οι οντότητες του δικτύου πρέπει να έχουν την ικανότητα να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, να παρακολουθούν τις μεταβολές στο περιβάλλον τους και να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι η ευρωστία στις βλάβες του δικτύου και η κλιμακωσιμότητα [70].

Επομένως, γίνεται σαφές ότι οι Σταθμοί Βάσης ενός 4G δικτύου κινητών επικοινωνιών απαιτείται να έχουν τις κατάλληλες δυνατότητες επεξεργασίας προκειμένου να παρακολουθούν το περιβάλλον τους, να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και να προσαρμόζονται στις απαιτήσεις του δικτύου. Η υλοποίηση των λειτουργιών αυτών πρέπει να γίνεται με χρήση κατάλληλων οντοτήτων (ευφύων πρακτόρων) που είναι συνδεδεμένοι σε κάθε Σταθμό Βάσης, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση ευφυούς πράκτορα

Συγκεκριμένα, ένας τέτοιος ευφυής πράκτορας παρακολουθεί και καταγράφει συνεχώς την κίνηση του δικτύου που εξυπηρετείται από το Σταθμό Βάσης. Η διαδικασία της παρακολούθησης μπορεί να γίνει με χρήση του πρωτοκόλλου SNMPv3. Έπειτα από την αποθήκευση των δεδομένων της κίνησης, ο ευφυής πράκτορας εξάγει ένα κατάλληλο δείγμα ιστορικών δεδομένων \mathcal{W} από το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων προκειμένου να εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο. Η διαδικασία της εκπαίδευσης συντελείται περιοδικά με περίοδο T , χρησιμοποιώντας το σύνολο δεδομένων \mathcal{W} . Γίνεται προφανές ότι υπάρχει μια σχέση ανταλλαγής (tradeoff) μεταξύ της ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης και της υπολογιστικής επιβάρυνσης που προκαλεί. Ειδικότερα, η περίοδος T δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλη προκειμένου το μοντέλο να είναι ενημερωμένο, αλλά ούτε πολύ μικρή λόγω του υπολογιστικού φόρτου που συνεπάγεται η εκτέλεση της διαδικασίας της εκπαίδευσης. Στο τέλος της εκπαίδευσης, το νευρωνικό δίκτυο έχει αποκτήσει τις κατάλληλες παραμέτρους που το καθιστούν ικανό να προβλέψει τη ζήτηση για μια μελλοντική περίοδο αναφοράς.

Στη συνέχεια, το αποτέλεσμα της πρόβλεψης που δίνει το μοντέλο, υφίσταται επεξεργασία προκειμένου να υπολογιστούν οι κατάλληλοι πόροι, η εκχώρηση των οποίων αιτείται προς το οπισθοζευκτικό οπτικό δίκτυο. Σημειώνεται ότι οι πόροι αυτοί πρέπει να συμμορφούνται με τις υποδείξεις της NGMN Alliance [56], όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Επιπλέον, αν ο ευφυής πράκτορας εντοπίσει μια απότομη μεταβολή της κίνησης του δικτύου η οποία δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί με βάση τους πόρους που έχουν δεσμευτεί ή οδηγεί σε υπερχρησιμοποίησή τους, τότε υλοποιεί τη διαδικασία βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης προκειμένου να διαπιστώσει την ανάγκη εκχώρησης περισσότερων πόρων ή αποδέσμευσης αυτών. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα της πρόβλεψης υφίστανται επεξεργασία προκειμένου να ακολουθούν τις υποδείξεις της NGMN Alliance και αποστέλλονται προς τον πάροχο του PON².

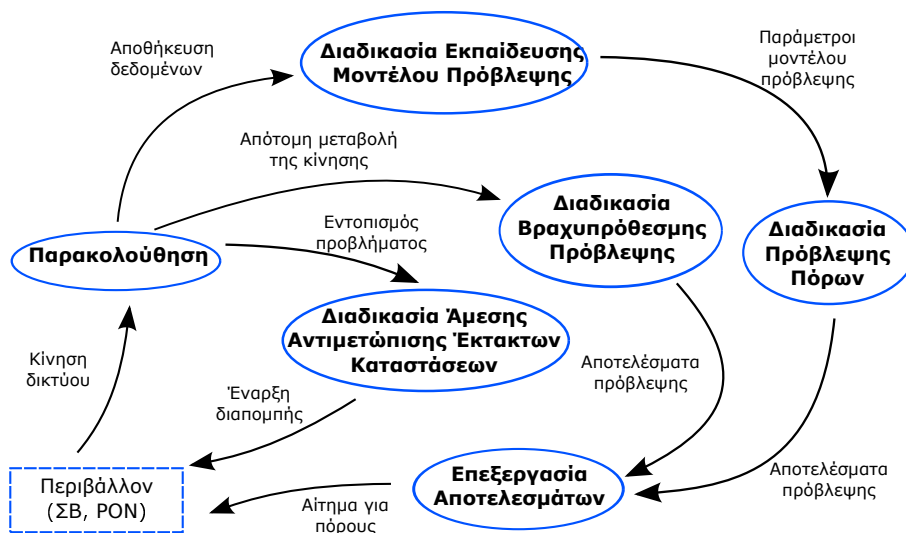
Τέλος, ο ευφυής πράκτορας πρέπει να υλοποιεί και κατάλληλους μηχανισμούς υπαναχώρησης, οι οποίοι του επιτρέπουν να διαχειρίζεται έκτακτες μη αναμενόμενες καταστάσεις. Ειδικότερα, αν εντοπιστεί πρόβλημα στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, το ο-

²Το οπτικό δίκτυο μπορεί να υλοποιεί έναν αντίστοιχο πράκτορα, ο οποίος είναι ικανός να παραμετροποιεί τις ουρές των ONU και να εξυπηρετεί τα αιτήματα του ευφυούς πράκτορα του Σταθμού Βάσης.

Κεφάλαιο 3. Δυναμική Διαχείριση των Πόρων

ποίο μπορεί να επιφέρει υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών του παρόχου κινητών επικοινωνιών πρέπει να γίνει διαπομπή του κατάλληλου όγκου χρηστών σε γειτονικούς Σταθμούς Βάσης. Όμοια, αν ένα αίτημα εκχώρησης πόρων δεν μπορεί μερικώς να ικανοποιηθεί, τότε οι ανάγκες των συνδρομητών πρέπει να εξυπηρετηθούν από τους γειτονικούς Σταθμούς Βάσης με χρήση κατάλληλων μηχανισμών που υλοποιούνται από τους ίδιους τους Σταθμούς Βάσης.

Οι βασικές λειτουργίες του ευφυούς πράκτορα που περιγράφονται παραπάνω, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Αναλυτική αναπαράσταση λειτουργιών ευφυούς πράκτορα.

Κεφάλαιο 4

Λειτουργία Πρόβλεψης Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου

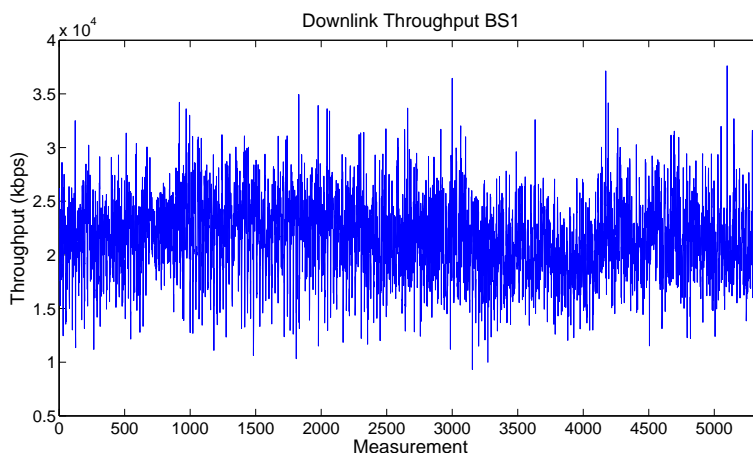
Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε ένα πλαίσιο εργασίας για τη δυναμική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Στη βάση του πλαισίου αυτού, το συγκεκριμένο κεφαλαίο εμβαθύνει στις λειτουργίες που υλοποιεί ο ευφυής πράκτορας και ειδικότερα στη λειτουργία της πρόβλεψης. Η πρόβλεψη των πόρων του Σταθμού Βάσης αποτελεί την κύρια λειτουργία του ευφυούς πράκτορα, καθώς επιτρέπει τη διαμόρφωση ενός δυναμικού συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου οπτικού δικτύου. Ειδικότερα, στο κεφάλαιο αυτό μελετώνται τα χαρακτηριστικά της κίνησης του δικτύου τα οποία παίζουν καθοριστικό ρόλο στην επίδοση του μοντέλου πρόβλεψης και παρουσιάζονται τρία διαφορετικά είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων που μπορούν να υποστηρίξουν τη διαδικασία αυτή. Τέλος, εξετάζονται τόσο σε πρακτική, όσο και σε θεωρητική βάση θέματα που άπτονται της επίδοσης του συστήματος διαχείρισης πόρων.

4.1 Χαρακτηριστικά της Κίνησης του Δικτύου

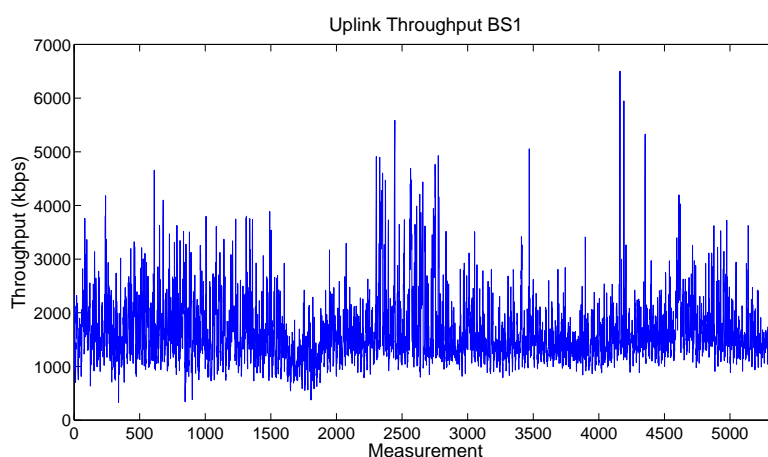
Τα κύρια χαρακτηριστικά των δικτύων νέας γενιάς είναι η εκρηκτική κίνηση και οι υψηλοί ρυθμοί δεδομένων των χρηστών. Αδιαμφισβήτητα, η κίνηση του δικτύου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτική λειτουργία του ευφυούς πράκτορα. Συγκεκριμένα, η αναγνώριση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της επιτρέπει την ακρίβεια της πρόβλεψης του απαιτούμενου εύρους ζώνης για το Σταθμό Βάσης. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1, η κίνηση του δικτύου χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητες γεγονός που δυσχεραίνει τη διαδικασία της ανάλυσης.

Προκειμένου να διερευνηθούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κίνησης που καλείται να εξυπηρετήσει το δίκτυο ενός παρόχου κινητών επικοινωνιών χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο Σταθμούς Βάσης στο κέντρο της Αθήνας. Οι συγκεκριμένοι Σταθμοί Βάσης υποστηρίζουν τεχνολογία HSPA+ και εξυπηρετούν μια περιοχή 9 τομέων προσφέροντας μέγιστο ρυθμό HSDPA 21.6 Mbps και HSUPA 5.8 Mbps ανά φέρον ανά τομέα. Ειδικότερα, στη ζεύξη καθόδου μπορούν να υποστηριχθούν 2 φέροντα, με αποτέλεσμα να δύναται να υποστηριχθεί ρυθμός HSDPA 42 Mbps ανά τομέα. Τα δεδομένα αφορούν μετρήσεις με χρονική διάρκεια μιας ώρας και εκφράζουν τις μέσες ωριαίες τιμές της αθροιστικής ζήτησης εύρους ζώνης των ζεύξεων ανόδου και καθόδου των Σταθμών Βάσης. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αφορούν περίοδο περίπου ενός έτους από το Φεβρουάριο του 2012 έως τον Απρίλιο του 2013 και αποτελούνται

από 5457 μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.1-4.4 για την περίπτωση των ζεύξεων ανόδου και καθόδου του πρώτου Σταθμού Βάσης (ΣΒ1) και του δεύτερου Σταθμού Βάσης (ΣΒ2), αντίστοιχα.



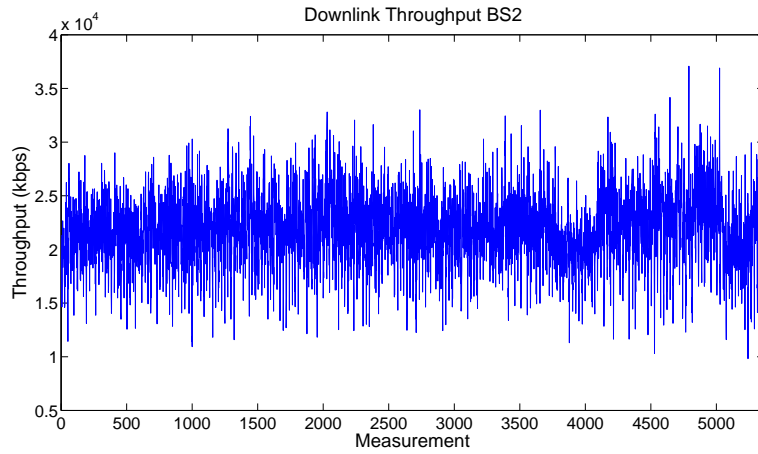
Σχήμα 4.1: Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης καθόδου για ΣΒ1.



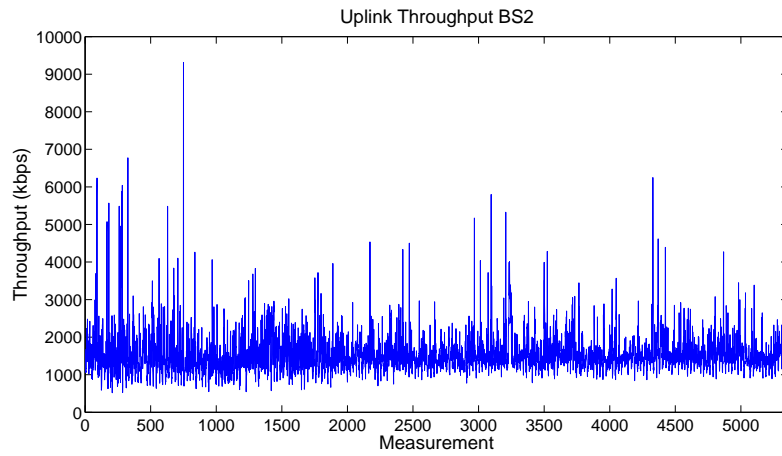
Σχήμα 4.2: Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης ανόδου για ΣΒ1.

Εμπειρικά, αναμένεται ότι η κίνηση θα εμφανίζει στοιχεία περιοδικότητας, με το συνολικό αιτούμενο εύρος ζώνης να αυξάνεται κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής τις πρωινές και τις απογευματινές ώρες, ενώ αντίστοιχα να υπάρχει μια σημαντική μείωση της ζήτησης κατά τη διάρκεια της νύχτας. Επίσης, αξιοσημείωτη διαφορά αναμένεται να υπάρχει στη ζήτηση της κίνησης τις εργάσιμες ημέρες σε σύγκριση με τα Σαββατοκύριακα ή άλλες ημέρες αργίας. Μια τυπική αναπαράσταση της αιθροιστικής κίνησης που καλείται να εξυπηρετήσει ένας Σταθμός Βάσης στη διάρκεια μιας εβδομάδας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5.

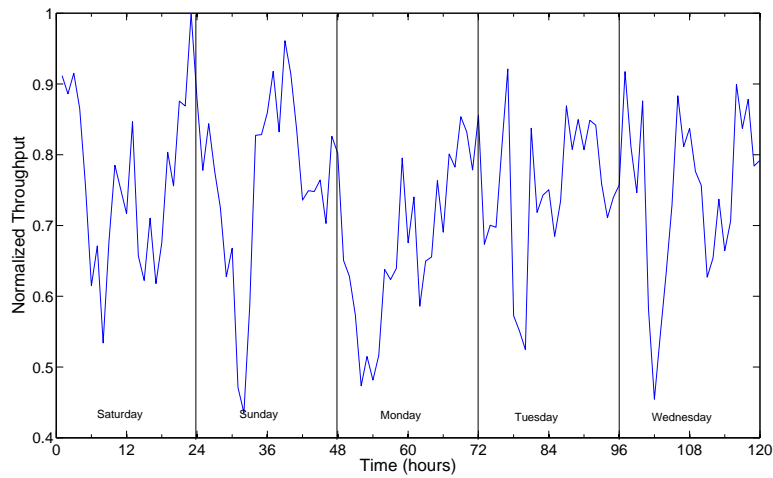
Παρατηρώντας το Σχήμα 4.5, γίνεται εμφανές ότι υπάρχει περιοδικότητα ως προς τη ζήτηση του εύρους ζώνης, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Προκειμένου να αναγνωριστούν οι περιοδικότητες αυτές, χρησιμοποιήθηκε ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (fast Fourier Transformation - FFT). Επειδή οι μετρήσεις αφορούν μη συνεχείς περιόδους, συνεχώς ληφθέντων δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα υποσύνολο αυτών για το μετασχηματισμό FFT. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε ένα συνεχές υποσύνολο των μετρήσεων, και οι τιμές που ήταν κενές αντικαταστάθηκαν από το μέσο όρο της



Σχήμα 4.3: Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης καθόδου για ΣΒ2.



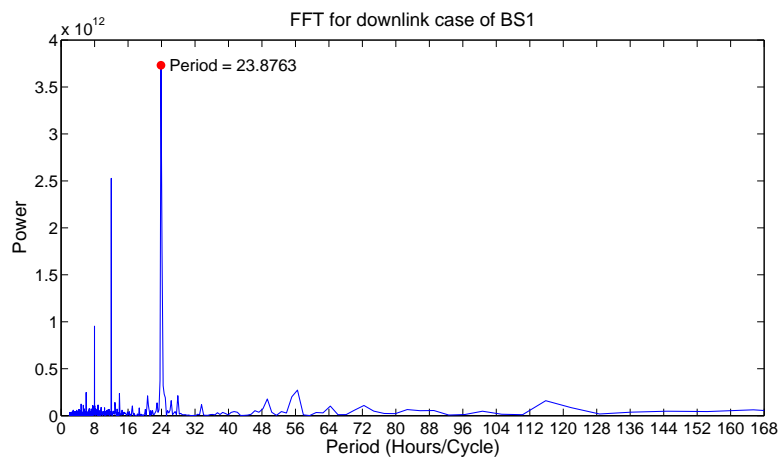
Σχήμα 4.4: Συλλεχθείσες μετρήσεις ζεύξης ανόδου για ΣΒ2.



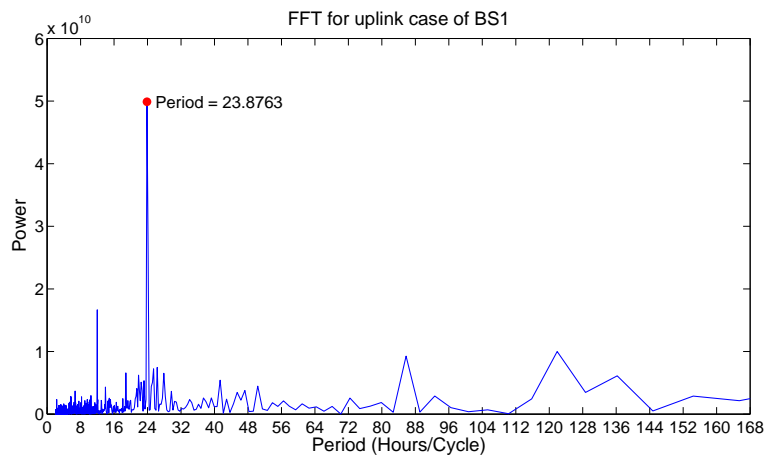
Σχήμα 4.5: Τυπική αναπαράσταση της αθροιστικής ζήτησης της κίνησης για διάρκεια πέντε ημερών.

προηγούμενης και της επόμενης ώρας στην περίπτωση μιας μόνο κενής τιμής, ενώ για την περίπτωση συνεχών κενών τιμών υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών μιας εβδομάδας πριν και μιας εβδομάδας μετά τη μέτρηση. Οι συγκεκριμένες τιμές χρησιμοποιήθηκαν μόνο για το μετασχηματισμό FFT και τον εντοπισμό των περιοδικοτήτων, ενώ στη συνέχεια παραλείπονται κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Παρόμοια μέθοδος για τον εντοπισμό της περιοδικότητας των συλλεχθέντων δεδομένων από το διαδίκτυο χρησιμοποιήθηκε στην εργασία [68].

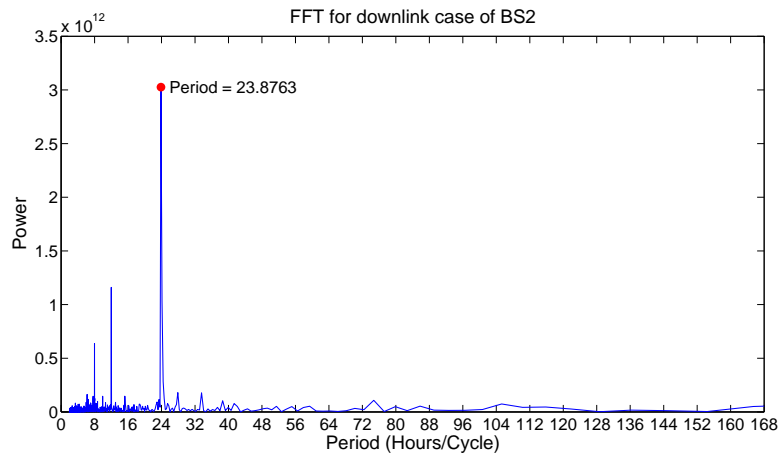
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν απεικονίζονται στα Σχήματα 4.6-4.9 για τους δύο Σταθμούς Βάσης. Από τα σχήματα αυτά, γίνεται εμφανές, ότι τα δεδομένα χαρακτηρίζονται από μια κυρίαρχη περίοδο 24 ωρών. Επομένως, η αθροιστική ζήτηση των πόρων παρουσιάζει μια ημερησία περιοδικότητα, επιτρέποντας την αποδοτική πρόβλεψή της. Τέλος, σημειώνεται ότι εκτός από την κυρίαρχη περίοδο των 24 ωρών, άλλες αξιοπρόσεκτες περίοδοι είναι αυτές των 12 ωρών, ενώ παρατηρείται και μια περίοδος 8 ωρών για την περίπτωση της κίνησης που αφορά τη ζεύξη καθόδου.



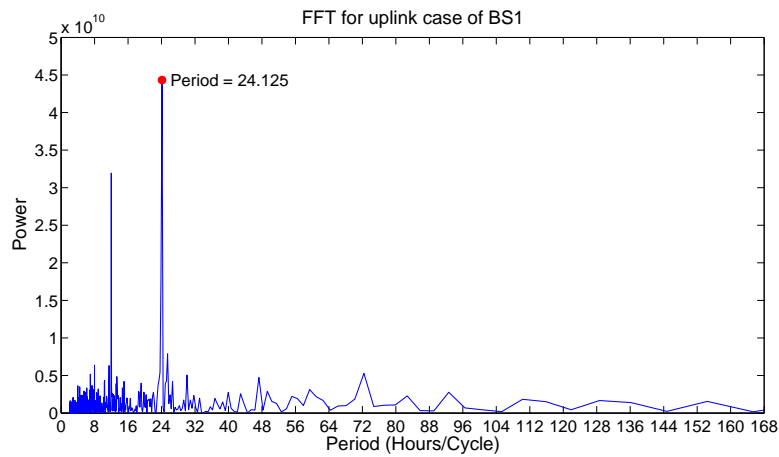
Σχήμα 4.6: Γρήγορος μετασχηματισμός *Fourier* για δεδομένα ζεύξης καθόδου ΣΒ1.



Σχήμα 4.7: Γρήγορος μετασχηματισμός *Fourier* για δεδομένα ζεύξης ανόδου ΣΒ1.



Σχήμα 4.8: Γρήγορος μετασχηματισμός *Fourier* για δεδομένα ζεύξης καθόδου ΣΒ2.



Σχήμα 4.9: Γρήγορος μετασχηματισμός *Fourier* για δεδομένα ζεύξης ανόδου ΣΒ2.

4.2 Υλοποίηση Διαδικασίας Πρόβλεψης

Η κίνηση του δικτύου του Σταθμού Βάσης χαρακτηρίζεται από μη γραμμικότητες, γεγονός που απαιτεί την επιλογή μιας μη γραμμικής μεθόδου πρόβλεψης. Προς αυτή την κατεύθυνση, θεωρείται κατάλληλη η επιλογή της χρήσης των νευρωνικών δικτύων για την υλοποίηση του συστήματος της πρόβλεψης. Τα νευρωνικά δίκτυα παρέχουν μια γενική, πρακτική μέθοδο εκμάθησης πραγματικών, διακριτών και διανυσματικών συναρτήσεων μέσα από παραδείγματα. Το γεγονός αυτό τα καθιστά ιδανική επιλογή για την υλοποίηση του συστήματος πρόβλεψης του ευφυούς πράκτορα. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρέχονται στο Παράρτημα Β'.

4.2.1 Είδη νευρωνικών δικτύων

Για την υλοποίηση της διαδικασίας της πρόβλεψης εξετάζονται τρία διαφορετικά είδη νευρωνικών δικτύων· τα είδη αυτά είναι:

- Ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο (Multilayer Perceptron - MLP).
- Ένα νευρωνικό δίκτυο γενικευμένης παλινδρόμησης (General Regression Neural Network - GRNN).
- Ένα πολυωνυμικό νευρωνικό δίκτυο (Polynomial Neural Network - PNN).

Ειδικότερα, ως πολυωνυμικό νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιείται ένα νευρωνικό δίκτυο ομαδικής μεθόδου διαχείρισης δεδομένων (Group Method for Data Handling - GMDH). Αναλυτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των παραπάνω νευρωνικών δικτύων παρατίθεται στο Παράρτημα Β'.

4.2.2 Δεδομένα εισόδου

Όπως αποδείχτηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η αθροιστική κίνηση του δικτύου ενός Σταθμού Βάσης εμφανίζει ημερήσια περιοδικότητα, γεγονός που σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά της κίνησης επαναλαμβάνονται με περίοδο 24 ωρών. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κίνηση μπορεί επαρκώς να προβλεφθεί με βάση δεδομένα που σχετίζονται με το χρόνο. Γίνεται, λοιπόν, εμφανές ότι πρέπει να επιλεγούν χρονικά δεδομένα εισόδου για τη διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Συνεπώς, το διάστημα εισόδου του νευρωνικού δικτύου είναι:

$$\mathbf{x} = (\text{Ημέρα}, \text{Μήνας}, \text{Ώρα}, \text{Ημερομηνία}, \text{Έτος}, \text{Ιδιαίτερο γεγονός})$$

όπου με *Ημέρα* συμβολίζεται η μέρα της εβδομάδας την οποία αφορά η καταγραφή της μέτρησης (πχ. Δευτέρα), με *Μήνας* ο μήνας του έτους, με *Ώρα* η ώρα που αφορά τη μέτρηση, με *Ημερομηνία* η ημερομηνία (πχ. 25), με *Έτος* το έτος και με *Ιδιαίτερο γεγονός* συμβολίζεται μια δυαδική μεταβλητή που υποδηλώνει κάποια ιδιαίτερη περίσταση ή αργία, η οποία μπορεί να επηρεάζει το αποτέλεσμα της πρόβλεψης.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της επίδοσης των νευρωνικών δικτύων αφορούν μόνο τη ζεύξη καθόδου ενός Σταθμού Βάσης και αποτελούνται από 1943 μετρήσεις που εκτείνονται σε μια περίοδο περίπου τεσσάρων μηνών.

4.2.3 Αποτελέσματα πρόβλεψης

Για τη μελέτη της επίδοσης του μοντέλου πρόβλεψης έγινε διαχωρισμός του συνόλου των μετρήσεων σε δεδομένα εκπαίδευσης και δεδομένα επικύρωσης. Ειδικότερα για τα δεδομένα εκπαίδευσης χρησιμοποιήθηκε το 85% του συνόλου των μετρήσεων, ενώ ένα τυχαίο 15% των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της επικύρωσης. Για τη σύγκριση της επίδοσης των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκε το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error - MAPE), το οποίο ορίζεται ως

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (4.1)$$

όπου n είναι το σύνολο των δεδομένων επικύρωσης, A_t η πραγματική τιμή που αναφέρεται στη μέτρηση t και F_t η τιμή της πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου. Το μέγεθος αυτό θεωρείται το πλέον κατάλληλο για την εποπτεία της επίδοσης ενός συστήματος πρόβλεψης, εφόσον είναι αδιάστατο και μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό χωρίς επιπρόσθετες λεπτομέρειες ως προς το είδος των δεδομένων.

Τα νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ένα δίκτυο GRNN με παράμετρο εξομάλυνσης $\sigma = 0.14$, ένα δίκτυο MLP τριών στρωμάτων (5-3-1) και ένα δίκτυο GMDH που παρήγαγε ένα πολυώνυμο 16ου βαθμού. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας επικύρωσης φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Νευρωνικό δίκτυο	MAPE
MLP	12.2777
GMDH	10.5629
GRNN	9.6573

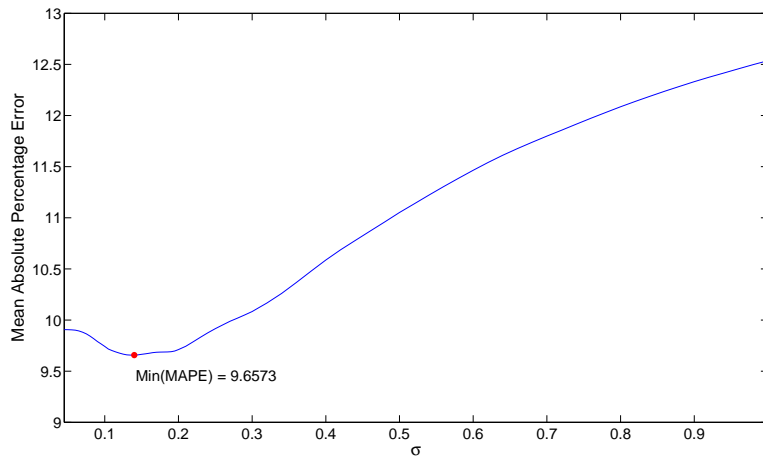
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα διαδικασίας επικύρωσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

Γίνεται εμφανές, ότι το δίκτυο GRNN παρουσιάζει την καλύτερη επίδοση σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη νευρωνικών δικτύων. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός αυτό, καθώς και το ότι προσφέρει γρήγορη εκμάθηση της επιφάνειας παλινδρόμησης, καθιστώντας το κατάλληλο για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου, προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα δίκτυα GRNN αποτελούν μια ιδανική επιλογή για την πρόβλεψη του φορτίου της κίνησης στο Σταθμό Βάσης.

Όπως αναφέρεται και στο Παράρτημα Β', ιδιαίτερη βαρύτητα στην επίδοση των δικτύων GRNN διαδραματίζει η κατάλληλη επιλογή της παραμέτρου εξομάλυνσης σ . Για το σκοπό αυτό, στο Σχήμα 4.10 παρουσιάζεται η επίδραση της παραμέτρου στην επίδοση του δικτύου GRNN. Συγκεκριμένα, γίνεται εμφανές ότι για τιμές της παραμέτρου εξομάλυνσης στο εύρος $0.05 < \sigma < 0.4$, το δίκτυο GRNN παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη νευρωνικών δικτύων. Σημειώνεται ότι το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς επιτρέπει την επιλογή της παραμέτρου εξομάλυνσης σε ένα σημαντικό εύρος τιμών χωρίς να υποβαθμίζεται η επίδοση του δικτύου GRNN.

4.3 Ανάλυση Ευαισθησίας Πρόβλεψης

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της πρόβλεψης των νευρωνικών δικτύων αποδεικνύοντας την υπεροχή του δικτύου GRNN και αναλύθηκε



Σχήμα 4.10: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα συναρτήσει του παράγοντα εξομάλυνσης σ για το δίκτυο GRNN.

η επίδραση της παραμέτρου εξομάλυνσης στην επίδοση της πρόβλεψης. Παρακάτω μελετώνται σε μεγαλύτερο βάθος τα θέματα που άπτονται της διαδικασίας της πρόβλεψης και γίνεται περαιτέρω επικύρωση των άνωθεν αποτελεσμάτων. Ειδικότερα, για κάθε ένα από τα παραπάνω νευρωνικά δίκτυα ερευνάται η επίδραση των χαρακτηριστικών τους παραμέτρων στην επίδοση των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης.

Για το σκοπό αυτό εξετάζεται η επίδοση της πρόβλεψης για τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου των δύο Σταθμών Βάσης ξεχωριστά. Ειδικότερα, για τη μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκαν 3866 δεδομένα εισόδου για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Επιπλέον, προκειμένου να ερευνηθεί η εξάρτηση του μεγέθους του συνόλου εκπαίδευσης στην επίδοση του συστήματος πρόβλεψης, μελετήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια. Στο πρώτο σενάριο, τα δεδομένα εισόδου αποτελούνται από 1288 ωριαίες μετρήσεις (Sample 1), στο δεύτερο σενάριο τα δεδομένα περιλαμβάνουν 2576 μετρήσεις (Sample 2), ενώ στο τρίτο σενάριο τα δεδομένα αποτελούνται από το σύνολο των 3866 μετρήσεων (Sample 3). Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση καθενός από τα παραπάνω δείγματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και στον Πίνακα 4.3 για τους ΣΒ1 και ΣΒ2, αντίστοιχα.

Για την επικύρωση του συστήματος πρόβλεψης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των 10 αναδιπλώσεων διασταυρωμένης επικύρωσης (10-fold cross validation) [50], ενώ για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα.

	Ζεύξη καθόδου		Ζεύξη ανόδου	
	Μέση τιμή (kbps)	Τυπική απόκλιση (kbps)	Μέση τιμή (kbps)	Τυπική απόκλιση (kbps)
Sample 1	22141.84	3450.69	1708.77	587.46
Sample 2	22342.79	3591.16	1621.69	622.67
Sample 3	22237.38	3608.63	1620.43	637.70

Πίνακας 4.2: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κίνησης για το ΣΒ1.

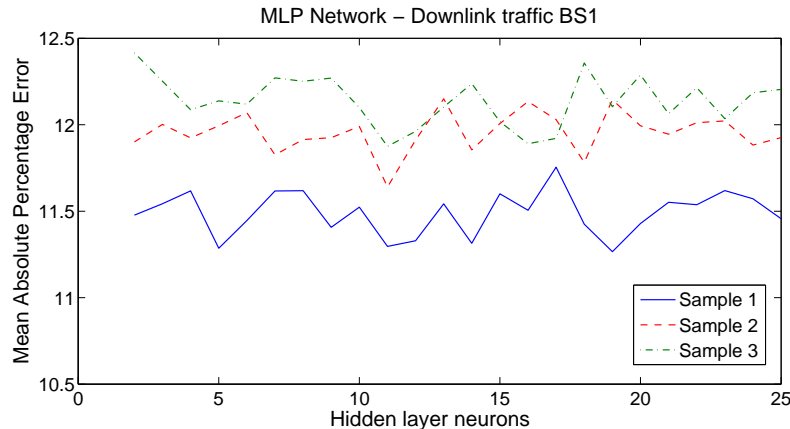
	Ζεύξη καθόδου		Ζεύξη ανόδου	
	Μέση τιμή (kbps)	Τυπική απόκλιση (kbps)	Μέση τιμή (kbps)	Τυπική απόκλιση (kbps)
Sample 1	21121.14	2982.32	1494.69	683.29
Sample 2	21634.93	3225.61	1520.46	594.14
Sample 3	21671.11	3139.16	1529.61	557.21

Πίνακας 4.3: Μέση τιμή και τυπική απόκλιση της κίνησης για το ΣΒ2.

4.3.1 Δίκτυο MLP

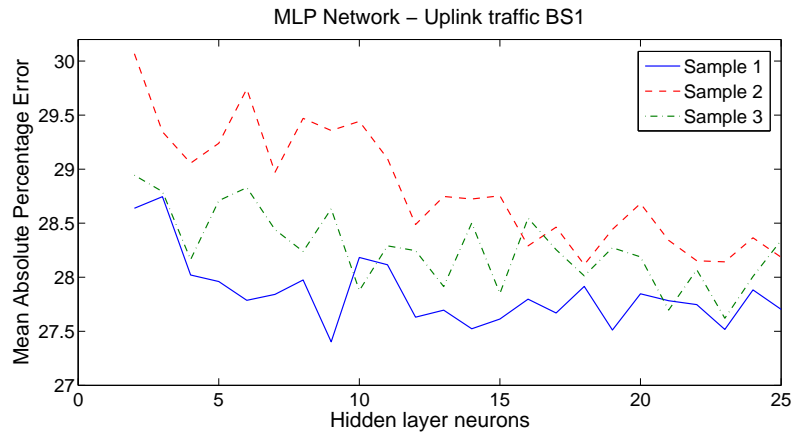
Όπως αναφέρεται στο Παράρτημα Β', ένα σημαντικό ζήτημα στην κατασκευή ενός δικτύου MLP είναι ο αριθμός των νευρώνων στο κρυμμένο στρώμα. Ένας μικρός αριθμός νευρώνων οδηγεί το σύστημα στην υποπροσαρμογή μη επιτρέποντας την εκμάθηση της συνάρτησης στόχου, ενώ αντίθετα ένας μεγάλος αριθμός νευρώνων στο κρυμμένο στρώμα οδηγεί στην υπερπροσαρμογή του δικτύου, με αποτέλεσμα τη χαμηλή επίδοση του συστήματος σε νέα δεδομένα. Γίνεται, λοιπόν, εμφανής η σημασία της σωστής επιλογής του αριθμού των νευρώνων του κρυμμένου στρώματος για τη βελτίωση της επίδοσης του δικτύου MLP.

Για το σκοπό αυτό, στα Σχήματα 4.11-4.14, απεικονίζεται το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της διαδικασίας επικύρωσης για τα δεδομένα των ζεύξεων καθόδου και ανόδου των δύο Σταθμών Βάσης συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων του κρυμμένου στρώματος.

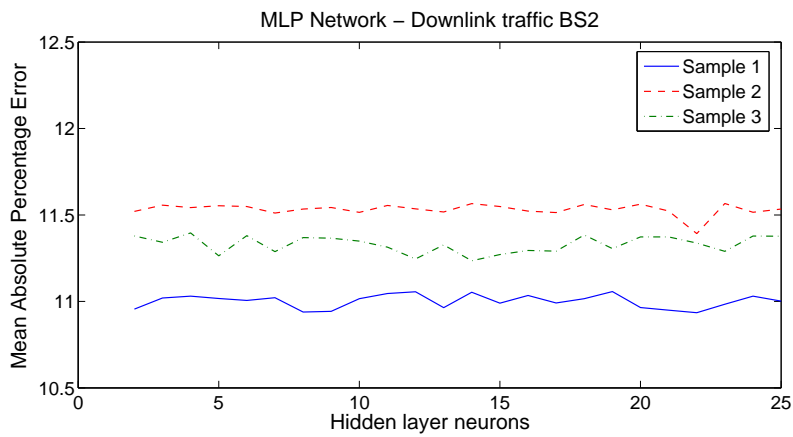


Σχήμα 4.11: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ1.

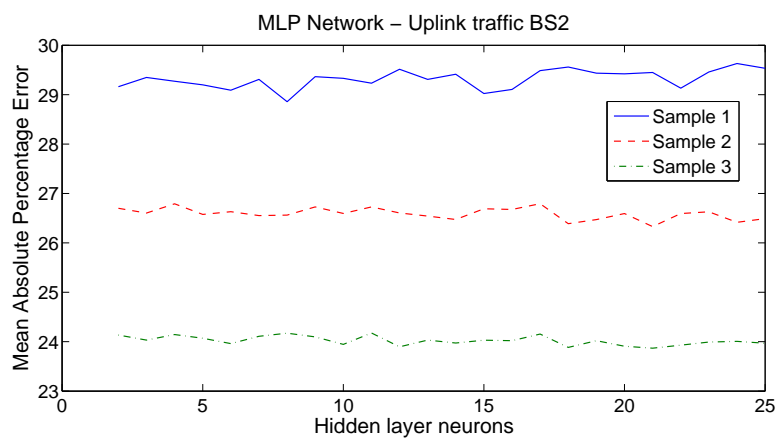
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης της κίνησης της ζεύξης καθόδου κυμαίνεται μεταξύ 11%-12%, ενώ για τη ζεύξη ανόδου είναι 24%-30%. Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα των δικτύων MLP για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη επίδραση του αριθμού των νευρώνων του κρυμμένου στρώματος στην επίδοση του δικτύου MLP. Επιπλέον, γίνεται εμφανές ότι η πρόβλεψη της κίνησης που μεταφέρεται στη ζεύξη καθόδου χαρακτηρίζεται από μικρότερο σφάλμα σε σύγκριση με αυτό της ζεύξης ανόδου. Αιτία του γεγονότος αυτού αποτελούν τα ιδιαίτερα χαρα-



Σχήμα 4.12: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ1.



Σχήμα 4.13: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ2.



Σχήμα 4.14: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσει του αριθμού των νευρώνων στο κρυφό στρώμα ενός δικτύου MLP για το ΣΒ2.

κτηριστικά της κίνησης στις ζεύξεις ανόδου και καθόδου, όπως περιγράφονται στους Πίνακες 4.2 και 4.3. Ειδικότερη μνεία περί αυτού παρατίθεται στη συνέχεια. Τέλος, με βάση το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, προκύπτει ότι υπάρχουν διαφορές μεταξύ των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν, γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με τα στατιστικά χαρακτηριστικά αυτών και το ρόλο τους στην επίδοση του συστήματος πρόβλεψης.

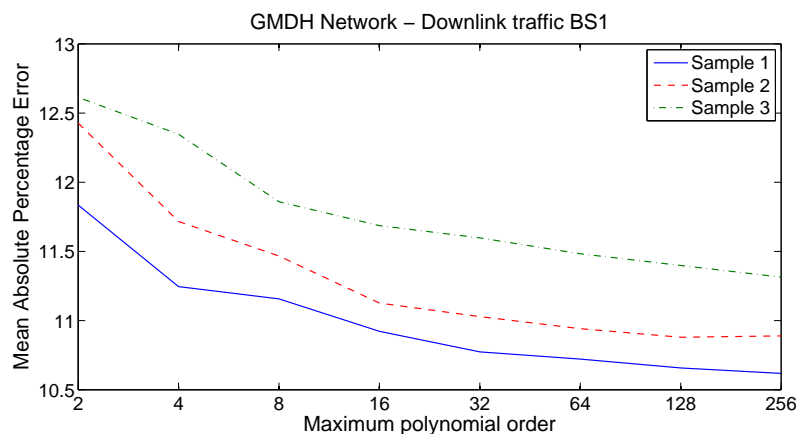
	MAPE Ζεύξης καθόδου		MAPE Ζεύξης ανόδου	
	ΣΒ1	ΣΒ2	ΣΒ1	ΣΒ2
Sample 1	11.266	10.935	27.403	28.858
Sample 2	11.640	11.392	28.117	26.329
Sample 3	11.875	11.235	27.620	23.868

Πίνακας 4.4: Βέλτιστο σφάλμα MAPE για την περίπτωση των δικτύων MLP.

4.3.2 Δίκτυο GMDH

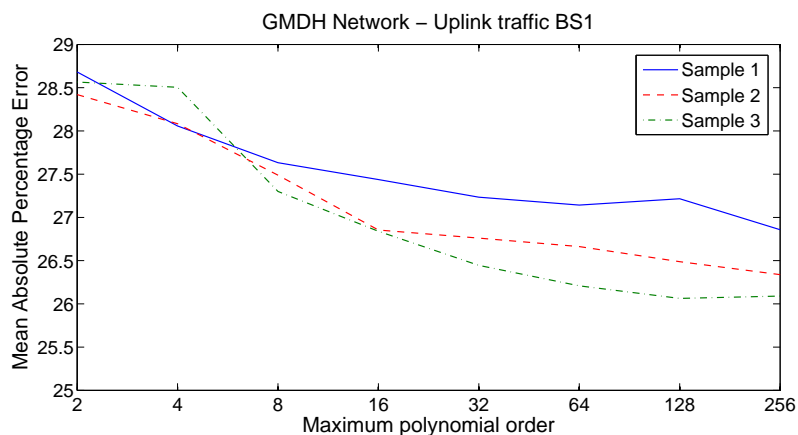
Τα δίκτυα GMDH χρησιμοποιούν ένα υψηλού βαθμού πολυώνυμο παλινδρόμησης προκειμένου να συσχετίσουν τα δεδομένα εισόδου με τα δεδομένα εξόδου, όπως αναφέρεται στο Παράρτημα Β'. Με βάση τη δομή τους, αναμένεται ότι σε κάθε επίπεδο του δικτύου, ο βαθμός του πολυωνύμου θα διπλασιάζεται.

Στα Σχήματα 4.15-4.18 παρουσιάζεται το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της διαδικασίας επικύρωσης ενός δικτύου GMDH για τα δεδομένα των ζεύξεων καθόδου και ανόδου των δύο Σταθμών Βάσης συναρτήσει του βαθμού του πολυωνύμου.

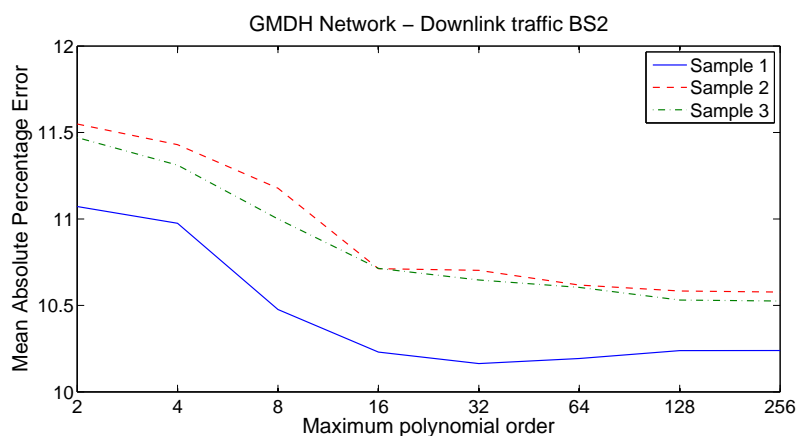


Σχήμα 4.15: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσει του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ1.

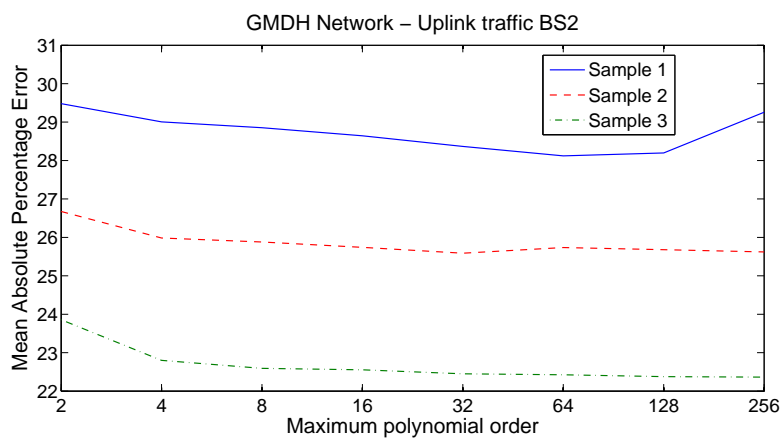
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, η πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου με χρήση ενός δικτύου GMDH χαρακτηρίζεται από ένα μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα μεταξύ 10.5%-12% για το ΣΒ1 και 10%-11% για το ΣΒ2. Αντίθετα, για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου, το σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 26%-28% για το ΣΒ1 και μεταξύ 22%-29% για το ΣΒ2. Γίνεται εμφανές ότι καθώς ο βαθμός



Σχήμα 4.16: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσει του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ1.



Σχήμα 4.17: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσει του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ2.



Σχήμα 4.18: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσει του βαθμού του πολυωνύμου ενός δικτύου GMDH για το ΣΒ2.

του πολωνύμου αυξάνεται, η ακρίβεια του δικτύου GMDH βελτιώνεται. Ωστόσο, υπάρχει ένας βέλτιστος βαθμός πολωνύμου, πέραν του οποίου το νευρωνικό δίκτυο εκφυλίζεται και η επίδοσή του μειώνεται, όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.17 και 4.18. Αντίστοιχα με την περίπτωση των δικτύων MLP, η πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης ανόδου παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία σε σύγκριση με την κίνηση της ζεύξης καθόδου. Επιπλέον διαφοροποίηση μεταξύ των αποτελεσμάτων παρατηρείται και για τα διαφορετικά δείγματα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν. Ειδικότερα, τα δεδομένα εκπαίδευσης με το μικρότερο μέγεθος έδωσαν πιο ακριβή αποτελέσματα για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου, ενώ για τη ζεύξη ανόδου το δείγμα που περιλαμβάνει το σύνολο των μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις.

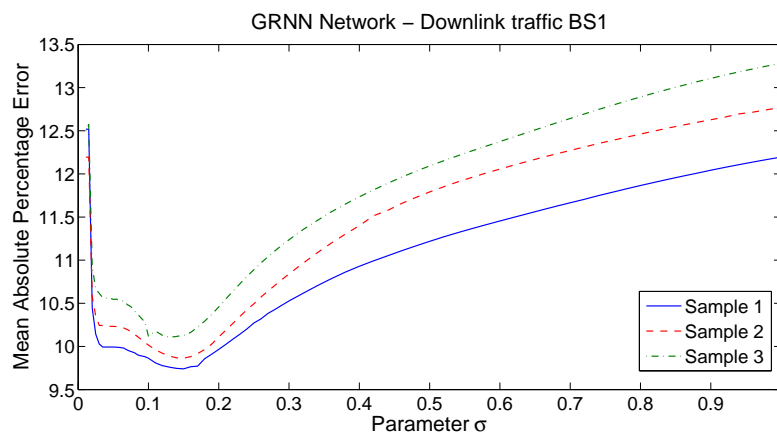
	MAPE Ζεύξης καθόδου		MAPE Ζεύξης ανόδου	
	ΣB1	ΣB2	ΣB1	ΣB2
Sample 1	10.618	10.164	26.858	28.122
Sample 2	10.879	10.577	26.339	25.588
Sample 3	11.314	10.526	26.063	22.364

Πίνακας 4.5: Βέλτιστο σφάλμα MAPE για την περίπτωση των δικτύων GMDH.

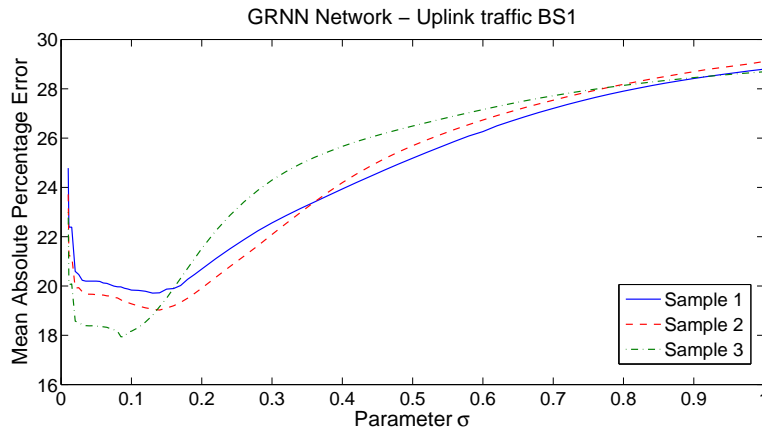
4.3.3 Δίκτυο GRNN

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, σημαντικό ζήτημα στην κατασκευή ενός δικτύου GRNN αποτελεί η επιλογή του παράγοντα εξομάλυνσης σ , ο οποίος προσδιορίζει πόσο αυστηρά το δίκτυο ταιριάζει το αποτέλεσμα της πρόβλεψης με τα δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης.

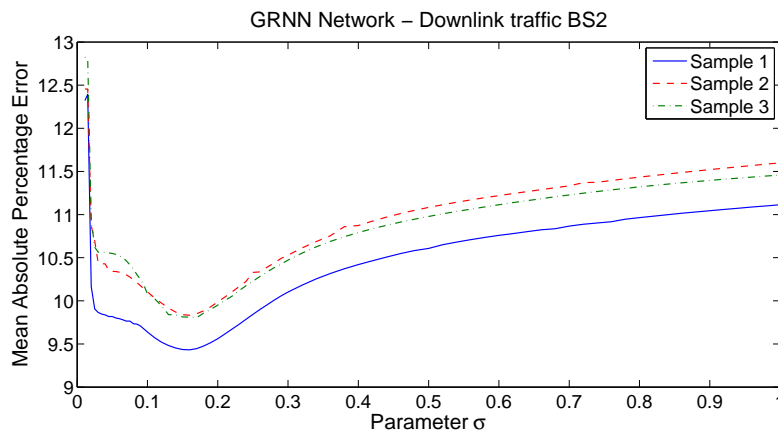
Στα Σχήματα 4.19-4.22, παρουσιάζεται το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της διαδικασίας επικύρωσης ενός δικτύου GRNN για τα δεδομένα των ζεύξεων καθόδου και ανόδου των δύο Σταθμών Βάσης συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ .



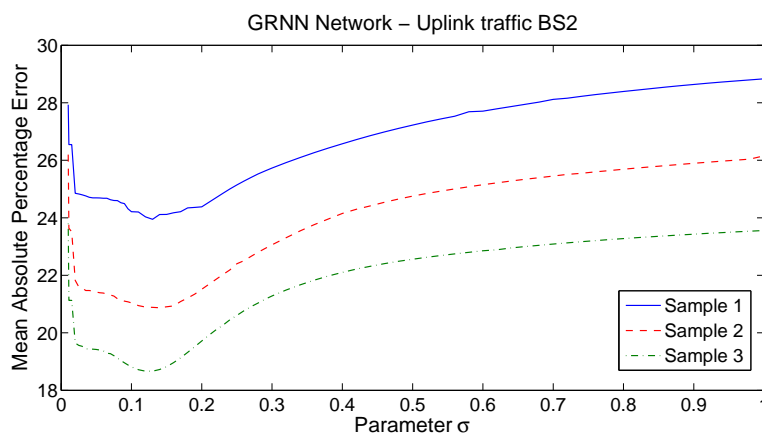
Σχήμα 4.19: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσεως του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣB1.



Σχήμα 4.20: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσει του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ1.



Σχήμα 4.21: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης καθόδου, συναρτήσει του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ2.



Σχήμα 4.22: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα ζεύξης ανόδου, συναρτήσει του παράγοντα εξομάλυνσης σ ενός δικτύου GRNN για το ΣΒ2.

Με βάση τα αποτελέσματα που φαίνονται στα παραπάνω σχήματα, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της πρόβλεψης της κίνησης της ζεύξης καθόδου κυμαίνεται μεταξύ 9.5%-11% για ένα εύρος τιμών της παραμέτρου εξομάλυνσης $0.05 < \sigma < 0.3$. Αντίθετα, για την περίπτωση της πρόβλεψης της κίνησης της ζεύξης ανόδου, το σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 18%-26% στο ίδιο εύρος τιμών της παραμέτρου εξομάλυνσης. Επίσης, αντίστοιχα με τα δύο άλλα είδη νευρωνικών δικτύων, ένα μικρότερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου, ενώ για την κίνηση της ζεύξης ανόδου ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης παρέχει καλύτερα αποτελέσματα. Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζεται το ελάχιστο μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις.

	MAPE Ζεύξης καθόδου		MAPE Ζεύξης ανόδου	
	ΣΒ1	ΣΒ2	ΣΒ1	ΣΒ2
Sample 1	9.740	9.432	19.710	23.946
Sample 2	9.864	9.833	19.024	20.871
Sample 3	10.106	9.804	17.937	18.667

Πίνακας 4.6: Βέλτιστο σφάλμα MAPE για την περίπτωση των δικτύων GRNN.

4.3.4 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 4.7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Γίνεται εμφανές ότι η κίνηση της ζεύξης καθόδου μπορεί να προβλεφθεί ικανοποιητικά δίδοντας ένα μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της τάξης του 10%-12% για τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων. Από την άλλη πλευρά, η πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης ανόδου χαρακτηρίζεται από ένα μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα της τάξης του 18%-29%, παρουσιάζοντας, έτσι, μεγαλύτερη δυσκολία στην ακριβή εκτίμησή της. Βασικός λόγος της συμπεριφοράς αυτής αποτελεί η μεταβλητότητα που εμφανίζει η κίνηση της ζεύξης ανόδου, όπως φαίνεται από τα στατιστικά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2 και στον Πίνακα 4.3. Συγκεκριμένα, η μικρή μέση τιμή και η μεγάλη τυπική απόκλιση της κίνησης της ζεύξης ανόδου καθιστούν δυσκολότερη την πρόβλεψή της σε σύγκριση με την κίνηση της ζεύξης καθόδου, η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη μέση τιμή και μικρή τυπική απόκλιση. Αυτή η σημαντική διαφορά στα χαρακτηριστικά της κίνησης οφείλεται στο γεγονός ότι το δίκτυο που μελετάται, χρησιμοποιείται κυρίως για τη λήψη δεδομένων (πχ. παρακολούθηση βίντεο ή αρχείων ήχου) και λιγότερο για την αποστολή μεγάλου όγκου αρχείων. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κίνηση της ζεύξης καθόδου να είναι η αθροιστική ζήτηση μεγάλου αριθμού χρηστών με υψηλές απαιτήσεις, παρουσιάζοντας έτσι πιο ομαλή συμπεριφορά. Αντίθετα, η μεταβλητότητα της κίνησης της ζεύξης ανόδου οφείλεται στη συμπεριφορά πολλών χρηστών με μικρές απαιτήσεις (μικρός μέσος όρος) που διαταράσσεται από ένα μικρό αριθμό χρηστών με μεγάλες απαιτήσεις, οι οποίοι εκμεταλλεύονται τους αδιάθετους πόρους, δημιουργώντας υψηλή ζήτηση για μικρές χρονικές περιόδους [57]. Γίνεται, επομένως, κατανοητό με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ότι στις περιπτώσεις υψηλής μεταβλητότητας στην κίνηση του δικτύου απαιτείται ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων για την αποτελεσματικότερη εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το υψηλό σφάλμα στην εκτίμηση της κίνησης της ζεύξης ανόδου, η εκχώρηση των ρυθμών μετάδοσης του οπισθοζευκτικού δικτύου σε διακριτά βήματα, σύμφωνα με τις υποδείξεις της NGMN Alliance καθιστά εφικτή την ορθή δέσμευση των κατάλληλων πόρων, ικανοποιώντας εν τέλει τις απαιτήσεις των συνδρομητών. Περισσότερες λεπτομέρειες περί αυτού παρατίθενται σε επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, ως προς την επίδοση του συστήματος, γίνεται εμφανές ότι τα δίκτυα GRNN παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη νευρωνικών δικτύων τόσο για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου, όσο και για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου. Ειδικότερα, η επιλογή του παράγοντα εξομάλυνσης σε ένα εύρος τιμών $0.05 < \sigma < 0.3$ εγγυάται την υψηλή επίδοση του συστήματος και είναι σύμφωνη με τα αποτελέσματα της παραγράφου 4.2 που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

	MAPE Ζεύξης καθόδου		MAPE Ζεύξης ανόδου	
	ΣΒ1	ΣΒ2	ΣΒ1	ΣΒ2
Sample 1				
MLP	11.266	10.935	27.403	28.858
GMDH	10.618	10.164	26.858	28.122
GRNN	9.740	9.432	19.710	23.946
Sample 2				
MLP	11.640	11.392	28.117	26.329
GMDH	10.879	10.577	26.339	25.588
GRNN	9.864	9.833	19.024	20.871
Sample 3				
MLP	11.875	11.235	27.620	23.868
GMDH	11.314	10.526	26.063	22.364
GRNN	10.106	9.804	17.937	18.667

Πίνακας 4.7: Βέλτιστες τιμές του μέσου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος για την πρόβλεψη της κίνησης των ζεύξεων ανόδου και καθόδου των δύο Σταθμών Βάσης.

4.4 Βελτίωση Επίδοσης Συστήματος Πρόβλεψης

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της διαδικασίας της πρόβλεψης της κίνησης του οπισθοζευκτικού δικτύου για δύο διαφορετικούς Σταθμούς Βάσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, έγινε εμφανής η δυσκολία της εκτίμησης της κίνησης της ζεύξης ανόδου, λόγω των ιδιαίτερων στατιστικών χαρακτηριστικών της, δηλαδή της χαμηλής μέσης τιμής και της μεγάλης τυπικής απόκλισης. Αυτή η μεταβλητότητα των δεδομένων της κίνησης της ζεύξης ανόδου που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα στη διαδικασία επικύρωσης του δικτύου.

4.4.1 Προεπεξεργασία Δεδομένων

Γίνεται, λοιπόν, εμφανής η ανάγκη επιλογής ενός κατάλληλου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης προκειμένου να μειωθεί το σφάλμα πρόβλεψης του νευρωνικού δικτύου και να βελτιωθεί η επίδοση του προτεινόμενου συστήματος. Για το σκοπό αυτό, κρίνεται απαραίτητη μια προπαρασκευαστική στατιστική επεξεργασία των δεδομένων εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, βάση της οποίας επιλέγεται το κατάλληλο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης που είναι ικανό να προβλέψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη ζήτηση των πόρων του Σταθμού Βάσης. Αυτή η στατιστική επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων επιτρέπει στον ευφυή πράκτορα να αναγνωρίσει τα βασικά χαρακτηριστικά της κίνησης του δικτύου και να επιλέξει δυναμικά το κατάλληλο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, το οποίο παρέχει ακριβέστερα αποτελέσματα ως προς την πρόβλεψη.

Για την επεξεργασία των δεδομένων και την επιλογή του κατάλληλου συνόλου εκπαίδευσης χρησιμοποιείται το μέγεθος της σχετικής τυπικής απόκλισης (relative standard deviation - RSD), προκειμένου να αναγνωριστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά της συλλεχθείσας κίνησης στο δίκτυο. Η σχετική τυπική απόκλιση RSD απεικονίζει τη μεταβλητότητα των δεδομένων και ορίζεται ως

$$RSD(\%) = \frac{\sigma}{\mu} \times 100 \quad (4.2)$$

όπου η μεταβλητή σ υποδηλώνει την τυπική απόκλιση και η μεταβλητή μ είναι η μέση τιμή του συνόλου των δεδομένων. Γίνεται, επομένως, αντιληπτό ότι αν η κίνηση στο οπισθοζευκτικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από μικρή σχετική τυπική απόκλιση, τότε παρουσιάζει μια συνεκτική γραφική απεικόνιση, η οποία οδηγεί σε καλύτερη πρόβλεψη της κίνησης σε σύγκριση με την περίπτωση όπου η σχετική τυπική απόκλιση είναι μεγάλη.

Με άλλα λόγια, μια μικρή τιμή της σχετικής τυπικής απόκλισης δηλώνει ότι οι συλλεχθείσες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στη μέση τιμή τους, ενώ μια μεγάλη τιμή της σχετικής τυπικής απόκλισης δηλώνει ότι οι μετρήσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή μεταβλητότητα γεγονός που δυσχεραίνει την ακριβή πρόβλεψη της κίνησης.

Υπενθυμίζεται ότι η υψηλή μεταβλητότητα της κίνησης του δικτύου οφείλεται στην υποχρησιμοποίηση του δικτύου, και παρατηρείται σε περιπτώσεις όπου η πλειοψηφία των συνδρομητών χρησιμοποιεί ένα μικρό ποσοστό των πόρων επιτρέποντας σε ορισμένους απαιτητικούς χρήστες να εκμεταλλευτούν μεγάλο μέρος των αδιάθετων πόρων για μικρή χρονική διάρκεια, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις τους και αυξάνοντας, έτσι, τη μεταβλητότητα της κίνησης [57].

Ουσιαστικά, σκοπός της προεπεξεργασίας των δεδομένων είναι η αναγνώριση των περιόδων υψηλής μεταβλητότητας που δεν θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για την κίνηση του οπισθοζευκτικού δικτύου και με βάση τα αποτελέσματα αυτά γίνεται η κατάλληλη επιλογή του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης προκειμένου να βελτιωθεί η επίδοση του συστήματος πρόβλεψης.

4.4.2 Μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν

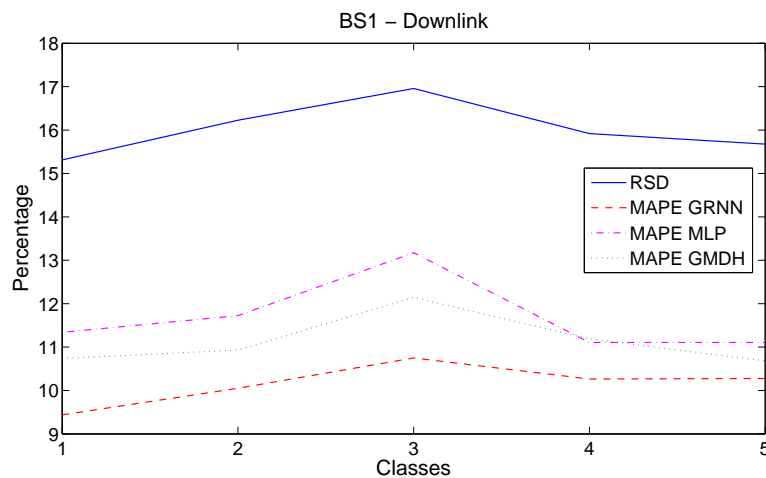
Για τη μελέτη της επίδρασης της μεταβλητότητας της κίνησης στην επίδοση του συστήματος πρόβλεψης χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων, ήτοι 5456 μέσες ωριαίες τιμές της αθροιστικής ζήτησης του εύρους ζώνης των ζεύξεων ανόδου και καθόδου των Σταθμών Βάσης. Τα νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν

- ένα πολυστρωματικό δίκτυο MLP, όπου η επιλογή του αριθμού των νευρώνων του κρυφού στρώματος έγινε με βάση τη δημιουργία πολλαπλών δικτύων και την αξιολόγηση τους χρησιμοποιώντας την τεχνική των 4 αναδιπλώσεων διασταυρωμένης επικύρωσης.
- ένα πολυωνυμικό δίκτυο GMDH, όπου το πολυώνυμο που χρησιμοποιήθηκε ήταν 64ου βαθμού.
- ένα δίκτυο GRNN, όπου η επιλογή του παράγοντα εξομάλυνσης έγινε με χρήση του αλγορίθμου συζευγμένης κλίσης (conjugate gradient) [5].

Τέλος, η αξιολόγηση της επίδοσης της πρόβλεψης των νευρωνικών δικτύων έγινε με βάση το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα και βασίστηκε στην τεχνική των 10 αναδιπλώσεων διασταυρωμένης επικύρωσης.

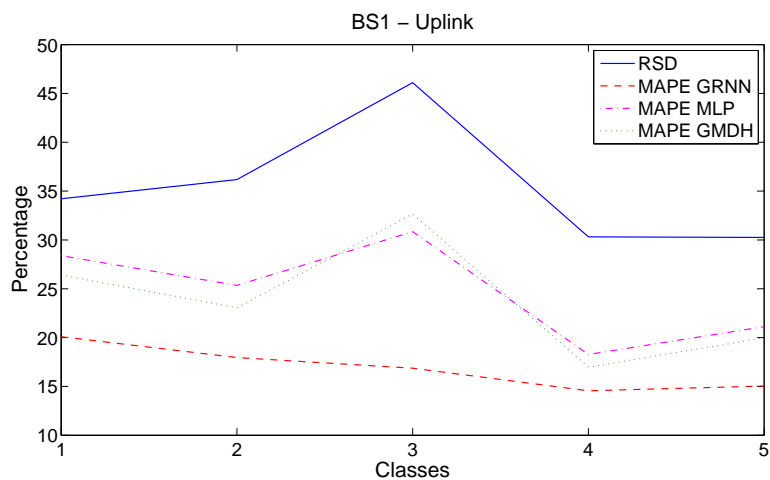
4.4.3 Στατιστική ανάλυση των δεδομένων εκπαίδευσης

Στην παράγραφο αυτή μελετάται αναλυτικότερα η επίδραση των στατιστικών χαρακτηριστικών της κίνησης στην επίδοση του μοντέλου πρόβλεψης. Για το σκοπό αυτό, το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων διαχωρίστηκε σε 5 ίσες, διαφορετικές μεταξύ τους κλάσεις, κάθε μια εκ των οποίων περιέχει 1091 δεδομένα. Για κάθε μια εκ των παραπάνω κλάσεων υπολογίστηκε η σχετική τυπική απόκλιση, και στη συνέχεια, τα δεδομένα κάθε κλάσης χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου πρόβλεψης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.23-4.26 για τις περιπτώσεις των ζεύξεων ανόδου και καθόδου των δύο Σταθμών Βάσης.

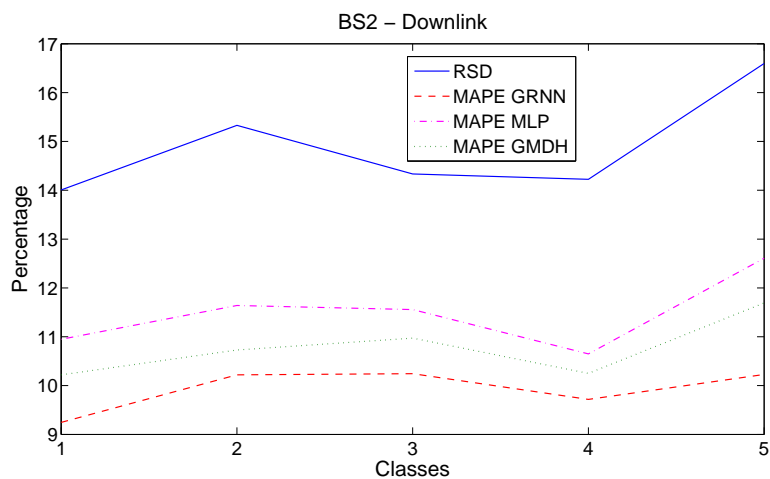


Σχήμα 4.23: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.

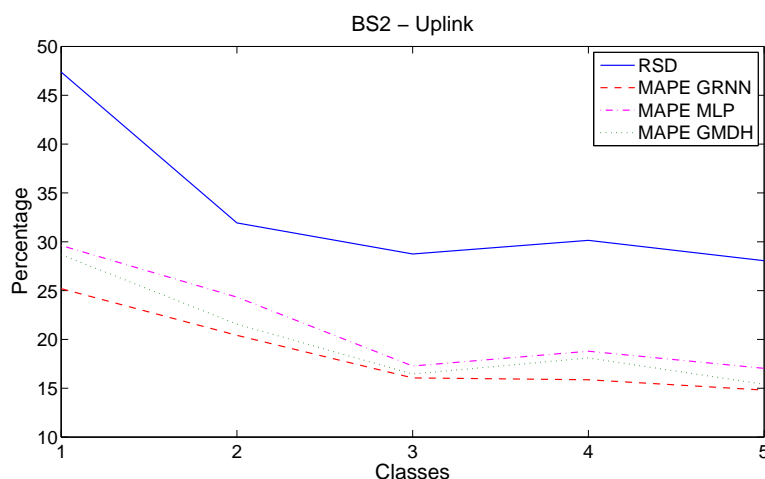
Όπως γίνεται εμφανές υπάρχει άμεση εξάρτηση της σχετικής τυπικής απόκλισης με την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης. Ειδικότερα, για τις κλάσεις που εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά και χαρακτηρίζονται από μεγάλη σχετική τυπική απόκλιση RSD, η επίδοση του συστήματος μειώνεται παρέχοντας ένα μεγαλύτερο σφάλμα. Επιπλέον, με βάση τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι και τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων ακολουθούν την τάση της σχετικής τυπικής απόκλισης. Ωστόσο, το δίκτυο GRNN παρουσιάζει τη μικρότερη εξάρτηση από τις στατιστικές ιδιότητες της κλάσης των



Σχήμα 4.24: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.25: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ2 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.26: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ2 για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης.

δεδομένων, ενώ παράλληλα παρέχει το μικρότερο μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη νευρωνικών δικτύων, γεγονός που διασφαλίζει την καταλληλότητά του για τη διαδικασία υλοποίησης του ευφυούς πράκτορα.

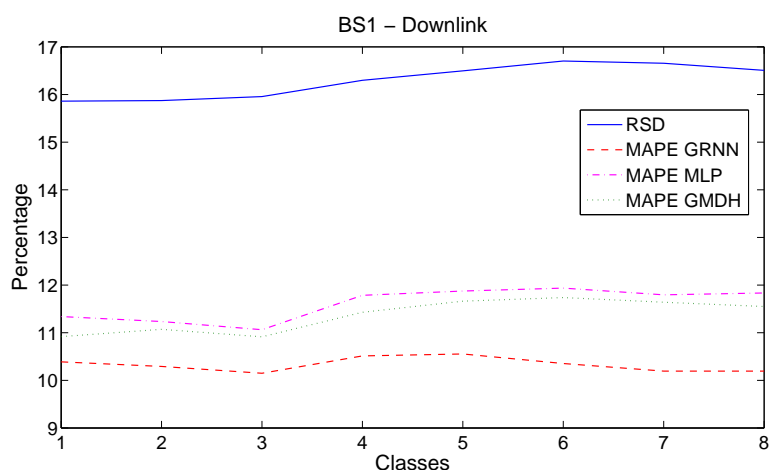
4.4.4 Δυναμική επιλογή του συνόλου εκπαίδευσης

Στην προηγούμενη παράγραφο μελετήθηκε η εξάρτηση της σχετικής τυπικής απόκλισης, ως μέτρου μεταβλητότητας της κίνησης του οπισθοζευκτικού δικτύου στην επίδοση του μοντέλου πρόβλεψης. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν γίνεται κατανοητή η ανάγκη προεπεξεργασίας των δεδομένων ώστε να εξαχθεί δυναμικά ένα κατάλληλο σύνολο εκπαίδευσης για το νευρωνικό δίκτυο. Προκειμένου να γίνει αυτό κατανοητό, το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων διαχωρίζεται σε 8 κλάσεις. Κάθε κλάση i περιλαμβάνει τα $682 \cdot i$ πιο πρόσφατα δεδομένα, έτσι ώστε η κλάση 1 χρησιμοποιεί 682 δεδομένα, ενώ η κλάση 8 χρησιμοποιεί το σύνολο των μετρήσεων, ήτοι 5456 δεδομένα.

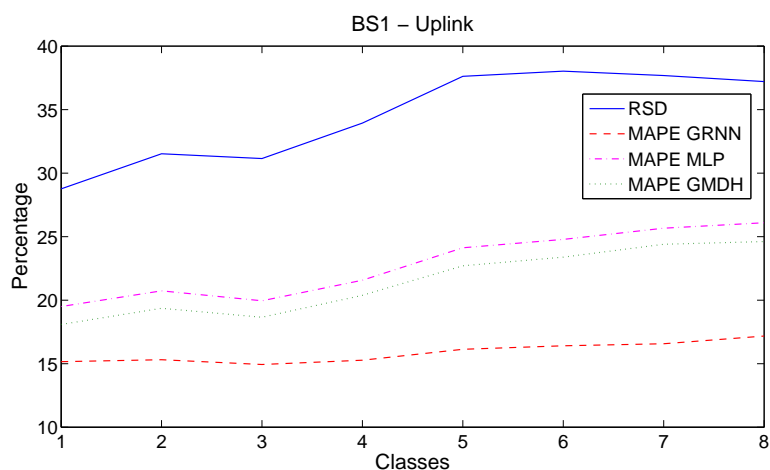
Η σχετική τυπική απόκλιση RSD και το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για κάθε κλάση παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.27-4.30 για τις περιπτώσεις των ζεύξεων ανόδου και καθόδου για τους δύο Σταθμούς Βάσης.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και με βάση τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν γίνεται εμφανές ότι ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης που χαρακτηρίζεται από μικρή σχετική τυπική απόκλιση, βελτιώνει την επίδοση του ευφυούς πράκτορα. Επομένως, ένα μικρότερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης είναι προτιμητέο για το ΣΒ1 και για τη ζεύξη ανόδου του ΣΒ2. Αντίθετα, στην περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ2, όπως παρουσιάζεται στα αποτελέσματα, η κλάση 8 έχει μικρότερη σχετική τυπική απόκλιση και μικρότερο σφάλμα, καθιστώντας ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης πιο κατάλληλο για την περίπτωση αυτή.

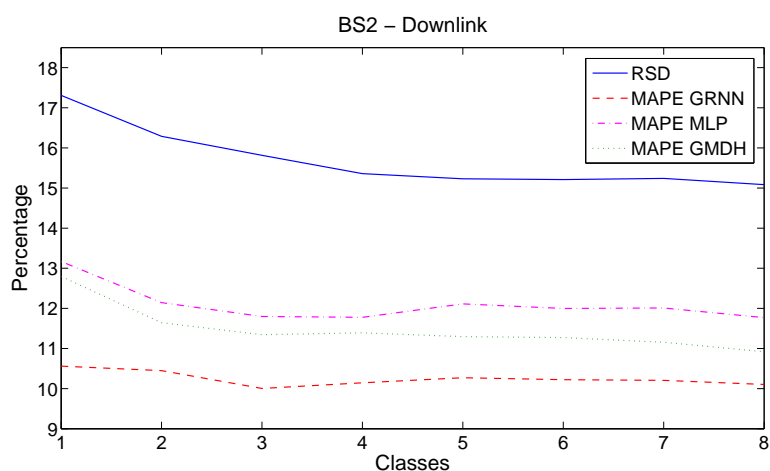
Συμπερασματικά, καθοριστικό ρόλο για την επιλογή του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης δεν διαδραματίζει το μέγεθός του, αλλά η σχετική τυπική απόκλιση, καθώς παρέχει μια καλή προσέγγιση για την αναμενόμενη επίδοση του μοντέλου πρόβλεψης, και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δυναμική επιλογή αυτού.



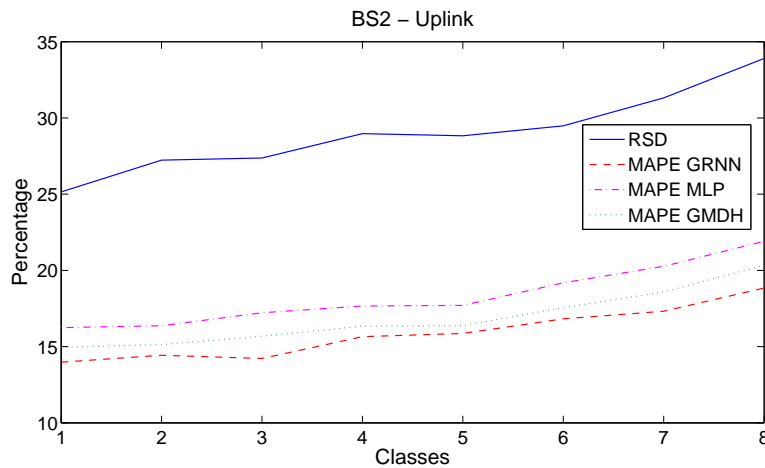
Σχήμα 4.27: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 συναρτήσει του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.28: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 συναρτήσει του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.29: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου του ΣΒ2 συναρτήσει του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.



Σχήμα 4.30: Σχετική τυπική απόκλιση και μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου του ΣΒ2 συναρτήσει του μεγέθους του συνόλου των δεδομένων εκπαίδευσης.

4.5 Επιλογή Συχνότητας Εκπαίδευσης

Μέχρι τώρα μελετήθηκε η επίδοση διαφορετικών ειδών νευρωνικών δικτύων στην πρόβλεψη της κίνησης του οπισθοζευκτικού δικτύου και αναλύθηκαν θέματα σχετικά με τη βελτιστοποίηση της. Σημαντικό κομμάτι στην επίδοση της πρόβλεψης διαδραματίζει η διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Διαισθητικά, ένα ενημερωμένο σύστημα πρόβλεψης μπορεί να προσφέρει ακριβέστερα αποτελέσματα. Ωστόσο, μια τέτοια διαδικασία απαιτεί τη συχνή εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, η οποία επιφέρει μια αντίστοιχη υπολογιστική επιβάρυνση για τον ευφυή πράκτορα. Επομένως, υπάρχει μια σχέση ανταλλαγής (tradeoff) μεταξύ της συχνότητας σύμφωνα με την οποία συντελείται η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και δημιουργείται ένα ενημερωμένο μοντέλο πρόβλεψης και της υπολογιστικής επιβάρυνσης που χαρακτηρίζει τη διαδικασία αυτή. Για το σκοπό αυτό, στη συγκεκριμένη παράγραφο μελετάται η παραπάνω σχέση ανταλλαγής με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων, ενώ εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που οδηγούν στην επιλογή της κατάλληλης συχνότητας εκπαίδευσης.

4.5.1 Διατύπωση του προβλήματος

Σύμφωνα με τις λειτουργίες του συστήματος διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου που περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, ο ευφυής πράκτορας συλλέγει τα απαραίτητα ιστορικά δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιεί για την πρόβλεψη της επερχόμενης ζήτησης του Σταθμού Βάσης. Για την ανάλυση της σχέσης ανταλλαγής μεταξύ της ακρίβειας της πρόβλεψης λόγω ενός συνεχώς ενημερωμένου μοντέλου και του υπολογιστικού κόστους που επιφέρει η διαδικασία αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι ο ευφυής πράκτορας εξάγει ένα σύνολο δεδομένων μεγέθους W από τα ιστορικά δεδομένα που έχει καταγράψει, το οποίο χρησιμοποιεί για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου που συντελείται με καθορισμένη περίοδο. Ειδικότερα, ο ευφυής πράκτορας προκειμένου να εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο, επιλέγει τα W πιο πρόσφατα δεδομένα ώστε να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία αυτή. Για τη διαδικασία της εκπαίδευσης γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν N χρονικές μονάδες κατά τη διάρκεια των οποίων η εκπαίδευση συντελείται $i \leq N$ φορές. Επομένως, η περίοδος της διαδικασίας εκπαίδευσης είναι $T = N/i$, $i \in [1, \dots, N]$. Για ευκολία στην ανάλυση χρησιμοποιείται

το πεδίο της συχνότητας. Έστω το σύνολο συχνοτήτων $\mathbf{F} = [1/N, 2/N, \dots, 1]$ το οποίο περιλαμβάνει τις δυνατές συχνότητες με τις οποίες συντελείται η διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου. Συνεπώς, σκοπός του ευφυούς πράκτορα είναι να επιλέξει μια συχνότητα $f \in \mathbf{F}$ προκειμένου να εκτελεί τη διαδικασία της εκπαίδευσης με τρόπο υπολογιστικά αποδοτικό που να προσφέρει, παράλληλα, ακριβή αποτελέσματα ως προς την εκτίμηση της επερχόμενης ζήτησης.

Έστω ότι με S_f συμβολίζεται το όφελος του συστήματος ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του μοντέλου πρόβλεψης όταν εκτελείται η διαδικασία της εκπαίδευσης με συχνότητα $f \in \mathbf{F}$. Το όφελος αυτό θεωρείται ως μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας, έτσι ώστε ένα πιο ενημερωμένο μοντέλο πρόβλεψης να αποδίδει ακριβέστερα αποτελέσματα. Ωστόσο, η διαδικασία της εκπαίδευσης συνεπάγεται και ένα αντίστοιχο υπολογιστικό κόστος C_f , που θεωρείται, επίσης, ως μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας f . Αναμένεται ότι καθώς η συχνότητα με την οποία εκτελείται η διαδικασία της εκπαίδευσης αυξάνεται, το σύστημα όντας συνεχώς ενημερωμένο αποδίδει ακριβέστερα αποτελέσματα ως προς την εκτίμηση της κίνησης, επιφέροντας ταυτόχρονα ένα υψηλό υπολογιστικό κόστος.

Δεδομένου του οφέλους S_f που σχετίζεται με την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης και του υπολογιστικού κόστους C_f , το καθαρό όφελος του συστήματος ορίζεται ως

$$U_f = \frac{S_f^\beta}{C_f^{1-\beta}} \quad (4.3)$$

όπου η μεταβλητή $\beta \in [0, 1]$ αναπαριστά το συντελεστή της σχέσης ανταλλαγής. Για μια επιλογή του συντελεστή $\beta = 0$, ο ευφυής πράκτορας δίδει βαρύτητα μόνο στο υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας, ενώ για επιλογή $\beta = 1$, ο ευφυής πράκτορας δίδει βάρος μόνο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης.

Συνεπώς, σκοπός του ευφυούς πράκτορα είναι η επιλογή της βέλτιστης συχνότητας f^* για τη διαδικασία της πρόβλεψης η οποία αποδίδει ακριβή και υπολογιστικά αποδοτικά αποτελέσματα.

4.5.2 Παιγνιοθεωρητική προσέγγιση σχέσης ανταλλαγής

Στην παράγραφο αυτή εφαρμόζεται η εξελικτική θεωρία παιγνίων προκειμένου να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα που διατυπώθηκε παραπάνω. Για το σκοπό αυτό γίνεται η υπόθεση ότι το σύστημα πρόβλεψης απαρτίζεται από ένα πληθυσμό πρακτόρων¹ καθένας εκ των οποίων χρησιμοποιεί μια συχνότητα $f \in \mathbf{F}$ για τη διαδικασία της εκπαίδευσης του μοντέλου με αντίστοιχο όφελος U_f . Αν με x_f συμβολίζεται το ποσοστό του πληθυσμού των πρακτόρων που χρησιμοποιούν τη στρατηγική f , τότε ισχύει $\sum_{f \in \mathbf{F}} x_f = 1$. Σημειώνεται ότι το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί στην πιθανότητα το σύστημα πρόβλεψης να χρησιμοποιεί τη συχνότητα f για την υλοποίηση της διαδικασίας της εκπαίδευσης.

Στο παίγνιο το οποίο μελετάται, γίνεται η υπόθεση ότι σε καθορισμένες περιόδους (γενεές) το σύστημα πρόβλεψης αναθεωρεί τις στρατηγικές του (δηλαδή την επιλογή της κατάλληλης συχνότητας εκπαίδευσης), και μόνο οι στρατηγικές που επιφέρουν όφελος μεγαλύτερο από το μέσο όφελος ευνοούνται. Για μικρή περίοδο του χρόνου

¹Εδώ ο όρος του πράκτορα σχετίζεται με την έννοια που του αποδίδεται από την εξελικτική θεωρία παιγνίων και δεν πρέπει να συγχέεται με την έννοια του ευφυούς πράκτορα που μελετήθηκε παραπάνω. Μια συνοπτική περιγραφή της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων παρατίθεται στο Παράρτημα Γ'.

αναθεώρησης των στρατηγικών, ο ρυθμός μεταβολής τους μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις της δυναμικής των αντιγραφών που δίδονται από

$$\dot{x}_f = x_f(\mathcal{U}_f - \bar{U}) \quad (4.4)$$

όπου η μεταβλητή $\bar{U} = \sum_{f \in \mathbf{F}} x_f \mathcal{U}_f$ είναι το μέσο όφελος.

Με βάση τις εξισώσεις (4.4), ισχύει το ακόλουθο θεώρημα, το οποίο αφορά τη σύγκλιση του συστήματος πρόβλεψης στη βέλτιστη συχνότητα για τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Θεώρημα 4.5.1. *Το μοντέλο πρόβλεψης εκτελεί τη διαδικασία της εκπαίδευσης χρησιμοποιώντας τη βέλτιστη συχνότητα f^* ως προς την υπολογιστική επιβάρυνση και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.*

Απόδειξη. Η απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ'.1. □

Με άλλα λόγια, το Θεώρημα 4.5.1 αναφέρει ότι το σύστημα πρόβλεψης εκτελεί τη διαδικασία της εκπαίδευσης με συχνότητα η οποία συγκλίνει στη βέλτιστη συχνότητα ως προς την υπολογιστική επιβάρυνση και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Επομένως, σε κατάλληλο βάθος χρόνου² οι συχνότητες εκπαίδευσης οι οποίες δίδουν υποδεέστερα αποτελέσματα θα εκλείψουν, βελτιστοποιώντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, τη λειτουργικότητα του συστήματος πρόβλεψης.

4.5.3 Ανάλυση διακλάδωσης

Όπως αποδείχτηκε παραπάνω, το σύστημα πρόβλεψης, σε βάθος χρόνου, εκτελεί τη διαδικασία εκπαίδευσης με τη βέλτιστη συχνότητα. Στην παράγραφο αυτή, δίδεται η ανάλυση διακλάδωσης (bifurcation analysis) για τη σχέση ανταλλαγής που μελετήθηκε προκειμένου να ερευνηθεί η εξάρτηση της βέλτιστης συχνότητας f^* ως προς την παράμετρο β της εξίσωσης (4.3). Θεωρώντας την παράμετρο β ως μεταβλητή ελέγχου, προκύπτει το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 4.5.2. *Υπάρχει μια τιμή κατωφλίου $\beta_{thr}^{(f^*)}$ για κάθε συχνότητα στο σύνολο \mathbf{F} , πάνω από την οποία η συχνότητα $f^* \in \mathbf{F}$ γίνεται βέλτιστη για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Ισχύει ότι*

$$\beta_{thr}^{(f^*)} = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{C_{f^*}}{C_{f^*-1/N}}\right)}{\ln\left(\frac{C_{f^*}}{C_{f^*-1/N}}\right) + \ln\left(\frac{S_{f^*}}{S_{f^*-1/N}}\right)} & \text{αν } f^* \neq 1/N \\ 0 & \text{αν } f^* = 1/N \end{cases} \quad (4.5)$$

Απόδειξη. Η απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ'.2. □

Το Θεώρημα 4.5.2 είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς προσδιορίζει τις τιμές κατωφλίου της παραμέτρου β οι οποίες καθιστούν μια συχνότητα βέλτιστη για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Οι τιμές κατωφλίου που εκφράζονται από την εξίσωση (4.5) αποτελούν τις τιμές διακλάδωσης (bifurcation values) του δυναμικού συστήματος (4.4) [27].

²Ο όρος «βάθος χρόνου» χρησιμοποιείται με τη μαθηματική έννοια και υποδηλώνει το χρόνο σύγκλισης στο ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας.

4.5.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Προκειμένου να γίνει η επικύρωση του προτεινόμενου σχήματος γίνεται η θεώρηση για εβδομαδιαία περίοδο αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί σε $N = 7$ ημέρες. Όσον αφορά το όφελος S_f που σχετίζεται με την ακρίβεια του συστήματος πρόβλεψης γίνεται η υπόθεση ότι η κανονικοποιημένη μορφή του περιγράφεται από τη συνάρτηση

$$S_f = \frac{\nu f}{\nu - f + 1} \quad (4.6)$$

όπου η μεταβλητή $\nu < -1$ εξαρτάται από τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Η επιλογή του ν αναπαριστά την επίδραση που έχει μια πιο ταχτική διαδικασία εκπαίδευσης στην ακρίβεια του συστήματος πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, για $\nu \rightarrow -1$, το όφελος S_f αποκτά μια λογαριθμική μορφή, και επομένως, ο ρυθμός αύξησης της ακρίβειας της πρόβλεψης μειώνεται καθώς η συχνότητα εκπαίδευσης αυξάνεται. Αντίθετα, για μικρές τιμές του ν η μορφή που αποκτά η συνάρτηση είναι γραμμική. Επιπλέον, επειδή το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης έχει σταθερό μέγεθος W , αναμένεται ότι το κανονικοποιημένο υπολογιστικό κόστος περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση

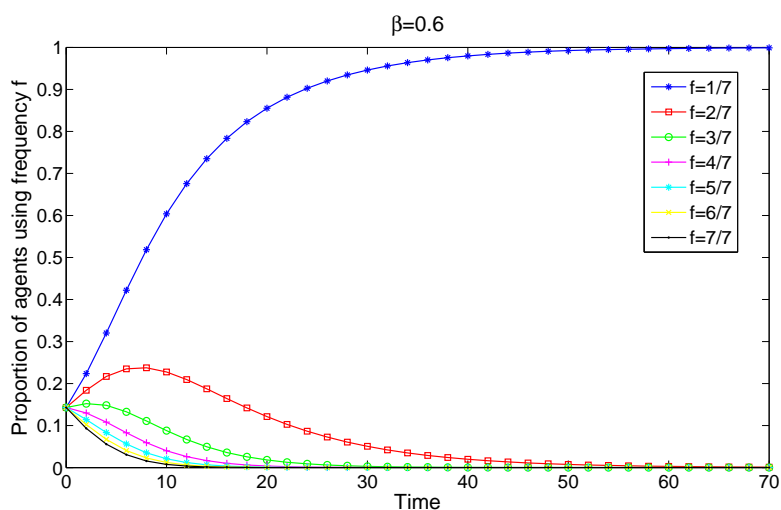
$$C_f = f \quad (4.7)$$

Στα Σχήματα 4.31-4.34 απεικονίζεται η εξέλιξη των δυνατών συχνοτήτων εκπαίδευσης με βάση τη δυναμική των αντιγραφών για τις τιμές $\beta = 0.6$, $\beta = 0.7$, $\beta = 0.8$ και $\beta = 0.9$, αντίστοιχα, και για τιμή της μεταβλητής $\nu = -1.2$. Όπως γίνεται εμφανές, η παράμετρος β της σχέσης ανταλλαγής επηρεάζει τη βέλτιστη συχνότητα της διαδικασίας εκπαίδευσης. Ειδικότερα, όταν το σύστημα πρόβλεψης δίδει σχεδόν ίση βαρύτητα στην ακρίβεια και στο υπολογιστικό κόστος ($\beta = 0.6$), επιλέγεται η ελάχιστη συχνότητα για την υλοποίηση της διαδικασίας της εκπαίδευσης. Ωστόσο, καθώς η τιμή της παραμέτρου αυξάνεται ($\beta = 0.7$ και $\beta = 0.8$), το σύστημα πρόβλεψης δίδει μεγαλύτερη βαρύτητα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, και επιλέγει να εκτελεί τη διαδικασία της πρόβλεψης συχνότερα. Εν τέλει, όταν το σύστημα πρόβλεψης δίδει ελάχιστη βαρύτητα στο υπολογιστικό κόστος ($\beta = 0.9$), τότε χρησιμοποιείται η μέγιστη συχνότητα εκπαίδευσης προκειμένου το σύστημα πρόβλεψης να είναι συνεχώς ενημερωμένο.

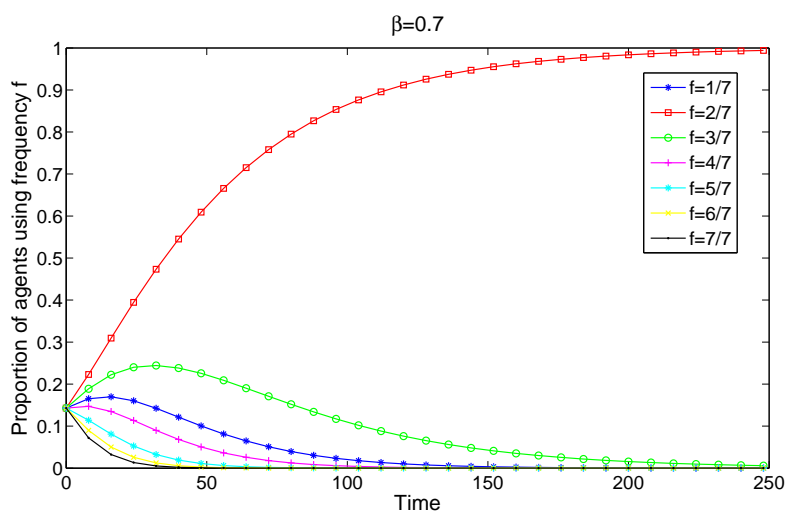
Οι τιμές διακλάδωσης του συστήματος ως προς τις βέλτιστες συχνότητες f^* απεικονίζονται στο Σχήμα 4.35 για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής ν . Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.35 παρέχονται οι τιμές κατωφλίου της παραμέτρου β , πάνω από τις οποίες, η συχνότητα f^* γίνεται ασυμπτωτικά ευσταθής για το σύστημα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται εύκολα κατανοητό ότι καθώς η μεταβλητή ν μειώνεται, οι τιμές κατωφλίου $\beta_{thr}^{(f^*)}$ μειώνονται. Με άλλα λόγια, για μια σταθερή τιμή της παραμέτρου β , ισχύει ότι στην περίπτωση που η συνάρτηση οφέλους S_f προσεγγίζει μια γραμμική μορφή, δηλαδή μειώνεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.6) (μικρότερες τιμές της μεταβλητής ν), απαιτείται μια πιο ταχτική διαδικασία εκπαίδευσης του συστήματος πρόβλεψης.

4.6 Επιλογή Μεγέθους Δεδομένων Εκπαίδευσης

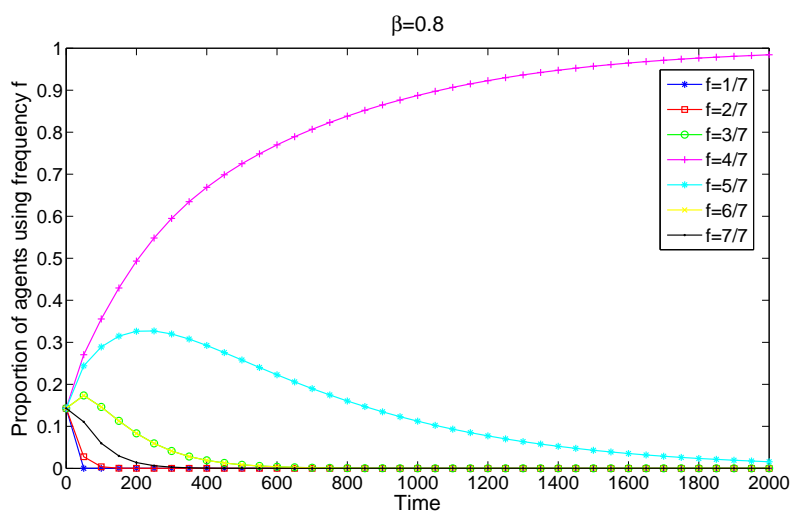
Στην παράγραφο 4.4 μελετήθηκε η επίδραση του μεγέθους των δεδομένων εκπαίδευσης στην ακρίβεια του συστήματος πρόβλεψης, οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι η σχετική



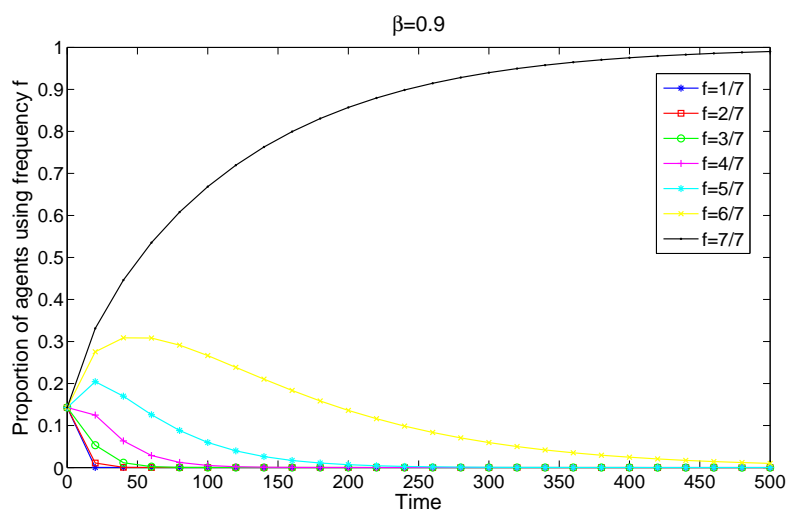
Σχήμα 4.31: Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίηση της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.6$ και $\nu = -1.2$.



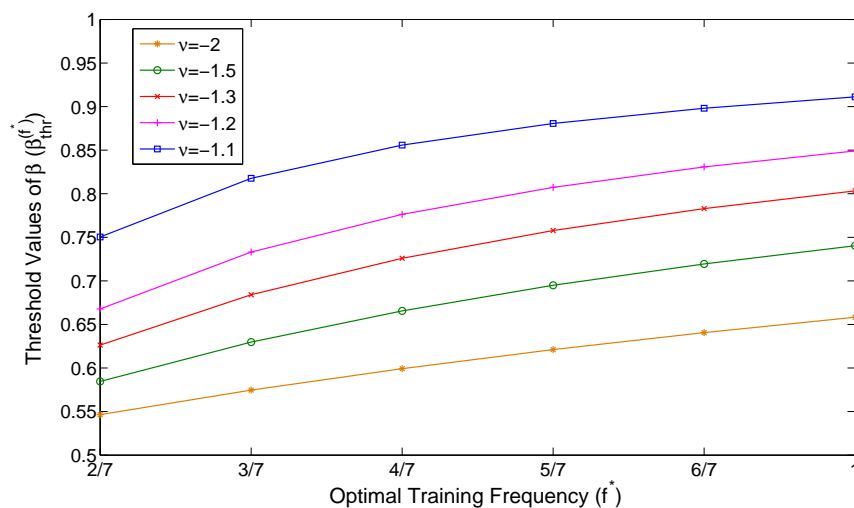
Σχήμα 4.32: Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίηση της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.7$ και $\nu = -1.2$.



Σχήμα 4.33: Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίηση της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.8$ και $\nu = -1.2$.



Σχήμα 4.34: Εξέλιξη των συχνοτήτων υλοποίηση της διαδικασίας της εκπαίδευσης για $\beta = 0.9$ και $\nu = -1.2$.



Σχήμα 4.35: Τιμές κατωφλίου της παραμέτρου της σχέσης ανταλλαγής β για διαφορετικές τιμές της μεταβλητής ν .

τυπική απόκλιση αποτελεί μια ικανοποιητική παράμετρο για την εκτίμηση της επίδοσης της πρόβλεψης. Ωστόσο, στη γενική περίπτωση το μέγεθος των δεδομένων εκπαίδευσης διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επίδοση των νευρωνικών δικτύων. Συνήθως, ένα μικρό σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης μπορεί να οδηγήσει στην υποπροσαρμογή του μοντέλου, ενώ ένα μεγάλο σύνολο εκπαίδευσης αν και κατά γενική ομολογία παρέχει καλύτερα αποτελέσματα σε προβλήματα πρόβλεψης, χαρακτηρίζεται από υψηλό υπολογιστικό κόστος. Επομένως, γίνεται εμφανές ότι υπάρχει μια σχέση ανταλλαγής, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, μεταξύ της ακρίβειας του μοντέλου και της υπολογιστικής πολυπλοκότητας συναρτήσεως του μεγέθους των δεδομένων εκπαίδευσης. Σκοπός της συγκεκριμένης παραγράφου είναι η θεωρητική μελέτη αυτής της σχέσης ανταλλαγής με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων.

4.6.1 Περιγραφή του προβλήματος

Όπως έχει περιγραφεί μέχρι τώρα, ο ευφυής πράκτορας καταγράφει και αποθηκεύει τα δεδομένα της κίνησης του Σταθμού Βάσης, και στη συνέχεια τα χρησιμοποιεί προκειμένου να εκπαιδεύσει το σύστημα πρόβλεψης. Στη γενική περίπτωση, αναμένεται ότι όταν χρησιμοποιούνται όλα τα συλλεχθέντα δεδομένα, τότε το μοντέλο πρόβλεψης εμφανίζει καλύτερη επίδοση ως προς την εκτίμηση της κίνησης. Ωστόσο, ένα σημαντικό πρόβλημα που εγείρεται στην περίπτωση αυτή είναι ότι επειδή το σύστημα διαχείρισης πόρων απαιτεί μια τακτική διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, προκειμένου να είναι συνεχώς ενημερωμένο, το υπολογιστικό κόστος που δημιουργείται όταν χρησιμοποιείται το σύνολο των δεδομένων, είναι υψηλό. Από την άλλη πλευρά, η χρήση ενός μικρού μέρους των δεδομένων αυτών μπορεί να οδηγήσει το σύστημα στην υποπροσαρμογή, και συνεπώς, στην υποβάθμιση της επίδοσης του νευρωνικού δικτύου. Επομένως, υπάρχει μια σχέση ανταλλαγής μεταξύ της ακρίβειας του συστήματος πρόβλεψης και του υπολογιστικού κόστους που αντιστοιχεί σε αυτό, συναρτήσεως του όγκου των δεδομένων εκπαίδευσης.

Έστω ότι το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων από το Σταθμό Βάσης συμβολίζεται με \mathbf{W} . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αν το σύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων \mathbf{W} χρησιμοποιηθεί για τη διαδικασία της εκπαίδευσης, τότε ο υπολογιστικός φόρτος που δημιουργείται είναι απαγορευτικός για την περιοδική εκτέλεση της διαδικασίας αυτής. Για το σκοπό αυτό, γίνεται η υπόθεση ότι για την υλοποίηση της εκπαίδευσης χρησιμοποιείται ένα σύνολο δεδομένων \mathbf{M} που είναι υποσύνολο του \mathbf{W} , $\mathbf{M} \subseteq \mathbf{W}$. Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι το σύνολο \mathbf{M} είναι ένα ποσοστό των πλέον πρόσφατων συλλεχθέντων δεδομένων, δηλαδή $\mathbf{M} = \rho \mathbf{W}$ όπου $\rho \in [0, 1]$. Για λόγους απλοποίησης, γίνεται η θεώρηση ότι η μεταβλητή ρ λαμβάνει διακριτές τιμές από ένα σύνολο $\mathbf{P} = [1/N, 2/N, \dots, 1]$, όπου N είναι φυσικός αριθμός, $N \in \mathbb{N}$, που υποδηλώνει τα δυνατά σύνολα εκπαίδευσης. Επομένως, το σύστημα πρόβλεψης χρησιμοποιεί το κατάλληλο ποσοστό $\rho \in \mathbf{P}$ των συλλεχθέντων δεδομένων, το οποίο παρέχει ακριβή και υπολογιστικά αποδοτικά αποτελέσματα.

Έστω ότι η συνάρτηση \mathcal{F}_ρ συμβολίζει το όφελος που αντιλαμβάνεται το σύστημα πρόβλεψης ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όταν το ποσοστό $\rho \in \mathbf{P}$ των συλλεχθέντων δεδομένων χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται η θεώρηση ότι το όφελος \mathcal{F}_ρ είναι μια μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση του ρ . Αντίστοιχα, το υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας της εκπαίδευσης συμβολίζεται με C_ρ και είναι, επίσης, μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση της μεταβλητής ρ . Αναμένεται ότι καθώς το ποσοστό των δεδομένων ρ που χρη-

σιμοποιούνται για τη διαδικασία της εκπαίδευσης αυξάνεται, το σύστημα πρόβλεψης δίδει ακριβέστερα αποτελέσματα, καταναλώνοντας, όμως, περισσότερους υπολογιστικούς πόρους.

Δεδομένου του οφέλους \mathcal{F}_ρ και του αντίστοιχου υπολογιστικού κόστους C_ρ , το καθαρό όφελος του ευφυούς πράκτορα ορίζεται ως

$$U_\rho = \frac{\mathcal{F}_\rho^\beta}{C_\rho^{1-\beta}} \quad (4.8)$$

όπου $\beta \in [0, 1]$ είναι η παράμετρος της σχέσης ανταλλαγής. Για την τιμή $\beta = 0$, το σύστημα πρόβλεψης δίδει βαρύτητα στο υπολογιστικό κόστος της εκπαίδευσης, ενώ για $\beta = 1$, το σύστημα πρόβλεψης ενδιαφέρεται μόνο για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

4.6.2 Εφαρμογή της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων

Στην παράγραφο αυτή εφαρμόζεται η εξελικτική θεωρία παιγνίων στο πρόβλημα που περιγράφηκε παραπάνω. Για το σκοπό αυτό γίνεται η υπόθεση ότι το σύστημα πρόβλεψης απαρτίζεται από ένα πληθυσμό πρακτόρων³ καθένας εκ των οποίων χρησιμοποιεί ένα ποσοστό $\rho \in \mathbf{P}$ των συλλεχθέντων δεδομένων για την εκπαίδευση του συστήματος πρόβλεψης με αντίστοιχο όφελος U_ρ . Αν με x_ρ συμβολίζεται το ποσοστό του πληθυσμού των πρακτόρων που χρησιμοποιούν τη στρατηγική ρ , τότε ισχύει $\sum_{\rho \in \mathbf{P}} x_\rho = 1$. Σημειώνεται ότι το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί στην πιθανότητα το σύστημα πρόβλεψης να χρησιμοποιεί το ποσοστό ρ για την εκπαίδευση του συστήματος πρόβλεψης.

Στο παίγνιο το οποίο μελετάται, γίνεται η υπόθεση ότι σε καθορισμένες περιόδους (γενεές) το σύστημα πρόβλεψης αναθεωρεί τις στρατηγικές του (δηλαδή την επιλογή του κατάλληλου ποσοστού των συλλεχθέντων δεδομένων για την εκπαίδευση του συστήματος πρόβλεψης), και μόνο οι στρατηγικές που επιφέρουν όφελος μεγαλύτερο από το μέσο όφελος ευνοούνται. Για μικρή περίοδο του χρόνου αναθεώρησης των στρατηγικών, ο ρυθμός μεταβολής τους μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις της δυναμικής των αντιγραφών που δίδονται από

$$\dot{x}_\rho = x_\rho(U_\rho - \bar{U}) \quad (4.9)$$

όπου η μεταβλητή $\bar{U} = \sum_{\rho \in \mathbf{P}} x_\rho U_\rho$ είναι το μέσο όφελος.

Με βάση την εξίσωση (4.9) ισχύει το ακόλουθο θεώρημα

Θεώρημα 4.6.1. *Η διαδικασία της εκπαίδευσης του συστήματος πρόβλεψης γίνεται με ένα υποσύνολο των συλλεχθέντων δεδομένων που θεωρείται βέλτιστο ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και το υπολογιστικό κόστος που συνεπάγεται η διαδικασία αυτή.*

Απόδειξη. Η απόδειξη ομοιάζει με την απόδειξη του Θεωρήματος 4.5.1. □

Με άλλα λόγια, το επιλεγέν σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης είναι ασυμπτωτικά ευσταθές υπό τη δυναμική των αντιγραφών και όλα τα υπόλοιπα σύνολα που θεωρούνται υποδεέστερα θα εξαλειφθούν βελτιστοποιώντας τη λειτουργικότητα του συστήματος πρόβλεψης. Επομένως, το σύστημα πρόβλεψης χρησιμοποιεί το κατάλληλο σύνολο εκπαίδευσης το οποίο διασφαλίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης και είναι υπολογιστικά αποδοτικό.

³Εδώ ο όρος του πράκτορα σχετίζεται με την έννοια που του αποδίδεται από την εξελικτική θεωρία παιγνίων και δεν πρέπει να συγχέεται με την έννοια του ευφυούς πράκτορα που μελετήθηκε παραπάνω.

4.6.3 Ανάλυση διακλάδωσης

Στην προηγούμενη παράγραφο αποδείχτηκε ότι αν η αναθεώρηση των στρατηγικών του συστήματος πρόβλεψης σχετικά με τον όγκο των δεδομένων εκπαίδευσης περιγράφεται με τη χρήση της δυναμικής των αντιγραφών, τότε το σύστημα συγκλίνει στο βέλτιστο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και τον υπολογιστικό φόρτο. Στη βάση των παραπάνω, μελετάται η ανάλυση διακλάδωσης για το προτεινόμενο σχήμα προκειμένου να ερευνηθεί η εξάρτηση του βέλτιστου ποσοστού ρ ως προς την παράμετρο β της εξίσωσης (4.8). Θεωρώντας την παράμετρο β ως μεταβλητή ελέγχου, προκύπτει το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 4.6.2. Υπάρχει μια τιμή κατωφλίου $\beta_{thr}^{(\rho^*)}$ για κάθε ποσοστό στο σύνολο \mathbf{P} πάνω από την οποία το σύνολο δεδομένων $\mathbf{M}^* = \rho^* \mathbf{W}$ γίνεται βέλτιστο για τη διαδικασία της εκπαίδευσης του συστήματος πρόβλεψης. Ισχύει ότι

$$\beta_{thr}^{(\rho^*)} = \begin{cases} \frac{\ln\left(\frac{C_{\rho^*}}{C_{\rho^*-1/N}}\right)}{\ln\left(\frac{C_{\rho^*}}{C_{\rho^*-1/N}}\right) + \ln\left(\frac{F_{\rho^*}}{F_{\rho^*-1/N}}\right)} & \text{αν } \rho^* \neq 1/N \\ 0 & \text{αν } \rho^* = 1/N \end{cases} \quad (4.10)$$

Απόδειξη. Η απόδειξη ομοιάζει με αυτή του Θεωρήματος 4.5.2. □

Το Θεώρημα 4.6.2 είναι ιδιαίτερης σημασίας, καθώς προσδιορίζει τις τιμές κατωφλίου της παραμέτρου β οι οποίες καθιστούν ένα ποσοστό των συλλεχθέντων δεδομένων βέλτιστο για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Οι τιμές κατωφλίου που εκφράζονται από την εξίσωση (4.10) αποτελούν τις τιμές διακλάδωσης του δυναμικού συστήματος (4.9) [27].

4.6.4 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Προκειμένου να γίνει η επικύρωση των παραπάνω αποτελεσμάτων, γίνεται η υπόθεση κατάλληλων συναρτήσεων. Έστω ότι το κανονικοποιημένο όφελος \mathcal{F}_ρ που σχετίζεται με την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης δίδεται από τη σιγμοειδή συνάρτηση

$$\mathcal{F}_\rho = \frac{1}{1 + \exp(-A\rho + B)} \quad (4.11)$$

όπου τα $A, B > 0$ είναι παράμετροι που καθορίζουν το όφελος του συστήματος πρόβλεψης. Ειδικότερα, για $A \gg B$ η αύξηση του όγκου των δεδομένων εκπαίδευσης επιφέρει μια ελάχιστονο σημασίας αύξηση στην ακρίβεια της πρόβλεψης. Επιπλέον, καθώς το όφελος \mathcal{F}_ρ είναι κανονικοποιημένο ισχύει ότι $\lim_{\rho \rightarrow 0} \mathcal{F}_\rho = 0$ και $\lim_{\rho \rightarrow 1} \mathcal{F}_\rho = 1$.

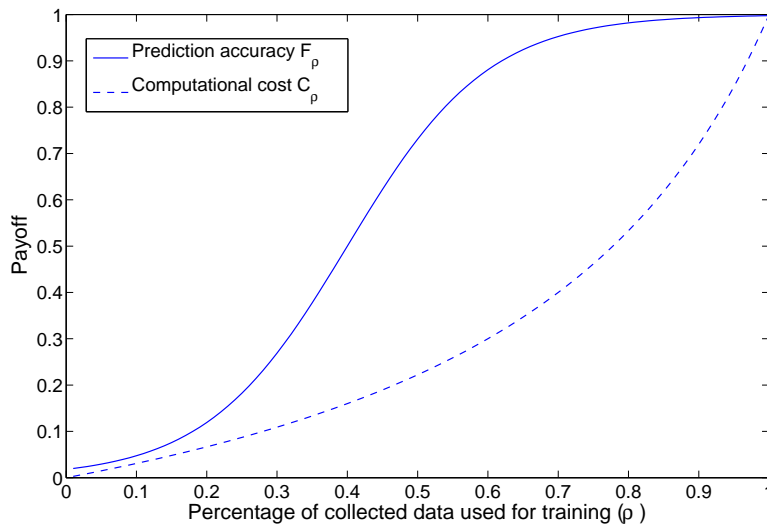
Όσον αφορά το υπολογιστικό κόστος C_ρ της διαδικασίας εκπαίδευσης, γίνεται η υπόθεση ότι η κανονικοποιημένη μορφή του δίδεται από την εξίσωση

$$C_\rho = \frac{\delta \rho}{\delta - \rho + 1} \quad (4.12)$$

όπου η παράμετρος $\delta > 0$ εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη. Η επιλογή της παραμέτρου δ καθορίζει την επίδραση ενός μεγαλύτερου συνόλου εκπαίδευσης στο υπολογιστικό φόρτο του συστήματος. Συγκεκριμένα, για $\delta \rightarrow 0$, η αύξηση στο υπολογιστικό φόρτο γίνεται

αξιοσημείωτη καθώς ο όγκος των δεδομένων εκπαίδευσης αυξάνεται. Από την άλλη πλευρά, για $\delta \gg 0$, η εξίσωση (4.12) προσεγγίζει μια γραμμική μορφή, και επομένως, η αύξηση του όγκου των δεδομένων εκπαίδευσης δημιουργεί μια γραμμική αύξηση στο υπολογιστικό κόστος C_ρ .

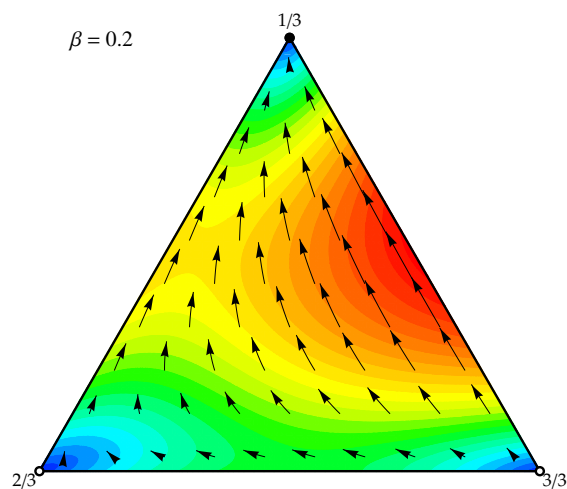
Έστω η περίπτωση τριών δυνατών συνόλων εκπαίδευσης, $N = 3$. Γίνεται η υπόθεση ότι το όφελος \mathcal{F}_ρ έχει τη μορφή που δίδεται από τις παραμέτρους $A = 10$ και $B = 4$, ενώ για το υπολογιστικό κόστος, η παράμετρος δ λαμβάνει την τιμή $\delta = 0.4$. Το διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τις τιμές της παραμέτρου της σχέσης ανταλλαγής $\beta = 0.2$, $\beta = 0.6$ και $\beta = 0.99$ δίδεται στα Σχήματα 4.37-4.39, αντίστοιχα. Όπως γίνεται εμφανές από το διάγραμμα φάσης του Σχήματος 4.37, όταν το σύστημα πρόβλεψης δίδει μεγαλύτερη βαρύτητα στο υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας εκπαίδευσης ($\beta = 0.2$), οι τροχιές συγκλίνουν στο ποσοστό $\rho = 1/3$, και επομένως, επιλέγεται ένα μικρό σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Καθώς η τιμή του β αυξάνεται, το σύστημα πρόβλεψης δίδει περισσότερη βαρύτητα στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Όταν το σύστημα δίδει παρόμοια βαρύτητα στους δύο παράγοντες ($\beta = 0.6$), τότε οι τροχιές συγκλίνουν στο ποσοστό $\rho = 2/3$, και συνεπώς, χρησιμοποιείται ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.38. Αντίστοιχα, όταν το σύστημα δίδει μείζονα σημασία στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων ($\beta = 0.99$), τότε χρησιμοποιείται το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης και οι τροχιές συγκλίνουν στο ποσοστό $\rho = 3/3$.



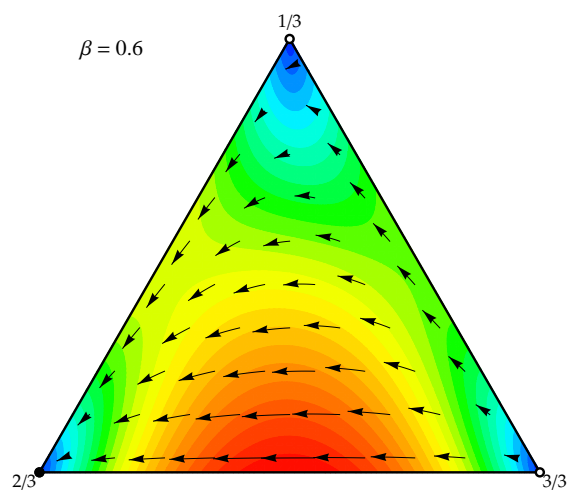
Σχήμα 4.36: Σχηματική αναπαράσταση του κανονικοποιημένου οφέλους της ακρίβειας του συστήματος πρόβλεψης και του υπολογιστικού κόστους συναρτήσει του ποσοστού των συλλεχθέντων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Όσον αφορά την ανάλυση διακλάδωσης, στα Σχήματα 4.40-4.41 παρουσιάζονται οι τιμές διακλάδωσης του δυναμικού συστήματος συναρτήσει του βέλτιστου ποσοστού των δεδομένων εκπαίδευσης. Ειδικότερα, τα σχήματα αυτά παρέχουν τις τιμές κατωφλίου $\beta_{thr}^{(\rho^*)}$, πάνω από τις οποίες το σύνολο των δεδομένων εκπαίδευσης που αποτελείται από το ποσοστό ρ^* των συλλεχθέντων δεδομένων γίνεται ασυμπτωτικά ευσταθές για το δυναμικό σύστημα.

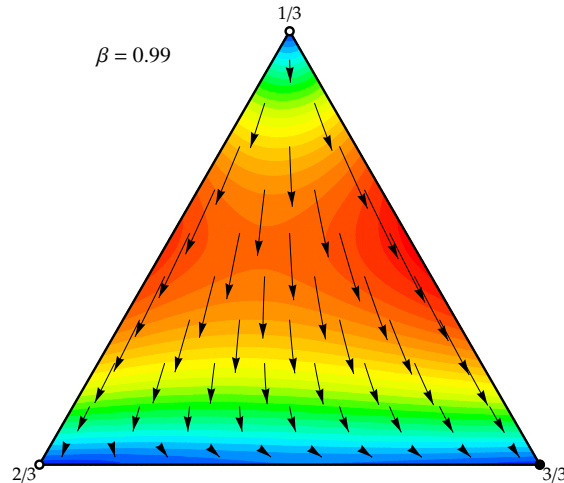
Στο Σχήμα 4.40 απεικονίζονται οι τιμές διακλάδωσης της μεταβλητής $\beta_{thr}^{(\rho^*)}$ για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου δ . Όπως γίνεται εμφανές, καθώς η τιμή του δ



Σχήμα 4.37: Διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τιμή της παραμέτρου $\beta = 0.2$.

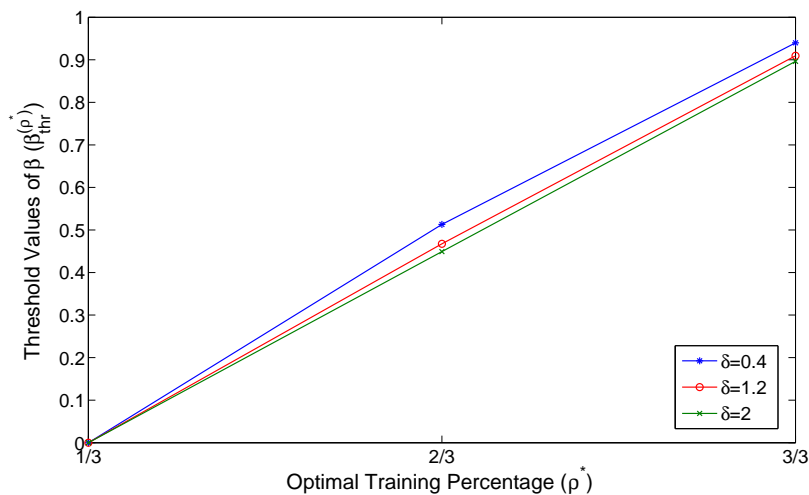


Σχήμα 4.38: Διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τιμή της παραμέτρου $\beta = 0.6$.



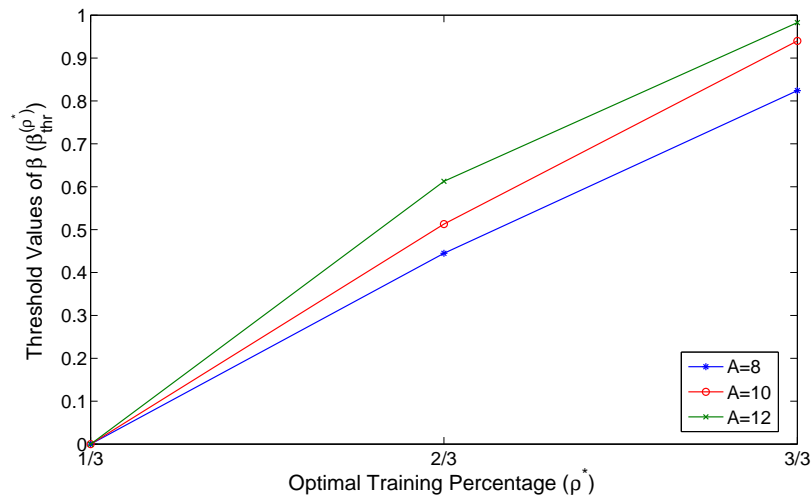
Σχήμα 4.39: Διάγραμμα φάσης του δυναμικού συστήματος για τιμή της παραμέτρου $\beta = 0.99$.

αυξάνεται, δηλαδή το υπολογιστικό κόστος αυξάνεται και προσεγγίζει μια γραμμική μορφή, οι τιμές διακλάδωσης $\beta_{thr}^{(\rho^*)}$ μειώνονται. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.41 παρουσιάζεται η επίδραση του οφέλους της ακρίβειας της πρόβλεψης στις τιμές διακλάδωσης του δυναμικού συστήματος. Ειδικότερα, παρατηρείται ότι καθώς το όφελος αυξάνεται για μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης, δηλαδή η παράμετρος A αυξάνεται, τότε αυξάνονται, επίσης, και οι τιμές διακλάδωσης του δυναμικού συστήματος.



Σχήμα 4.40: Τιμές διακλάδωσης της παραμέτρου β για διαφορετικές τιμές του δ συναρτήσει του βέλτιστου ποσοστού ρ^* των δεδομένων εκπαίδευσης για $A = 10$ και $B = 4$.

Με άλλα λόγια, για μια σταθερή τιμή της παραμέτρου β , όταν το επιπλέον υπολογιστικό κόστος ενός μεγαλύτερου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης γίνεται σταθερό, δηλαδή η τιμή της παραμέτρου δ αυξάνεται και το υπολογιστικό κόστος προσεγγίζει μια γραμμική μορφή, τότε προτιμάται η χρήση ενός μεγαλύτερου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης. Από την άλλη πλευρά, όταν η αύξηση του οφέλους της ακρίβειας της



Σχήμα 4.41: Τιμές διακλάδωσης της παραμέτρου β για διαφορετικές τιμές του A συναρτήσει του βέλτιστου ποσοστού ρ των δεδομένων εκπαίδευσης για $b = 0.4$ και $B = 4$.

πρόβλεψης γίνεται λιγότερο σημαντική για μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης, δηλαδή η τιμή της παραμέτρου A αυξάνεται, τότε προτιμάται η χρήση ενός μικρότερου συνόλου δεδομένων για τη διαδικασία της εκπαίδευσης.

Κεφάλαιο 5

Υποστηρικτικές Λειτουργίες Διαχείρισης Πόρων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε σε βάθος η διαδικασία της πρόβλεψης που αφορά μια μεσοπρόθεσμη περίοδο και έχει ως σκοπό τη δημιουργία ενός συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου του οπτικού δικτύου. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή των υπολοίπων βασικών λειτουργιών του ευφυούς πράκτορα, οι οποίες κρίνονται απαραίτητες για την αποδοτική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου και αξιολογείται η επίδοση του προτεινόμενου συστήματος. Αρχικά, μελετάται η διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης, η οποία διασφαλίζει την αποδοτική λειτουργία του Σταθμού Βάσης στις περιπτώσεις απότομων μεταβολών της κίνησης που μεταφέρει το οπισθοζευκτικό δίκτυο. Έπειτα, σχηματίζεται η διαδικασία αντιμετώπισης των έκτακτων καταστάσεων του δικτύου που σχετίζονται με τη μη ομαλή λειτουργία του συστήματος, και στη συνέχεια, γίνεται μια σύντομη αναφορά στη διαδικασία αίτησης των πόρων από το οπισθοζευκτικό δίκτυο, η οποία οδηγεί στη δημιουργία του δυναμικού συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου του οπτικού δικτύου. Τέλος, το κεφάλαιο αυτό κλείνει με την αξιολόγηση της επίδοσης του ευφυούς πράκτορα και τη σύγκριση της προτεινόμενης δυναμικής διαχείρισης των πόρων με τις παραδοσιακές μεθόδους στατικής εκχώρησης.

5.1 Βραχυπρόθεσμη Πρόβλεψη Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου

Η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου διαδραματίζει υποστηρικτικό ρόλο στη λειτουργία του ευφυούς πράκτορα και εκτελείται στις περιπτώσεις όπου η τρέχουσα ζήτηση δεν συμφωνεί με τους δεσμευμένους από το οπισθοζευκτικό δίκτυο πόρους. Συγκεκριμένα, όταν η ζήτηση υπερβαίνει τους πόρους που έχουν δεσμευτεί ή είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτούς, τότε εκτελείται η διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης προκειμένου να διαπιστωθεί η ανάγκη εκχώρησης περισσότερων πόρων ή αποδέσμευσης μέρους αυτών. Η διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε περιπτώσεις όπου έκτακτα γεγονότα, τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη κατά τη διαδικασία της μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης, επηρεάζουν την κίνηση του Σταθμού Βάσης. Τέτοια γεγονότα μπορεί να είναι ένας ποδοσφαιρικός αγώνας ή μια συγκέντρωση όπου ο Σταθμός Βάσης καλείται να εξυπη-

ρετήσει ένα μεγάλο αριθμό συνδρομητών για μικρό χρονικό διάστημα.

Εν αντιθέσει με τη διαδικασία της μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης που μελετήθηκε μέχρι τώρα, η βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη χρησιμοποιεί ανάλυση χρονοσειρών σε συνδυασμό με ένα νευρωνικό δίκτυο προκειμένου να εκτιμήσει την επερχόμενη ζήτηση. Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων κρίνεται απαραίτητος και μπορεί να δώσει βελτιωμένα αποτελέσματα για βραχυχρόνιας κλίμακας πρόβλεψη.

5.1.1 Δεδομένα εισόδου

Με βάση τα όσα αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, τα δεδομένα εισόδου για τη διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου πρέπει να σχετίζονται με το χρόνο. Πέραν όμως αυτών, για τις ανάγκες της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης, ως εισοδοί χρησιμοποιούνται, επίσης, δεδομένα πραγματικής προγενέστερης ζήτησης που αναφέρονται σε ένα χρονικό παράθυρο διάρκειας t . Συνεπώς, το διάνυσμα εισόδου του νευρωνικού δικτύου είναι:

$$\mathbf{x} = (\text{Ημέρα}, \text{Μήνας}, \text{Ώρα}, \text{Ημερομηνία}, \text{Έτος}, \text{Ιδιαίτερο γεγονός}, \mathbf{y}_{-t})$$

όπου με *Ημέρα* συμβολίζεται η μέρα της εβδομάδας την οποία αφορά η καταγραφή της μέτρησης (πχ. Δευτέρα), με *Μήνας* ο μήνας του έτους, με *Ώρα* η ώρα της ημέρας που αφορά η καταγραφή, με *Ημερομηνία* η ημερομηνία (πχ. 25), με *Έτος* το έτος, με *Ιδιαίτερο γεγονός* συμβολίζεται μια δυαδική μεταβλητή που υποδηλώνει κάποια ιδιαίτερη περίπτωση ή αργία, η οποία μπορεί να επηρεάζει το αποτέλεσμα της πρόβλεψης και με τη διανυσματική μεταβλητή \mathbf{y}_{-t} συμβολίζεται η προγενέστερη ζήτηση για το χρονικό παράθυρο διάρκειας t . Στη συνέχεια, το χρονικό παράθυρο που χρησιμοποιείται είναι αυτό της μιας ημέρας, ήτοι $t = 24$.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της επίδοσης της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης αφορούν τις ζεύξεις ανόδου και καθόδου του ΣΒ1 και αποτελούνται από 1560 συνεχώς ληφθείσες μετρήσεις. Οι μετρήσεις αυτές διαχωρίζονται σε εννέα διακριτά εβδομαδιαία σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης αφήνοντας εκτός των συνόλων αυτών 48 ωριαίες μετρήσεις που αντιστοιχούν σε περίοδο δύο ημερών με βάση τις οποίες γίνεται η αξιολόγηση της επίδοσης του συστήματος. Τα εβδομαδιαία σύνολα εκπαίδευσης που χρησιμοποιούνται είναι δομημένα με τρόπο ώστε το σύνολο εκπαίδευσης 1 να περιλαμβάνει 168 μετρήσεις, ήτοι περίοδο μιας εβδομάδας, το σύνολο εκπαίδευσης 2 να περιλαμβάνει 336 μετρήσεις, ήτοι περίοδο δύο εβδομάδων, και να είναι υπερσύνολο του συνόλου εκπαίδευσης 1, κοκ.

5.1.2 Αποτελέσματα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης

Για την αξιολόγηση της επίδοσης των νευρωνικών δικτύων στην εκτίμηση της κίνησης του οπισθοζευκτικού δικτύου έγινε ξεχωριστή ανάλυση για κάθε σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης και μελετήθηκε η εξάρτησή της επίδοσης καθενός εξ' αυτών ως προς τον ορίζοντα πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων αφορούν εβδομαδιαίες περιόδους διάρκειας μιας έως εννέα εβδομάδων προγενέστερα της περιόδου που καλείται να εκτιμήσει το σύστημα βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης. Όσον αφορά την περίοδο πρόβλεψης, μελετήθηκαν ξεχωριστά οι περιπτώσεις διάρκειας 2, 4, 8, 12, 24, 48 ωρών και για τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων που έχουν χρησιμοποιηθεί ως τώρα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν περιγράφονται στον Πίνακα 5.1 για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου και στον Πίνακα 5.2

Κεφάλαιο 5. Υποστηρικτικές Λειτουργίες Διαχείρισης Πόρων

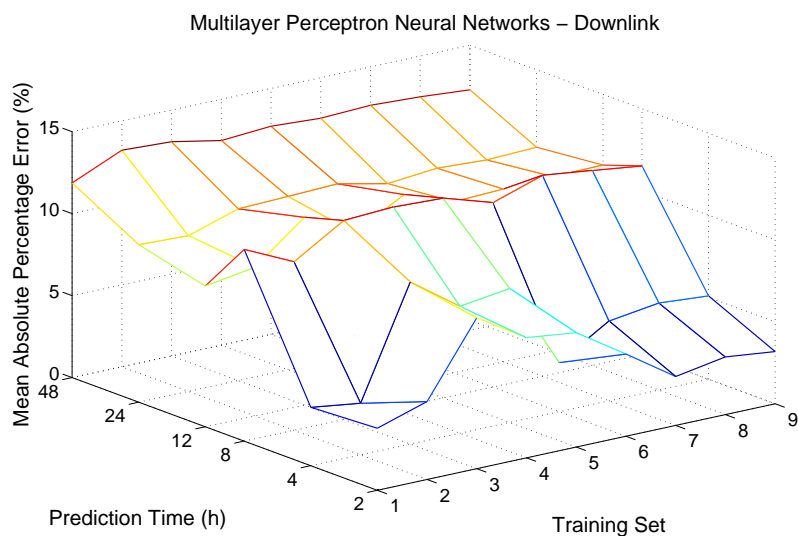
για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου. Οι γραφικές απεικονίσεις των παραπάνω αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.1-5.6 για τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων και για τις ζεύξεις καθόδου και ανόδου, αντίστοιχα.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης								
	1 εβδ.	2 εβδ.	3 εβδ.	4 εβδ.	5 εβδ.	6 εβδ.	7 εβδ.	8 εβδ.	9 εβδ.
MLP									
Πρόβλεψη 2h	3.783	4.754	9.196	7.332	6.975	5.012	2.983	3.517	3.188
Πρόβλεψη 4h	3.558	3.153	9.891	7.755	8.174	2.991	4.872	5.312	5.089
Πρόβλεψη 8h	11.691	10.281	12.133	12.303	12.186	11.253	12.256	11.892	11.513
Πρόβλεψη 12h	8.586	9.078	11.454	9.854	11.528	10.425	10.541	10.643	10.685
Πρόβλεψη 24h	9.608	9.495	10.480	10.573	10.685	10.038	10.319	10.165	10.279
Πρόβλεψη 48h	11.874	13.212	13.071	12.483	12.694	12.522	12.655	12.514	12.279
GMDH									
Πρόβλεψη 2h	2.069	3.448	2.805	3.184	2.991	4.420	1.698	3.749	5.830
Πρόβλεψη 4h	3.698	2.096	4.518	6.223	5.039	5.078	3.448	4.181	8.278
Πρόβλεψη 8h	11.036	10.197	10.558	12.471	11.916	11.750	11.805	13.038	11.757
Πρόβλεψη 12h	9.840	8.895	9.750	11.085	10.944	10.957	10.930	11.650	11.526
Πρόβλεψη 24h	10.099	10.690	10.541	10.812	10.675	11.351	11.273	11.199	10.647
Πρόβλεψη 48h	12.677	12.359	13.147	13.349	13.003	12.813	13.117	13.070	12.882
GRNN									
Πρόβλεψη 2h	0.888	1.662	2.628	1.688	1.805	1.608	1.720	1.630	3.164
Πρόβλεψη 4h	1.555	2.065	3.854	2.642	2.997	2.319	2.388	2.266	5.449
Πρόβλεψη 8h	11.835	12.354	12.664	12.588	12.833	12.641	12.437	12.510	12.153
Πρόβλεψη 12h	10.095	10.698	10.949	10.792	10.943	10.739	10.741	10.753	10.727
Πρόβλεψη 24h	9.807	10.427	10.104	10.001	10.020	9.860	9.884	9.931	10.341
Πρόβλεψη 48h	12.809	12.658	12.255	12.238	12.168	11.824	11.931	11.962	12.441

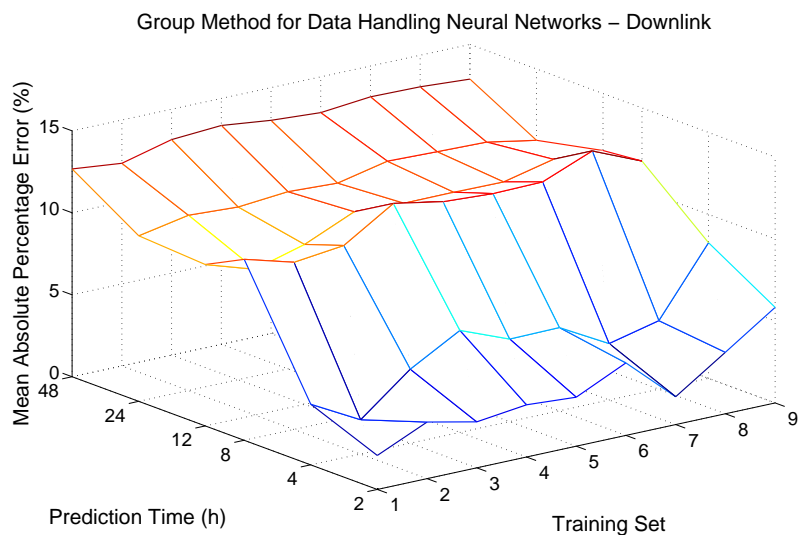
Πίνακας 5.1: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικές περιόδους πρόβλεψης και σύνολα εκπαίδευσης.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται εμφανές ότι η πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για το αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα δίδει αρκετά ακριβή αποτελέσματα και για τα τρία είδη νευρωνικών δικτύων. Ωστόσο, καθώς η περίοδος πρόβλεψης αυξάνεται, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα μεγαλώνει και προσεγγίζει αυτό της μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης που μελετήθηκε στο Κεφάλαιο 4. Όσον αφορά τη ζεύξη ανόδου, το σφάλμα εκτίμησης είναι μεγαλύτερο, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που εμφανίζει η κίνηση. Παρόλα αυτά, όπως και στη ζεύξη καθόδου, το μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα εμφανίζει χαμηλότερη τιμή για ένα μικρό ορίζοντα πρόβλεψης, ενώ καθώς ο ορίζοντας αυτός αυξάνεται, το σφάλμα προσεγγίζει την τιμή που υπολογίστηκε στην περίπτωση της μεσοπρόθεσμης πρόβλεψης. Τέλος, ως προς την επίδοση των νευρωνικών δικτύων, το δίκτυο GRNN εξακολουθεί να υπερέχει των δικτύων MLP και GMDH, παρέχοντας καλύτερα αποτελέσματα ως προς την πρόβλεψη.

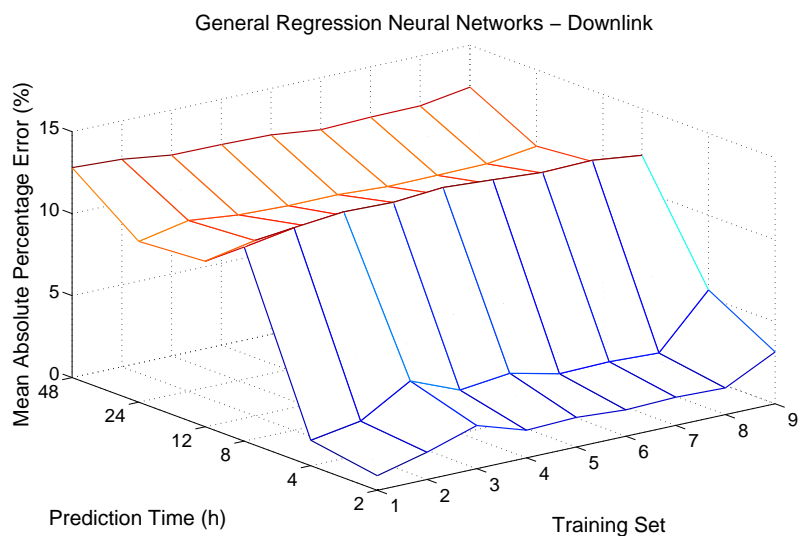
Σχετικά με το μέγεθος των δεδομένων εκπαίδευσης, όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου δεν διακρίνονται αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των διαφορετικών συνόλων εκπαίδευσης. Αντίθετα,



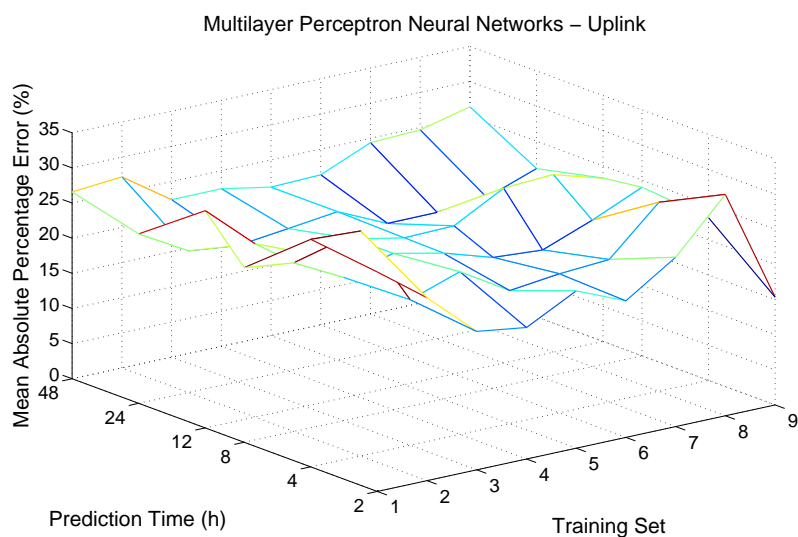
Σχήμα 5.1: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



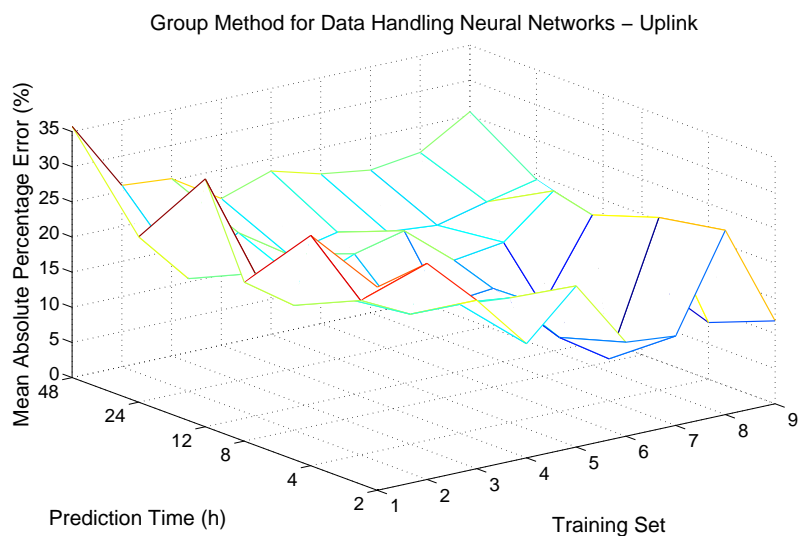
Σχήμα 5.2: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



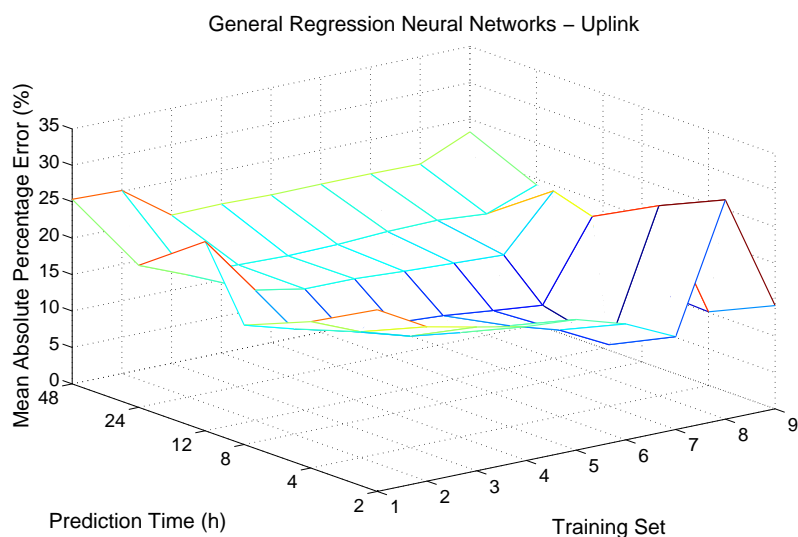
Σχήμα 5.3: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.4: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου.



Σχήμα 5.5: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσεως της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου.



Σχήμα 5.6: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσεως της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικά σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης								
	1 εβδ.	2 εβδ.	3 εβδ.	4 εβδ.	5 εβδ.	6 εβδ.	7 εβδ.	8 εβδ.	9 εβδ.
MLP									
Πρόβλεψη 2h	31.223	26.024	19.699	18.711	22.385	19.436	24.098	31.497	15.332
Πρόβλεψη 4h	32.378	32.018	20.718	23.178	18.946	19.789	20.281	26.880	23.159
Πρόβλεψη 8h	24.855	23.999	20.401	22.277	20.786	18.634	18.150	20.855	23.991
Πρόβλεψη 12h	30.915	24.657	21.787	22.258	20.913	21.074	24.885	25.278	23.256
Πρόβλεψη 24h	24.110	20.177	19.410	20.245	21.136	17.919	17.958	18.540	21.122
Πρόβλεψη 48h	26.586	27.189	22.412	22.419	21.118	21.330	24.371	24.651	26.398
GMDH									
Πρόβλεψη 2h	28.920	30.748	23.961	16.248	22.924	13.377	12.730	26.235	11.798
Πρόβλεψη 4h	32.763	21.985	18.483	18.356	17.717	10.562	5.985	24.556	8.072
Πρόβλεψη 8h	22.622	17.784	17.297	14.842	13.285	14.043	10.114	21.415	11.444
Πρόβλεψη 12h	35.263	20.309	17.028	19.986	21.738	16.015	17.021	22.799	16.610
Πρόβλεψη 24h	23.539	16.044	21.070	16.464	18.028	16.563	15.964	17.750	19.371
Πρόβλεψη 48h	35.761	25.822	25.241	20.877	23.238	21.311	20.309	21.276	25.544
GRNN									
Πρόβλεψη 2h	24.933	21.178	19.742	18.386	17.936	15.906	12.748	30.116	14.179
Πρόβλεψη 4h	20.082	17.274	15.258	14.336	13.860	11.851	8.435	26.090	10.100
Πρόβλεψη 8h	16.381	14.464	12.772	12.428	12.028	11.306	10.621	21.385	10.542
Πρόβλεψη 12h	25.974	17.910	16.655	16.626	16.244	15.941	15.644	23.003	15.685
Πρόβλεψη 24h	19.485	16.744	16.740	16.561	16.701	17.066	17.189	16.648	19.212
Πρόβλεψη 48h	25.334	25.132	20.336	20.444	20.278	20.332	20.345	20.247	23.263

Πίνακας 5.2: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης ανόδου για διαφορετικές περιόδους πρόβλεψης και σύνολα εκπαίδευσης.

στην περίπτωση της ζεύξης ανόδου, ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης παρέχει καλύτερα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα μικρότερα σύνολα εκπαίδευσης περιλαμβάνουν ανεπαρκή αριθμό δεδομένων για την εκμάθηση του νευρωνικού δικτύου. Υπενθυμίζεται ότι η ζεύξη ανόδου χαρακτηρίζεται από υψηλή μεταβλητότητα, γεγονός που απαιτεί ένα επαρκές σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης για την εκμάθηση της συνάρτησης ζήτησης των συνδρομητών.

5.1.3 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το χρονικό παράθυρο

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της πρόβλεψης για ένα χρονικό παράθυρο 24 ωρών ($t = 24$). Δηλαδή, τα δεδομένα εισόδου του νευρωνικού δικτύου περιλάμβαναν εκτός από το χρόνο και τις πρόσφατες 24 ωριαίες καταγραφές της ζήτησης των συνδρομητών. Στην παρούσα παράγραφο αναλύεται η επίδραση του χρονικού παραθύρου στην επίδοση των νευρωνικών δικτύων. Για το σκοπό αυτό, εξετάζονται διαφορετικά χρονικά παράθυρα διάρκειας 1, 2, 4, 8, 12 και 24 ωρών για την πρόβλεψη της επερχόμενης βραχυπρόθεσμης ζήτησης της ζεύξης καθόδου για διάρκεια περιόδων πρόβλεψης 2, 4, 8, 12 και 24 ωρών. Η ανάλυση έγινε για τέσσερα διαφορετικά

σύνολα εκπαίδευσης από αυτά που μελετήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

5.1.3.1 Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 1 εβδομάδας

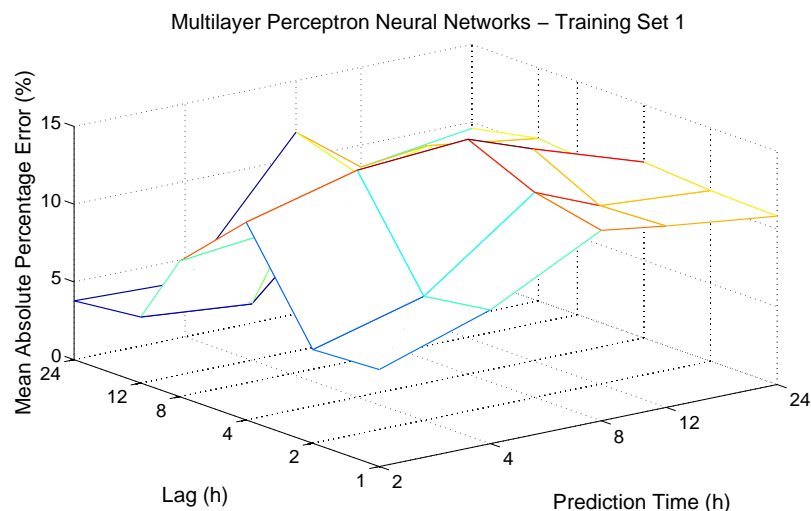
Για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται οι συλλεχθείσες μετρήσεις της τελευταίας εβδομάδας για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης του Σταθμού Βάσης, τα αποτελέσματα περιγράφονται στον Πίνακα 5.3, ενώ στα Σχήματα 5.7-5.9 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράστασή τους.

	Περίοδος Πρόβλεψης				
	2 ώρες	4 ώρες	8 ώρες	12 ώρες	24 ώρες
<i>MLP</i>					
1h Lag	6.240	8.596	12.245	11.663	10.829
2h Lag	6.025	7.972	13.197	11.482	10.978
4h Lag	12.715	14.583	15.108	13.625	11.309
8h Lag	8.712	9.485	10.782	10.608	10.177
12h Lag	4.244	3.611	10.296	11.471	10.465
24h Lag	3.783	3.558	11.691	8.586	9.608
<i>GMDH</i>					
1h Lag	4.718	21.285	11.901	11.051	11.357
2h Lag	21.499	7.852	12.282	11.253	10.853
4h Lag	10.622	5.354	11.847	9.969	10.384
8h Lag	4.088	3.813	9.050	9.419	9.525
12h Lag	1.536	5.701	11.033	10.594	10.002
24h Lag	2.069	3.698	11.036	9.840	10.099
<i>GRNN</i>					
1h Lag	4.117	5.628	12.197	11.233	10.981
2h Lag	3.967	5.469	12.323	11.273	11.295
4h Lag	2.377	5.265	11.220	10.605	10.298
8h Lag	3.076	5.893	10.135	10.065	9.989
12h Lag	2.270	4.759	9.740	9.578	9.569
24h Lag	0.888	1.555	11.835	10.095	9.807

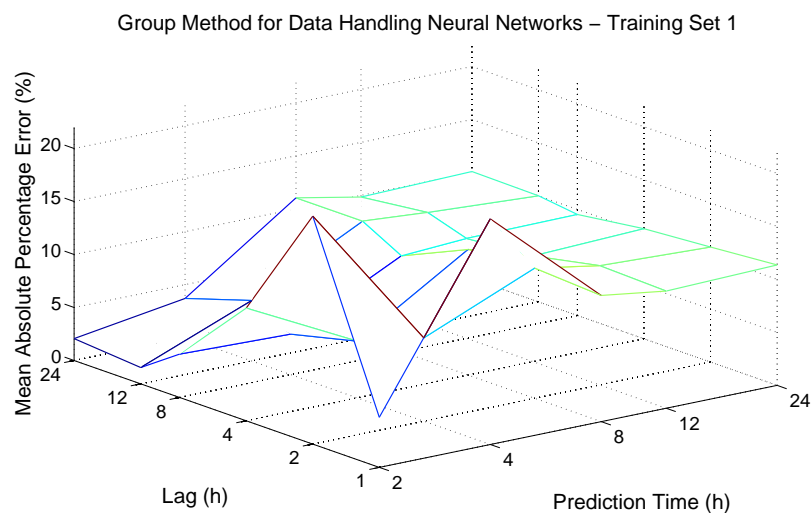
Πίνακας 5.3: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (*lags*) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας μιας εβδομάδας.

5.1.3.2 Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 2 εβδομάδων

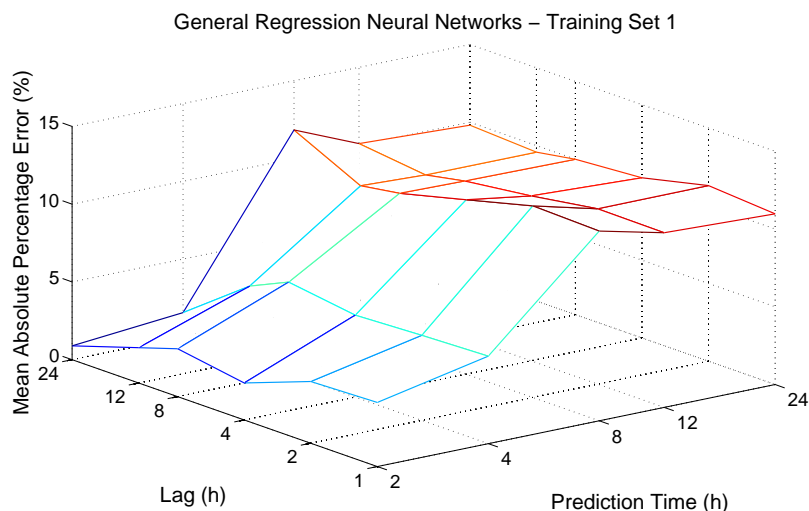
Για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται οι συλλεχθείσες μετρήσεις των τελευταίων δύο εβδομάδων για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης του Σταθμού Βάσης, τα αποτελέσματα περιγράφονται στον Πίνακα 5.4, ενώ στα Σχήματα 5.10-5.12 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράστασή τους.



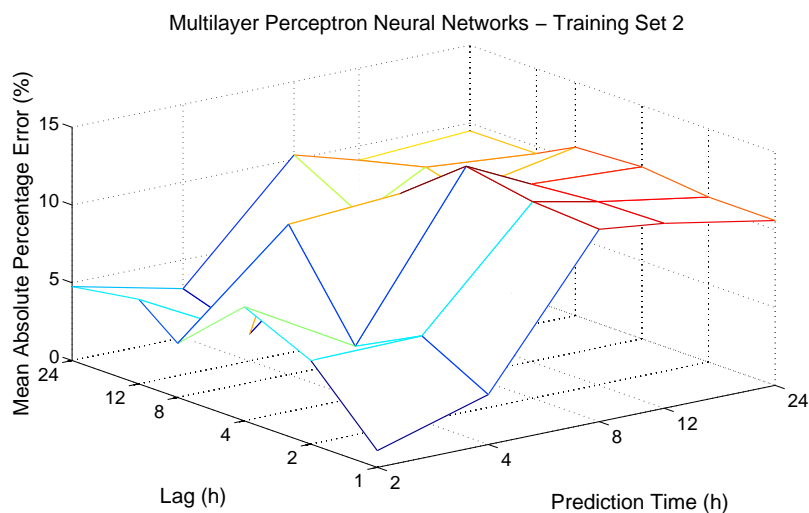
Σχήμα 5.7: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης μιας εβδομάδας για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



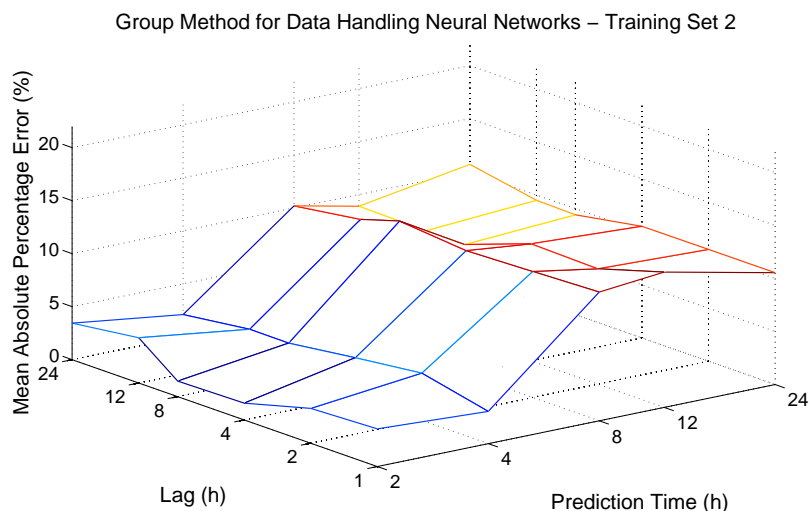
Σχήμα 5.8: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης μιας εβδομάδας για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



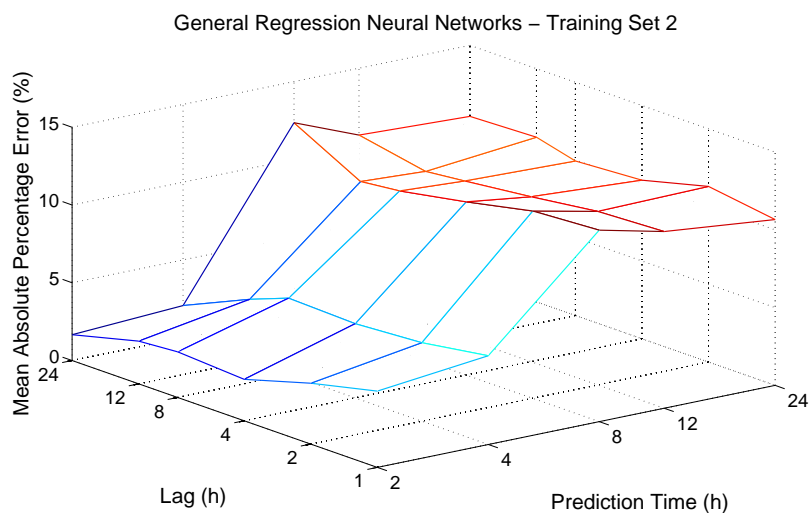
Σχήμα 5.9: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης μιας εβδομάδας για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.10: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης δύο εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.11: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης δύο εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.12: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης δύο εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.

	Περίοδος Πρόβλεψης				
	2 ώρες	4 ώρες	8 ώρες	12 ώρες	24 ώρες
MLP					
1h Lag	1.077	3.208	12.371	11.893	10.601
2h Lag	5.379	5.485	12.651	11.789	10.616
4h Lag	7.328	3.314	13.428	11.416	11.057
8h Lag	3.479	9.661	10.156	9.470	10.825
12h Lag	5.438	1.745	7.932	10.136	9.544
24h Lag	4.754	3.153	10.281	9.078	9.495
GMDH					
1h Lag	3.548	3.038	12.138	12.766	10.549
2h Lag	3.281	4.453	11.888	10.873	10.550
4h Lag	1.580	3.709	11.659	11.030	10.527
8h Lag	1.459	2.891	12.249	8.767	9.413
12h Lag	4.268	2.906	11.117	8.781	9.500
24h Lag	3.448	2.096	10.197	8.895	10.690
GRNN					
1h Lag	4.902	5.704	12.314	11.366	10.664
2h Lag	3.915	5.047	12.050	11.161	11.295
4h Lag	2.665	4.772	11.139	10.602	10.200
8h Lag	2.932	4.915	10.342	10.124	9.935
12h Lag	2.744	3.962	10.066	9.860	10.584
24h Lag	1.662	2.065	12.354	10.698	10.427

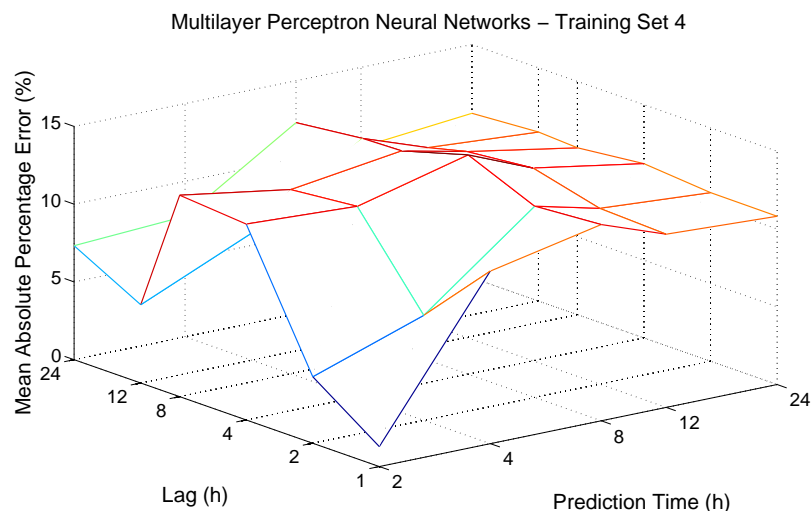
Πίνακας 5.4: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (lags) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας δύο εβδομάδων.

5.1.3.3 Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 4 εβδομάδων

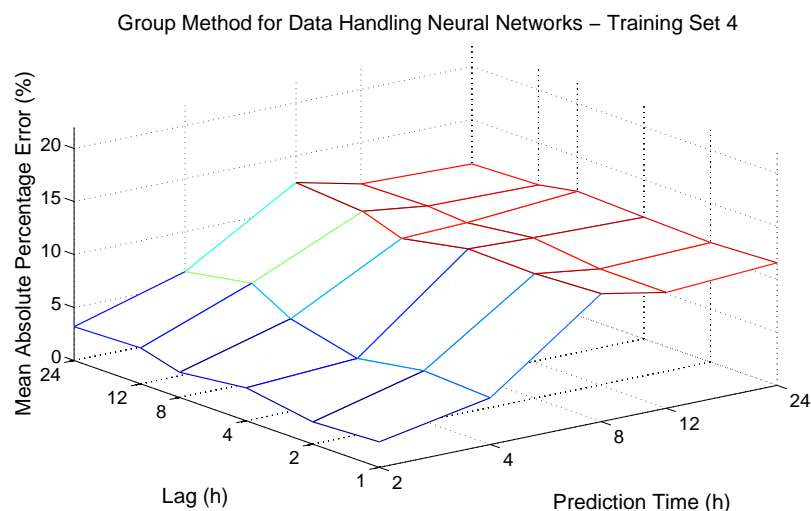
Για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται οι συλλεχθείσες μετρήσεις του τελευταίου μήνα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης του Σταθμού Βάσης, τα αποτελέσματα περιγράφονται στον Πίνακα 5.5, ενώ στα Σχήματα 5.13-5.15 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράστασή τους.

5.1.3.4 Δεδομένα εκπαίδευσης διάρκειας 8 εβδομάδων

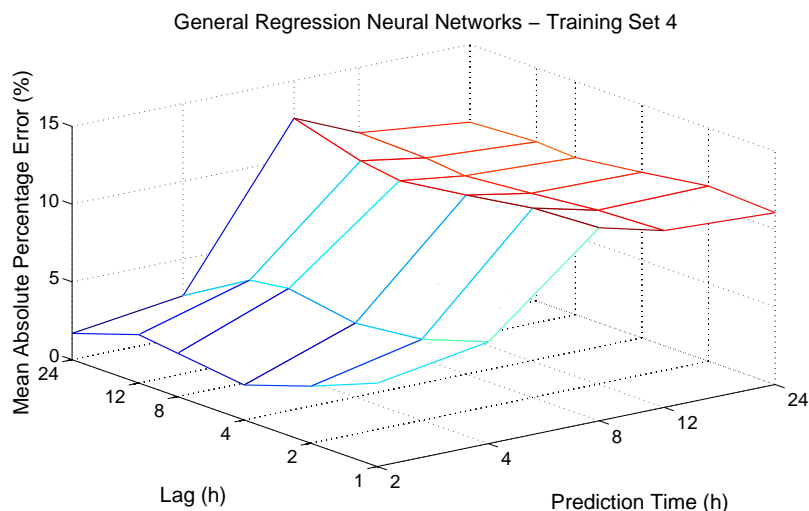
Για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται οι συλλεχθείσες μετρήσεις των τελευταίων 8 εβδομάδων για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης του Σταθμού Βάσης, τα αποτελέσματα περιγράφονται στον Πίνακα 5.6, ενώ στα Σχήματα 5.16-5.18 παρουσιάζεται η γραφική αναπαράστασή τους.



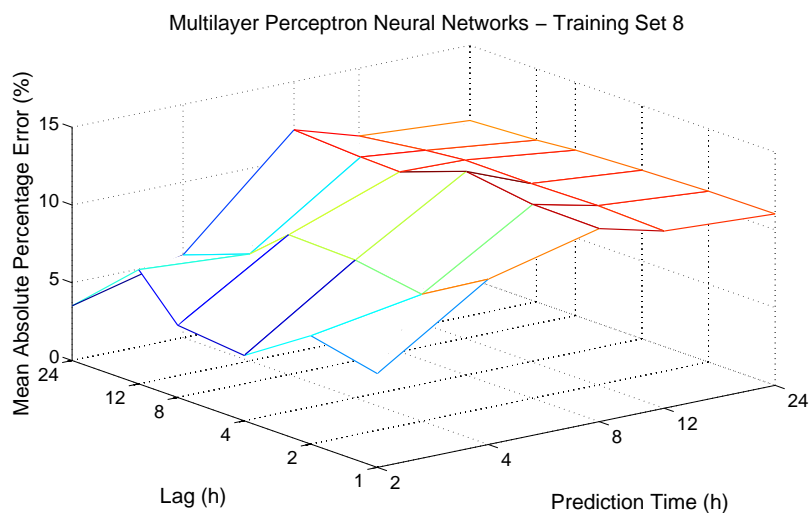
Σχήμα 5.13: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης τεσσάρων εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



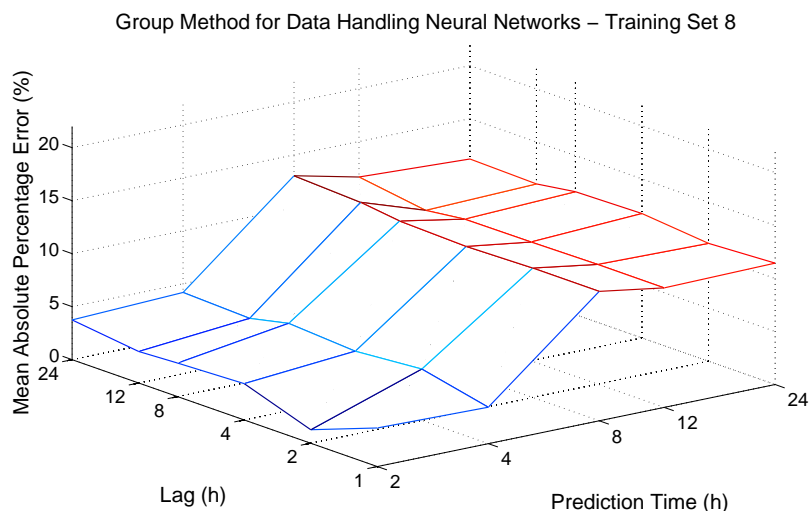
Σχήμα 5.14: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης τεσσάρων εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



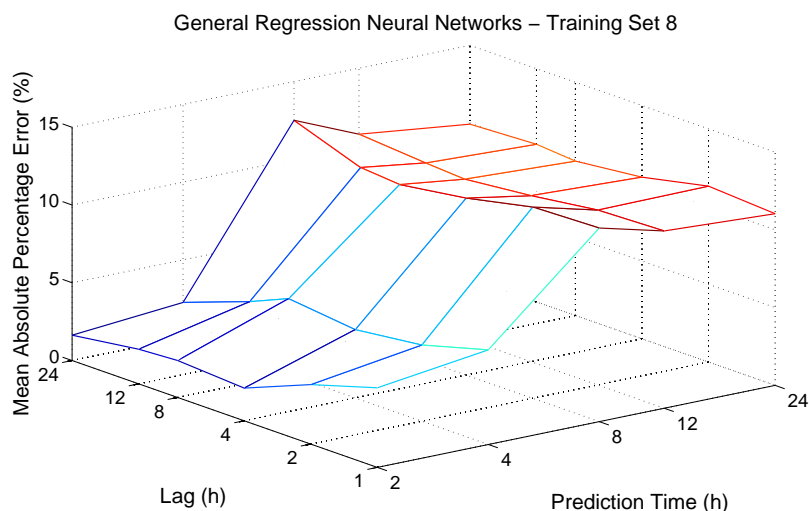
Σχήμα 5.15: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης τεσσάρων εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.16: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων MLP συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης οχτώ εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.17: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GMDH συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης οχτώ εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.



Σχήμα 5.18: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για την περίπτωση των δικτύων GRNN συναρτήσει της περιόδου πρόβλεψης για διαφορετικής διάρκειας χρονικά παράθυρα με δεδομένα εκπαίδευσης οχτώ εβδομάδων για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης καθόδου.

	Περίοδος Πρόβλεψης				
	2 ώρες	4 ώρες	8 ώρες	12 ώρες	24 ώρες
MLP					
1h Lag	1.282	11.093	12.621	11.141	10.819
2h Lag	4.276	6.754	12.308	11.306	10.844
4h Lag	12.597	12.268	14.110	12.396	11.205
8h Lag	12.949	11.846	12.870	11.962	10.732
12h Lag	5.033	8.175	12.786	11.336	10.869
24h Lag	7.332	7.755	12.303	9.854	10.573
GMDH					
1h Lag	2.407	4.399	12.064	10.921	11.565
2h Lag	2.086	4.760	11.764	10.953	11.271
4h Lag	3.108	3.718	11.909	11.684	11.465
8h Lag	2.373	5.263	10.695	10.911	11.712
12h Lag	3.387	7.329	11.956	11.193	11.036
24h Lag	3.184	6.223	12.471	11.085	10.812
GRNN					
1h Lag	5.358	6.539	12.410	11.371	11.053
2h Lag	3.668	5.210	12.187	11.185	11.274
4h Lag	2.244	4.743	11.527	10.774	10.651
8h Lag	2.788	5.479	10.948	10.404	10.097
12h Lag	3.109	5.141	11.343	10.671	10.241
24h Lag	1.688	2.642	12.588	10.792	10.001

Πίνακας 5.5: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (*lags*) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας τεσσάρων εβδομάδων.

5.1.3.5 Συζήτηση επί των αποτελεσμάτων

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω, γίνεται σαφές ότι το δίκτυο GRNN υπερέρχει έναντι των άλλων δύο νευρωνικών δικτύων παρέχοντας τη μεγαλύτερη ακρίβεια. Ειδικότερα, το δίκτυο GRNN εμφανίζει μια ομαλή συμπεριφορά ως προς τις παραμέτρους που μελετήθηκαν, γεγονός που είναι επιθυμητό για τη λειτουργία του ευφυούς πράκτορα. Όσον αφορά το χρονικό παράθυρο που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου, γίνεται εμφανές ότι η χρήση ενός χρονικού παραθύρου 24 ωρών επιφέρει σημαντική βελτίωση στην ακρίβεια της πρόβλεψης του δικτύου GRNN. Αντίστοιχη συνεισφορά, αλλά σε μικρότερο βαθμό, έχει σε αρκετές περιπτώσεις και για τα δύο άλλα είδη νευρωνικών δικτύων. Τέλος, ως προς τη διάρκεια της πρόβλεψης, εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένας μικρός χρονικός ορίζοντας μπορεί να προβλεφθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια, όπως είναι αναμενόμενο. Συμπερασματικά, με βάση τα αποτελέσματα αυτά, η χρήση του παραθύρου των 24 ωρών σε συνδυασμό με μιας μικρής χρονικής διάρκειας εκτίμηση της κίνησης δίδει τη δυνατότητα στη διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης να ενισχύσει περαιτέρω τη λειτουργικότητα του ευφυούς πράκτορα ως προς τη διαχείριση των βραχυπρόθεσμων μεταβολών της ζήτησης των συνδρομητών του Σταθμού Βάσης.

	Περίοδος Πρόβλεψης				
	2 ώρες	4 ώρες	8 ώρες	12 ώρες	24 ώρες
MLP					
1h Lag	6.028	10.631	12.416	11.397	11.026
2h Lag	6.968	8.164	12.475	11.539	10.989
4h Lag	4.200	8.863	13.100	11.456	10.836
8h Lag	4.640	8.991	11.567	11.477	10.637
12h Lag	7.343	6.878	11.643	11.218	10.407
24h Lag	3.517	5.312	11.892	10.643	10.165
GMDH					
1h Lag	3.638	3.432	12.200	11.276	11.452
2h Lag	1.273	4.835	12.213	11.295	11.115
4h Lag	3.422	4.323	12.055	11.207	11.732
8h Lag	3.164	4.756	12.260	11.169	11.590
12h Lag	2.965	3.937	12.726	10.710	11.047
24h Lag	3.749	4.181	13.038	11.650	11.199
GRNN					
1h Lag	5.113	6.082	12.452	11.399	11.042
2h Lag	3.823	4.895	12.304	11.251	11.315
4h Lag	2.101	4.386	11.381	10.675	10.392
8h Lag	2.375	4.882	10.753	10.237	9.927
12h Lag	2.223	3.812	10.968	10.406	10.135
24h Lag	1.630	2.266	12.510	10.753	9.931

Πίνακας 5.6: Μέσο απόλυτο ποσοστιαίο σφάλμα για τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για διαφορετικά χρονικά παράθυρα (*lags*) και για σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης διάρκειας οχτώ εβδομάδων.

5.2 Διαδικασία Αντιμετώπισης Εκτάκτων Καταστάσεων

Μια επιπλέον λειτουργία του ευφυούς πράκτορα αποτελεί ο εντοπισμός προβλημάτων που σχετίζονται με τη μη αναμενόμενη λειτουργία του Σταθμού Βάσης. Τέτοια προβλήματα αφορούν το οπισθοζευκτικό δίκτυο και έχουν ως αποτέλεσμα την παροχή υποβαθμισμένης ποιότητας υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του παρόχου κινητών επικοινωνιών. Ειδικότερα, στην περίπτωση διακοπής της επικοινωνίας του Σταθμού Βάσης με το δίκτυο κορμού, λόγω κάποιου μη αναμενόμενου προβλήματος, όπως για παράδειγμα δυσλειτουργία του οπισθοζευκτικού δικτύου, ο ευφυής πράκτορας εντοπίζει το πρόβλημα και υλοποιεί τους κατάλληλους μηχανισμούς για την αδιάλειπτη παροχή ποιότητας υπηρεσίας. Τέτοιοι μηχανισμοί μπορεί να περιλαμβάνουν εναλλακτικές οδούς προς το δίκτυο κορμού (πχ. μικροκυματική επικοινωνία) ή την έναρξη της διαδικασίας διαπομπής σε γειτονικό Σταθμό Βάσης προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες των συνδρομητών.

Πέραν των έκτακτων και μη αναμενόμενων καταστάσεων, ο ευφυής πράκτορας πρέπει να διαχειρίζεται και τις προγραμματισμένες διακοπές συντήρησης στο δίκτυο του

πάροχου του οπτικού δικτύου. Η αντιμετώπιση τέτοιων προγραμματισμένων γεγονότων μπορεί να γίνει με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω για τα έκτακτα συμβάντα, και περιλαμβάνει την έναρξη της διαδικασίας διαπομπής και εναλλακτικές οδεύσεις προς το δίκτυο κορμού. Ειδικότερα, για την περίπτωση των προγραμματισμένων γεγονότων, ο πάροχος κινητών επικοινωνιών μπορεί εκ των προτέρων να δεσμεύει περισσότερους πόρους στους γειτονικούς Σταθμούς Βάσης, προκειμένου να διασφαλίζεται η ικανοποίηση των απαιτήσεων των συνδρομητών του μέσα από τη διαπομπή τους σε αυτούς.

Εκτός από τις έκτακτες και τις προγραμματισμένες διακοπές της λειτουργίας που περιγράφηκαν παραπάνω, υπάρχει και η περίπτωση το οπισθοζευκτικό δίκτυο να αδυνατεί να εξυπηρετήσει τους αιτούμενους πόρους, όπως για παράδειγμα εξαιτίας υπερφόρτωσης αυτού. Στην περίπτωση αυτή ενημερώνεται ο ευφυής πράκτορας ο οποίος μπορεί να αιτηθεί νέους μειωμένους πόρους για την ικανοποίηση ενός ποσοστού των συνδρομητών του Σταθμού Βάσης, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό πρέπει να εξυπηρετηθεί από γειτονικούς Σταθμούς Βάσης μέσω της διαδικασίας της διαπομπής.

Τέλος, υπενθυμίζεται ότι ως προς τη διαθεσιμότητα του οπισθοζευκτικού δικτύου, ο στόχος που έχει θέσει η NGMN Alliance αφορά ένα ποσοστό 99.99%. Ουσιαστικά, αυτό σημαίνει ότι το 99.99% του χρόνου δεν πρέπει να ανακύπτουν διακοπές στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, οι οποίες θα οδηγήσουν σε διακοπή της σύνδεσης των κινητών συνδρομητών¹.

5.3 Αίτηση Πόρων Οπισθοζευκτικού Δικτύου

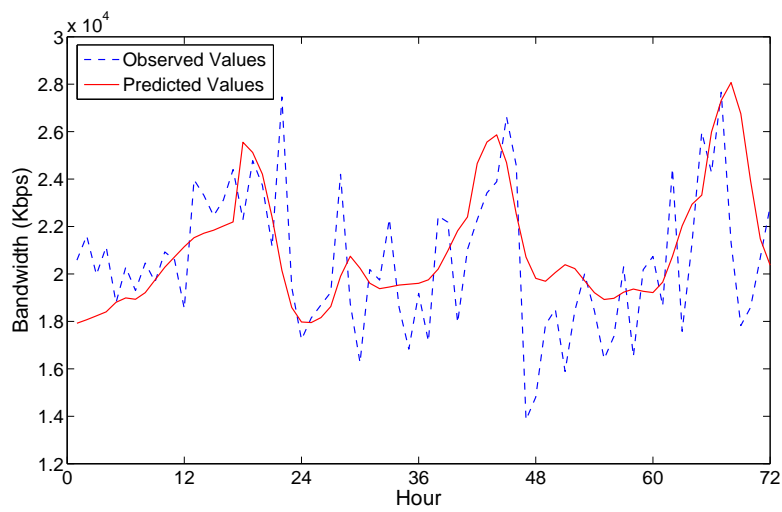
Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η επίδοση τριών διαφορετικών νευρωνικών δικτύων στην πρόβλεψη της επερχόμενης ζήτησης ενός Σταθμού Βάσης και με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν, αποδείχτηκε η υπεροχή των δικτύων GRNN για την υλοποίηση του ευφυούς πράκτορα. Ο ευφυής πράκτορας πρέπει, έπειτα από την πρόβλεψη της ζήτησης, να επεξεργαστεί τα αποτελέσματα αυτά και να αιτηθεί τη δέσμευση των κατάλληλων πόρων από το οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο. Σημειώνεται ότι ρυθμοί μετάδοσης οι οποίοι αιτούνται από το οπτικό δίκτυο πρέπει να είναι σύμφωνοι με τις προδιαγραφές που έχει θέσει η NGMN Alliance.

Η αίτηση της δέσμευσης των κατάλληλων πόρων με βάση τα αποτελέσματα της πρόβλεψης, και συνεπώς, η δημιουργία ενός κατάλληλου συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας, είναι μια διαδικασία η οποία εξαρτάται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών, και επομένως δεν υπάρχει ένας μοναδικός τρόπος διεκπεραίωσής της. Για το λόγο αυτό, παρατίθεται στη συνέχεια μια απλή υλοποίηση της διαδικασίας αυτής.

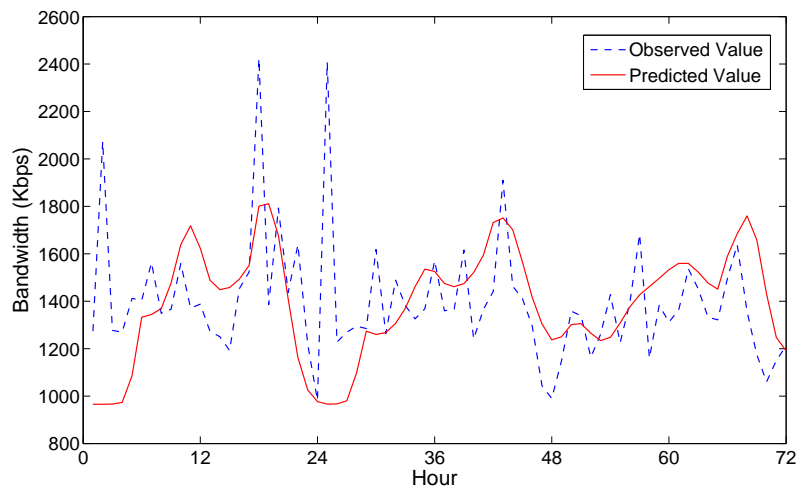
Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το σύστημα πρόβλεψης που βασίζεται σε ένα νευρωνικό δίκτυο GRNN και εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από 2392 δεδομένα που ανήκουν στο ΣΒ1, και σκοπός του είναι να προβλέψει τη ζήτηση για μια περίοδο τριών ημερών ($T = 72$ ώρες) σε δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την επικύρωση του μοντέλου. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας της πρόβλεψης παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.19-5.20 για τις περιπτώσεις των ζεύξεων καθόδου και ανόδου, αντίστοιχα.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, ο ευφυής πράκτορας υπολογίζει τους κατάλληλους ρυθμούς πληροφορίας προκειμένου να αιτηθεί τη δέσμευσή τους από τον πάροχο του οπτικού δικτύου. Αδιαμφισβήτητα, προκειμένου ο ευφυής πράκτορας να εγγυηθεί την

¹Σημειώνεται ότι το ποσοστό αυτό αφορά μόνο το οπισθοζευκτικό δίκτυο και δεν περιλαμβάνει προβλήματα που μπορεί να ανακύψουν στο Σταθμό Βάσης ή στην ασύρματη ζεύξη.



Σχήμα 5.19: Πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης καθόδου για χρονική διάρκεια 72 ωρών.



Σχήμα 5.20: Πρόβλεψη της κίνησης της ζεύξης ανόδου για χρονική διάρκεια 72 ωρών.

παροχή ποιότητας υπηρεσίας προς τους κινητούς συνδρομητές, πρέπει να αιτηθεί ένα μεγαλύτερο ποσοστό των πόρων που προκύπτουν από τη διαδικασία της πρόβλεψης.

Επομένως, γίνεται η υπόθεση ότι με I^F , \mathbf{I}^A , \mathbf{I}^{NA} συμβολίζονται ο σταθερός ρυθμός πληροφορίας (fixed IR), ο διασφαλισμένος ρυθμός (assured IR) και ο μη διασφαλισμένος ρυθμός (non-assured IR) που αιτούνται από τον ευφυή πράκτορα, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ο σταθερός ρυθμός πληροφορίας έχει τιμή που δεν μεταβάλλεται με το χρόνο για ολόκληρη την περίοδο αναφοράς \mathcal{T} , ενώ οι υπόλοιποι ρυθμοί είναι διανυσματικές μεταβλητές με στοιχεία τον ωριαίο ρυθμό πληροφορίας που αντιστοιχεί στην περίοδο αναφοράς. Η δέσμευση κάθε ρυθμού πληροφορίας χαρακτηρίζεται από ένα διαφορετικό κόστος μίσθωσης, το οποίο είναι μεγαλύτερο για το σταθερό ρυθμό πληροφορίας, ενώ ο μη διασφαλισμένος ρυθμός έχει το μικρότερο κόστος. Αν με C_F , C_A και C_{NA} συμβολίζονται τα αντίστοιχα κόστη των ρυθμών πληροφορίας, τότε ισχύει ότι $C_F > C_A > C_{NA}$.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ρυθμοί πληροφορίας I^F , \mathbf{I}^A και \mathbf{I}^{NA} εξαρτώνται από τα αποτελέσματα του συστήματος πρόβλεψης. Συγκεκριμένα, στην απλή υλοποίηση η οποία προτείνεται στην παρούσα παράγραφο, οι ρυθμοί αυτοί αποτελούν απλά ποσοστά των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διαδικασία της πρόβλεψης. Για το σκοπό αυτό, γίνεται η υπόθεση κατάλληλων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας δ_1 , δ_2 και δ_3 , οι οποίοι καθορίζουν τις τιμές κατωφλίου των απαραίτητων πόρων ως ποσοστά των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης, προκειμένου να διασφαλίζεται η ικανοποίηση των αναγκών των συνδρομητών του Σταθμού Βάσης.

Σκοπός, λοιπόν, του ευφυούς πράκτορα είναι ο υπολογισμός των κατάλληλων ρυθμών πληροφορίας προκειμένου ο Σταθμός Βάσης να παρέχει εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του με έναν οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Επομένως, το πρόβλημα υπολογισμού των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου, ανάγεται σε ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού, με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών:

$$\underset{I^F, \mathbf{I}^A, \mathbf{I}^{NA}}{\text{minimize}} \quad I^F C_F + \sum_{i \in \mathcal{T}} I_i^A C_A + \sum_{i \in \mathcal{T}} I_i^{NA} C_{NA}$$

subject to

$$(II.1) \quad I^F \geq \delta_1 \min y$$

$$(II.2) \quad I^F + I_j^A \geq \delta_2 y_j, \quad j \in \mathcal{T}$$

$$(II.3) \quad I^F + I_j^A + I_j^{NA} \geq \delta_3 y_j, \quad j \in \mathcal{T}$$

$$(II.4) \quad I^F, \mathbf{I}^A, \mathbf{I}^{NA} > 0$$

όπου με y_i , $i \in \mathcal{T}$, συμβολίζεται το αποτέλεσμα της διαδικασίας της πρόβλεψης. Ο περιορισμός (II.1) υποδηλώνει ότι ο σταθερός ρυθμός πληροφορίας είναι τουλάχιστον ίσος με ένα ποσοστό δ_1 της ελάχιστης ζήτησης που προβλέπεται να εξυπηρετήσει ο Σταθμός Βάσης, ενώ ο περιορισμός (II.2) υποδηλώνει ότι το άθροισμα του σταθερού και του διασφαλισμένου ρυθμού πληροφορίας, που αντιστοιχεί στον εγγυημένο ρυθμό πληροφορίας, πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με ένα ποσοστό δ_2 της πρόβλεψης της ζήτησης. Όμοια, ο περιορισμός (II.3) εκφράζει ότι το άθροισμα των τριών ρυθμών πληροφορίας, το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό πληροφορίας MIR, πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσο με ένα ποσοστό δ_3 της τιμής πρόβλεψης. Τέλος, ο περιορισμός (II.4) διασφαλίζει ότι οι ρυθμοί πληροφορίας λαμβάνουν μη αρνητικές τιμές.

Το πρόβλημα αυτό αποτελεί ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο μπορεί εύκολα να επιλυθεί χρησιμοποιώντας παραδοσιακές μεθόδους γραμμικού προγραμματι-

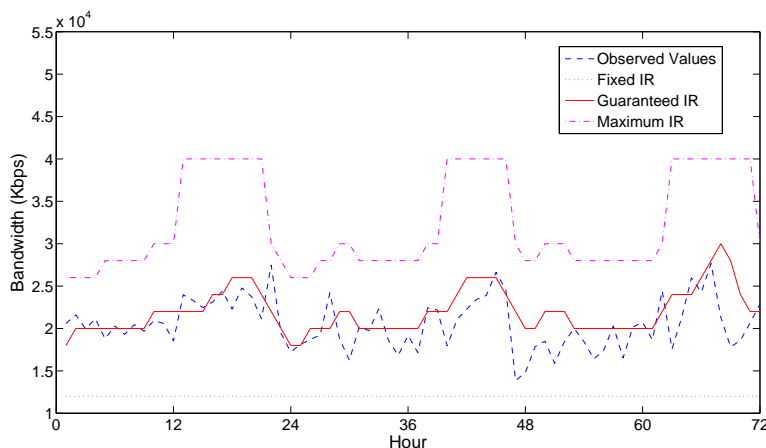
σμού, όπως για παράδειγμα τη μέθοδο Simplex.

Ένας σημαντικός παράγοντας του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η επιλογή των παραμέτρων ποιότητας. Αν η τιμή των παραμέτρων αυτών είναι μεγάλη, τότε ο ευφυής πράκτορας οδηγείται στην υπερδιαστασιολόγηση των πόρων, διασφαλίζοντας την παροχή ποιότητας υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του Σταθμού Βάσης, αλλά με ένα υψηλό οικονομικό κόστος. Επομένως, υπάρχει μια σχέση ανταλλαγής μεταξύ της παροχής ποιότητας υπηρεσίας και της δέσμευσης των πόρων με οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχει μια μοναδική βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων ποιότητας, και πρέπει για κάθε Σταθμό Βάσης να προσδιορίζονται οι κατάλληλες τιμές των δ_1 , δ_2 και δ_3 με βάση τις απαιτήσεις του. Για παράδειγμα, ένας Σταθμός Βάσης που βρίσκεται σε μητροπολιτική περιοχή καλείται να εξυπηρετήσει ένα μεγάλο αριθμό συνδρομητών με υψηλές απαιτήσεις, και επομένως κρίνεται αναγκαία η υπερδιαστασιολόγηση των πόρων, ως ένα βαθμό, προκειμένου να μπορεί να εγγυηθεί την παροχή ποιότητας υπηρεσίας.

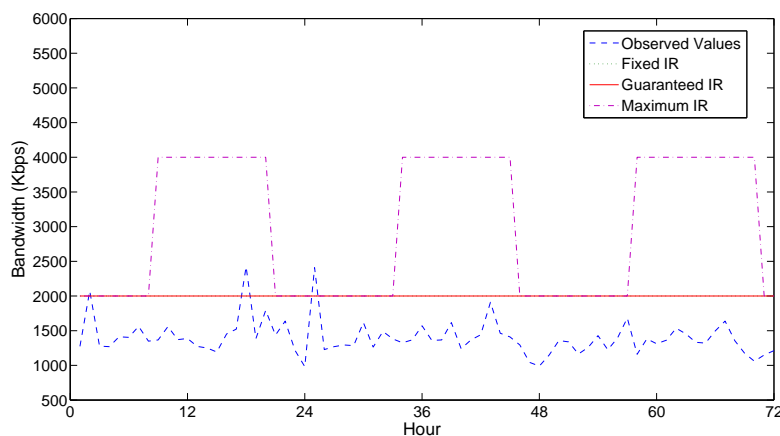
Στα Σχήματα 5.21-5.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου για τις τιμές των παραμέτρων $\delta_1 = 0.6$, $\delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 1.4$, και για κόστος μίσθωσης $C_F = 80$, $C_A = 70$ και $C_{NA} = 50$ για τις περιπτώσεις των ζεύξεων ανόδου και καθόδου, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία προκειμένου να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές της NGMN Alliance [56].

Ειδικότερα, στο Σχήμα 5.21, γίνεται εμφανές ότι ο Σταθμός Βάσης μπορεί να ικανοποιήσει την αιτούμενη ζήτηση της ζεύξης καθόδου παρέχοντας έναν αποδοτικό και οικονομικό τρόπο διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.22, φαίνεται ότι εξαιτίας της μικρής αιθροιστικής ζήτησης, ο σταθερός και ο διασφαλισμένος ρυθμός πληροφορίας συμπίπτουν, με αποτέλεσμα ο ευφυής πράκτορας να αιτείται δύο ρυθμούς πληροφορίας για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Γίνεται κατανοητό ότι λόγω της αίτησης των πόρων σε διακριτά βήματα και της χαμηλής κίνησης που μεταφέρεται στη ζεύξη ανόδου, η διαχείριση της ζήτησης στην περίπτωση αυτή μπορεί να ικανοποιηθεί από δύο ρυθμούς πληροφορίας για το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου.



Σχήμα 5.21: Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου.

Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, προκύπτει ότι η πρόβλεψη της επερχόμενης ζήτησης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη χρησιμοποίηση των πόρων του οπισθοζευκτικού



Σχήμα 5.22: Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου.

δικτύου. Αντίθετα, μια παραδοσιακή μέθοδος εκχώρησης που βασίζεται σε στατική δέσμευση των απαραίτητων πόρων που ικανοποιούν ένα δυσμενές σενάριο, θα απαιτούσε την εκχώρηση 378 Mbps για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου και 52.2 Mbps για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου. Γίνεται εμφανές, λοιπόν, ότι η στατική δέσμευση των πόρων είναι σε μεγάλο βαθμό μη αποδοτική και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών νέας γενιάς που χαρακτηρίζονται από τη δυναμική μεταβολή των απαιτήσεων των συνδρομητών.

5.4 Αξιολόγηση Ευφυούς Πράκτορα

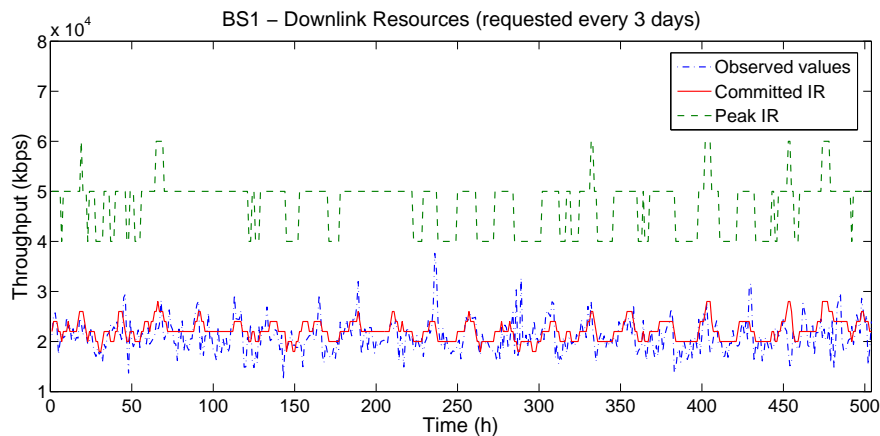
Στην ανάλυση που παρουσιάστηκε παραπάνω μελετήθηκε η λειτουργία του ευφυούς πράκτορα, δίδοντας κυρίως έμφαση σε θέματα που άπτονται της επίδοσής του και σχετίζονται με την πρόβλεψη των απαραίτητων πόρων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση αυτή αξιοποιούνται στη συγκεκριμένη παράγραφο προκειμένου να αξιολογηθεί η λειτουργία του ευφυούς πράκτορα και να γίνει η σύγκριση του προτεινόμενου συστήματος δυναμικής διαχείρισης των πόρων με τις παραδοσιακές μεθόδους στατικής εκχώρησης, και συγκεκριμένα με ένα μετριοπαθές και με ένα δυσμενές σενάριο εκχώρησης πόρων.

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν σχετικά με τη λειτουργία του ευφυούς πράκτορα, γίνεται εμφανής η καταλληλότητα χρησιμοποίησης των δικτύων GRNN για τη διαδικασία της πρόβλεψης. Συνεπώς, για την αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος χρησιμοποιείται ένα δίκτυο GRNN για την εκπαίδευση του μοντέλου και την πρόβλεψη της επερχόμενης ζήτησης, ενώ για την εξαγωγή των απαραίτητων πόρων από τα αποτελέσματα της πρόβλεψης χρησιμοποιούνται οι κατάλληλες παράμετροι ποιότητας, όπως περιγράφηκαν στην παράγραφο 5.3. Συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε, ο σκοπός των παραμέτρων αυτών είναι η υπερδιαστασιολόγηση των πόρων του δικτύου για την παροχή εγγυημένης ποιότητας υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του παρόχου κινητών επικοινωνιών.

Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος και τη σύγκριση της επίδοσής του με τα εναλλακτικά σενάρια εκχώρησης των πόρων γίνεται ξεχωριστή μελέτη για τις περιπτώσεις των ζεύξεων ανόδου και καθόδου του Σταθμού Βάσης. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν 2560 μέσες ωριαίες μετρήσεις οι οποίες διαχωρίστηκαν σε δεδομένα εκπαίδευσης (2056 μετρήσεις) και δεδομένα πρόβλεψης (504 μετρήσεις). Σημειώνεται

ότι η συνολική περίοδος πρόβλεψης για την οποία εξετάζεται η επίδοση των διαφορετικών τρόπων εκχώρησης αφορά διάστημα τριών εβδομάδων (21 ημερών). Προκειμένου να διερευνηθεί η κατάλληλη περίοδος πρόβλεψης εξετάστηκαν δύο διαφορετικά σενάρια. Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, η εκχώρηση των πόρων γίνεται σε εβδομαδιαίες περιόδους, ενώ το δεύτερο σενάριο υποθέτει περιόδους εκχώρησης διάρκειας τριών ημερών. Στο τέλος κάθε περιόδου εκχώρησης, η πραγματική ζήτηση η οποία παρατηρήθηκε στο διάστημα αυτό χρησιμοποιείται μαζί με τα υπόλοιπα ιστορικά δεδομένα για την επανεκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και την πρόβλεψη της ζήτησης της ακόλουθης περιόδου.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα σενάρια με τα οποία συγκρίνεται το προτεινόμενο σύστημα αφορούν δύο παραδοσιακές μεθόδους στατικής εκχώρησης πόρων. Συγκεκριμένα, το δυσμενές σενάριο περιλαμβάνει τη σταθερή δέσμευση του συνόλου των πόρων που ικανοποιούν τη μέγιστη δυνατή ζήτηση, η οποία απαιτεί την εκχώρηση 400 Mbps στη ζεύξη καθόδου και 60 Mbps στη ζεύξη ανόδου². Αντίστοιχα, το μετριοπαθές σενάριο αφορά τη στατική δέσμευση ρυθμού 80 Mbps στη ζεύξη καθόδου και 20 Mbps στη ζεύξη ανόδου³, οι οποίοι θεωρούνται ικανοί για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο του παρόχου με βάση τη καταγραφείσα ζήτηση.

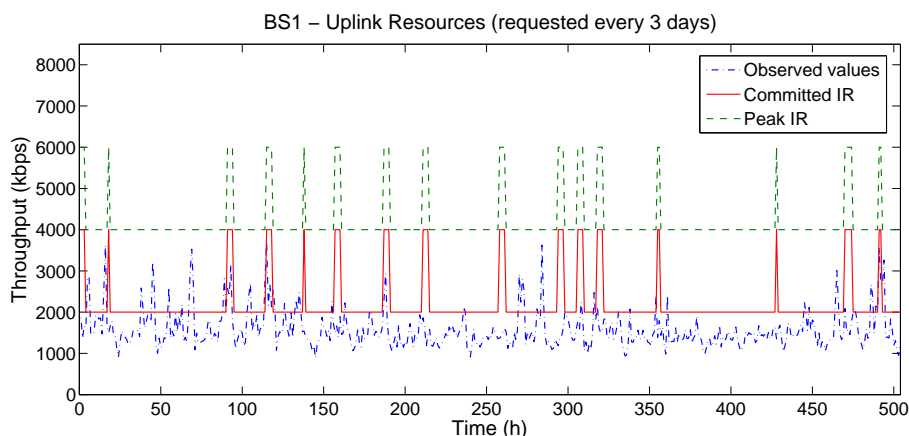


Σχήμα 5.23: Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης τριών ημερών και τιμές $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$.

Στα Σχήματα 5.23-5.26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εκχώρησης του προτεινόμενου ευφυούς πράκτορα για τον ένα Σταθμό Βάσης και για τιμές των παραμέτρων ποιότητας $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$. Ειδικότερα, για την εκχώρηση του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης (PIR) επιλέχτηκε μια υψηλή τιμή της παραμέτρου ποιότητας δ_3 , προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ο πάροχος κινητών επικοινωνιών μπορεί να ικανοποιήσει μια στιγμιαία εκρηκτική ζήτηση στο δίκτυο του. Υπενθυμίζεται ότι οι πόροι που αιτούνται πέραν του εκχωρημένου ρυθμού μετάδοσης αφορούν το μη διασφαλισμένο

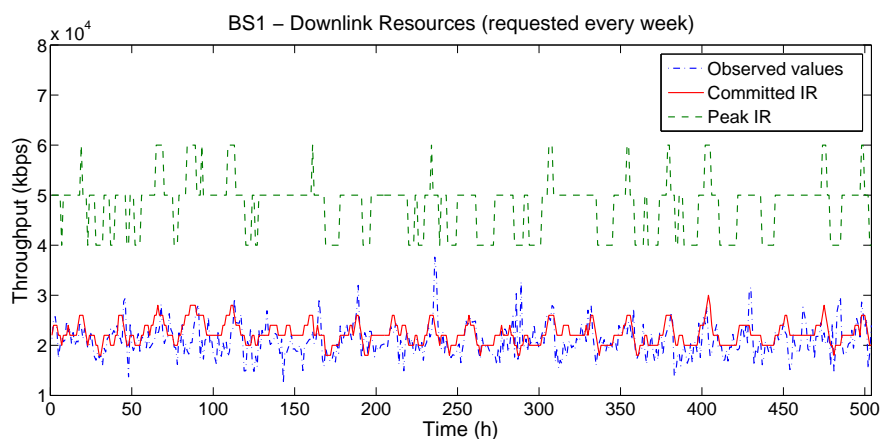
²Υπενθυμίζεται ότι ο Σταθμός Βάσης εξυπηρετεί μια περιοχή 9 τομέων υποστηρίζοντας ρυθμό 42 Mbps και 5.8 Mbps ανά τομέα στις ζεύξεις ανόδου και καθόδου, αντίστοιχα. Συνεπώς, ο Σταθμός Βάσης μπορεί να υποστηρίξει έως 378 Mbps στη ζεύξη καθόδου και έως 52.2 Mbps στη ζεύξη ανόδου. Λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές της NGMN Alliance για τα βήματα εκχώρησης στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, προκύπτουν οι απαιτήσεις για δέσμευση ρυθμών 400 Mbps και 60 Mbps για τις αντίστοιχες ζεύξεις.

³Οι τιμές αυτές αφορούν ρυθμούς δεδομένων διπλάσιους της μέγιστης τιμής της μέσης καταγραφείσας ζήτησης και θεωρούνται επαρκείς για την ικανοποίηση της εκρηκτικότητας της ζήτησης και της παροχής ποιότητας υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του παρόχου.



Σχήμα 5.24: Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης τριών ημερών και τιμές $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$.

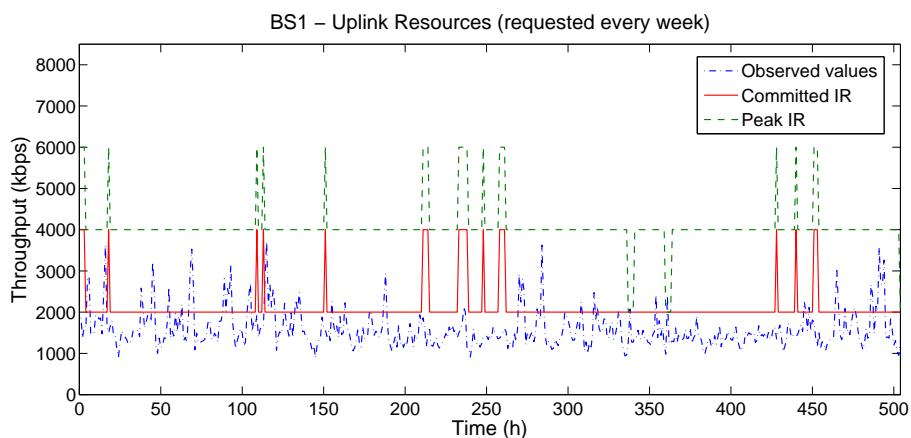
ρυθμό μετάδοσης που προσφέρεται από το οπτικό δίκτυο, ο οποίος παρέχεται εφόσον ζητηθεί από το Σταθμό Βάσης και μπορεί να διατεθεί από το οπτικό δίκτυο.



Σχήμα 5.25: Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης μιας εβδομάδας και τιμές $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της εκχώρησης που απεικονίζονται στα Σχήματα 5.23-5.26 προκύπτει το συμπέρασμα ότι η δυναμική διαχείριση των πόρων, η οποία βασίζεται στα αιτήματα του ευφυούς πράκτορα, βελτιώνει τη χρησιμοποίηση του οπτικοζευκτικού δικτύου, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την ικανοποίηση των συνδρομητών του παρόχου κινητών επικοινωνιών. Ειδικότερα, για την περίπτωση της ζεύξης καθόδου παρατηρείται μια μέση βελτίωση της τάξης του 88% σε σύγκριση με το δυσμενές σενάριο και της τάξης του 40% σε σύγκριση με το μετριοπαθές σενάριο και για τις δύο περιπτώσεις περιόδων δέσμευσης, ήτοι της δέσμευσης πόρων ανά εβδομάδα και της δέσμευσης πόρων ανά τρεις ημέρες⁴. Αντίστοιχα, για τη ζεύξη ανόδου η μέση βελτίωση που παρατηρείται σε σύγκριση με το δυσμενές σενάριο είναι της τάξης του 93%, ενώ για το μετριοπαθές σενάριο είναι της τάξης του 79% και για τις δύο δυνατές περιόδους εκχώρησης που μελετώνται. Σημειώνεται ότι παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για το δεύτερο Σταθμό Βάσης.

⁴Σημειώνεται, ότι η σύγκριση με το προτεινόμενο σχήμα έγινε με βάση το μέγιστο ρυθμό που αιτείται ο ευφυής πράκτορας.



Σχήμα 5.26: Αιτούμενοι ρυθμοί πληροφορίας για την περίπτωση της ζεύξης ανόδου του ΣΒ1 με διάρκεια αίτησης μια εβδομάδας και τιμές $\delta_1 = 0.5$, $\delta_2 = 1$ και $\delta_3 = 2$.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπεραίνεται ότι η εβδομαδιαία διάρκεια εκχώρησης των πόρων δεν παρουσιάζει διαφορά στην επίδοση του προτεινόμενου συστήματος σε σύγκριση με την εκχώρηση πόρων διάρκειας τριών ημερών, παρόλο που ένας μικρότερος χρονικός ορίζοντας πρόβλεψης δίδει ακριβέστερα αποτελέσματα ως προς τη ζήτηση. Η ομοιότητα της επίδοσης των διαφορετικών περιόδων εκχώρησης οφείλεται στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την ικανοποίηση των προδιαγραφών που θέτει η NMGN Alliance για την αίτηση των πόρων σε διακριτά βήματα εκχώρησης, η οποία αμβλύνει τις μικρές διαφορές που προκύπτουν κατά τη διαδικασία της πρόβλεψης, καθιστώντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, μια εβδομαδιαία περίοδο δέσμευσης πόρων ικανή να επιφέρει σημαντική βελτίωση στη χρησιμοποίηση του οπισθοζευκτικού δικτύου με μικρό υπολογιστικό κόστος.

Κεφάλαιο 6

Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση Προβλήματος Διαχείρισης Πόρων

Το κεφάλαιο αυτό ξεφεύγει από το πλαίσιο μελέτης των λειτουργιών του ευφυούς πράκτορα και εξετάζει την παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης των πόρων. Αρχικά, περιγράφεται το εν λόγω πρόβλημα στην πλευρά του Σταθμού Βάσης όπου ο πάροχος κινητών επικοινωνιών καλείται να ικανοποιήσει τις ανάγκες των συνδρομητών του, ενώ στη συνέχεια, εξετάζεται η περίπτωση κατά την οποία δύο πάροχοι κινητών επικοινωνιών μοιράζονται την ίδια οπτική οπισθοζευκτική υποδομή και ανταγωνίζονται για τους πόρους του οπτικού δικτύου προκειμένου να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες των συνδρομητών τους. Καθένα από τα προβλήματα αυτά μοντελοποιείται με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων και μελετάται η ευστάθεια του δυναμικού συστήματος υπό τη δυναμική των αντιγραφών, ενώ εξετάζεται, επίσης, η επίδραση που έχει η καθυστέρηση στη γνώση των παικτών.

6.1 Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση στην Πλευρά του Σταθμού Βάσης

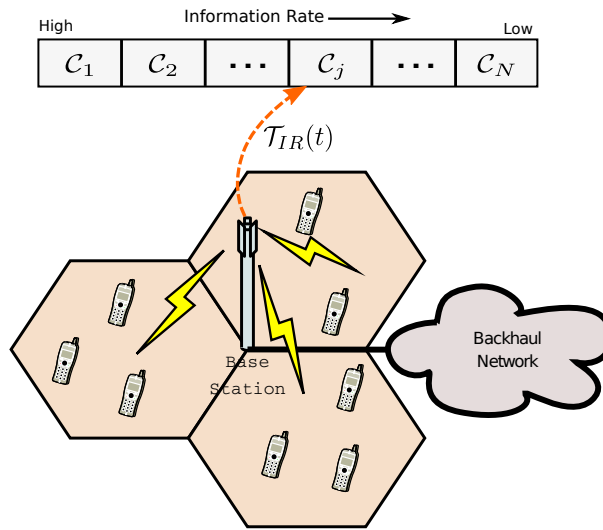
Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφηκε η υλοποίηση ενός ευφυούς πράκτορα για τη δυναμική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Αντίθετα, στη συγκεκριμένη παράγραφο, παρουσιάζεται η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος αυτού στην πλευρά του Σταθμού Βάσης. Συγκεκριμένα, αν υπερεκτιμηθούν οι ανάγκες των συνδρομητών του Σταθμού Βάσης και γίνει υπερδιαστασιολόγηση των πόρων, τα κέρδη του παρόχου κινητών επικοινωνιών θα μειωθούν. Από την άλλη πλευρά, αν οι ανάγκες των συνδρομητών υποεκτιμηθούν και δεσμευτούν λιγότεροι πόροι από όσους είναι αναγκαίοι, τότε παρέχεται στους συνδρομητές μια υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας που οδηγεί στη μη ικανοποίησή των αναγκών τους. Στο πλαίσιο αυτό, μελετάται η δυναμική συμπεριφορά των συνδρομητών και του Σταθμού Βάσης για την εκχώρηση των κατάλληλων πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η εξελικτική θεωρία παιγνίων προκειμένου να αποτυπώσει τη δυναμική συμπεριφορά των εταίρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, ενώ παράλληλα μελετάται η ευστάθεια του προτεινόμενου μοντέλου με χρήση της δυναμικής των αντιγραφών. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την εξελικτική θεωρία παιγνίων, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα Γ'.

6.1.1 Διατύπωση του Προβλήματος

Έστω ένας Σταθμός Βάσης και ένα σύνολο συνδρομητών \mathcal{M} που καλείται να εξυπηρετήσει, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Αν κάθε συνδρομητής τη χρονική στιγμή t αιτείται ένα ρυθμό πληροφορίας $d_i(t)$, τότε η αθροιστική ζήτηση όλων των συνδρομητών τη χρονική στιγμή t δίδεται από τον τύπο

$$\mathcal{T}_{IR}(t) = \sum_{i \in \mathcal{M}} d_i(t) \quad (6.1)$$

Συνεπώς, ο σκοπός του Σταθμού Βάσης είναι να δεσμεύσει ορθά τον απαραίτητο ρυθμό πληροφορίας $\mathcal{T}_{IR}(t)$ από το οπισθοζευκτικό δίκτυο, προκειμένου να ικανοποιήσει τη ζήτηση των συνδρομητών του τη χρονική στιγμή t .



Σχήμα 6.1: Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος εκχώρησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου.

Προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα, γίνεται η υπόθεση ότι ο διαθέσιμος ρυθμός πληροφορίας διαχωρίζεται σε N κλάσεις \mathcal{C}_i , $i \in [1, \dots, N]$, διατεταγμένες σε φθίνουσα σειρά ως προς τον παρεχόμενο ρυθμό πληροφορίας, έτσι ώστε η κλάση \mathcal{C}_1 να υποδηλώνει το μέγιστο δυνατό ρυθμό πληροφορίας που μπορεί να δεσμευτεί/αιτηθεί, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 6.1. Αν ο Σταθμός Βάσης δεσμεύσει την κλάση \mathcal{C}_i ¹ και η ζήτηση των συνδρομητών ανήκει στην κλάση \mathcal{C}_j , δηλαδή $\mathcal{T}_{IR}(t) \in \mathcal{C}_j$, τότε διακρίνονται δύο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις:

- Αν $i \leq j$, δηλαδή η δεσμευμένη κλάση \mathcal{C}_i είναι μεγαλύτερη από την κλάση \mathcal{C}_j που ζητείται από τους συνδρομητές, τότε ο Σταθμός Βάσης μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες των συνδρομητών του. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι οι συνδρομητές λαμβάνουν ένα όφελος $\mathcal{S}_u^{(j)}$ που είναι μια μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση του ρυθμού πληροφορίας, ενώ ο Σταθμός Βάσης λαμβάνει όφελος $\mathcal{U}_{BS}^{(i,j)}$ που δίδεται από τον τύπο

$$\mathcal{U}_{BS}^{(i,j)} = U_{BS}^{(i)} - C_{BS}^{(j-i)} \quad (6.2)$$

όπου $U_{BS}^{(i)}$ είναι μια μονοτονικά αύξουσα συνάρτηση ως προς το ρυθμό πληροφορίας, σύμφωνα με την οποία ο Σταθμός Βάσης λαμβάνει υψηλότερο όφελος

¹Αναφέρεται στον εκχωρημένο ρυθμό πληροφορίας, όπως καθορίζεται στα [28], [32] και [56].

όταν έχει δεσμεύσει περισσότερους πόρους από το οπισθοζευκτικό δίκτυο γεγονός που οφείλεται εν μέρει στην ικανοποίηση των αναγκών των συνδρομητών του, καθώς επίσης και στα αντίστοιχα έσοδα που προκύπτουν από τη χρήση των παρεχόμενων υπηρεσιών που προσφέρει. Ο δεύτερος όρος της σχέσης αποτελεί μια συνάρτηση ποινής που μειώνει το όφελος του Σταθμού Βάσης λόγω των περιττών πόρων που δεσμεύτηκαν και εξαρτάται από το συμφωνητικό επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου του οπτικού δικτύου. Ειδικότερα, για $i \neq j$, η συνάρτηση $U_{BS}^{(i,j)}$ αναπαριστά το καθαρό όφελος στην περίπτωση της υπερδιαστασιολόγησης των πόρων, όπου ο Σταθμός Βάσης δεσμεύει μια μεγαλύτερη κλάση σε σχέση με την υπάρχουσα ζήτηση, με το αντίστοιχο κόστος $C_{BS}^{(j-i)}$. Τέλος, σημειώνεται ότι για $i = j$, ισχύει ότι $C_{BS}^{(j-i)} = 0$.

- Αν $i > j$, δηλαδή η δεσμευμένη κλάση C_i είναι μικρότερη σε σύγκριση με την κλάση C_j που ζητείται από τους συνδρομητές, τότε ο Σταθμός Βάσης έχει δεσμεύσει λιγότερους πόρους από όσους απαιτούνται για την ικανοποίηση των αναγκών των συνδρομητών του, και αναμένεται ότι μόνο ένα ποσοστό αυτών μπορούν να ικανοποιηθούν. Επομένως, το όφελος των συνδρομητών όταν δεν είναι πλήρως ικανοποιημένοι εξαρτάται από το όφελος $S_u^{(j)}$ της αιτούμενης κλάσης, καθώς και από τη διαφορά μεταξύ της δεσμευμένης κλάσης και της κλάσης που αντιστοιχεί στην πραγματική ζήτηση από αυτούς. Το όφελος αυτό δίδεται από τον τύπο

$$S_d^{(i,j)} = S_u^{(j)} \cdot \left(1 - \frac{i-j}{N}\right) \quad (6.3)$$

Κατά τον ίδιο τρόπο, το όφελος του Σταθμού Βάσης εξαρτάται από το όφελος της δεσμευμένης κλάσης μειωμένο κατά ένα παράγοντα που αναπαριστά τη δυσαρέσκεια των συνδρομητών του και το αντίστοιχο κόστος που έχει ο πάροχος κινητών επικοινωνιών λόγω της παραβίασης των συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ παρόχου και συνδρομητών. Το όφελος του Σταθμού Βάσης στην περίπτωση αυτή δίδεται από τον τύπο

$$U_d^{(i,j)} = U_{BS}^{(i)} \cdot (1 - \delta)^{(i-j)} \quad (6.4)$$

όπου η παράμετρος $0 \leq \delta \leq 1$ εξαρτάται από το προφίλ του Σταθμού Βάσης. Συγκεκριμένα, η παράμετρος δ μπορεί να θεωρηθεί ως το βάρος που αποδίδει ο Σταθμός Βάσης στην ικανοποίηση των συνδρομητών του. Για $\delta = 0$, ο Σταθμός Βάσης δεν ενδιαφέρεται για την ανεπάρκεια του ως προς την ικανοποίηση της ζήτησης των συνδρομητών, ενώ για $\delta = 1$, το όφελος του Σταθμού Βάσης όταν δεν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση των συνδρομητών είναι μηδέν. Ειδικότερα, το όφελος $U_d^{(i,j)}$ εμφανίζει μια εκθετική απομείωση, η οποία αποτρέπει το Σταθμό Βάσης από το να δεσμεύει λιγότερους πόρους και να δημιουργεί ζήτηση που δεν μπορεί να ικανοποιηθεί. Σε ένα τυπικό σενάριο, η επιλογή της παραμέτρου δ μπορεί να εξαρτηθεί από τη γεωγραφική θέση του Σταθμού Βάσης. Για παράδειγμα, ένας Σταθμός Βάσης που βρίσκεται σε αστική περιοχή πρέπει να έχει αυστηρές προδιαγραφές ως προς την ικανοποίηση της ζήτησης των συνδρομητών του, γεγονός που αντιστοιχεί σε μια μεγάλη τιμή για την παράμετρο δ . Αντίθετα, για ένα Σταθμό Βάσης που βρίσκεται σε μια αγροτική περιοχή υπάρχει μεγαλύτερη ανοχή ως προς την αναποτελεσματικότητα του στην ικανοποίηση της ζήτησης

των συνδρομητών, γεγονός που αντιστοιχεί στην επιλογή μιας μικρής τιμής της παραμέτρου δ .

Θεωρώντας ότι ο πίνακας που περιλαμβάνει τα οφέλη του Σταθμού Βάσης συμβολίζεται με \mathbf{A} και ότι ο πίνακας που περιλαμβάνει τα οφέλη των συνδρομητών συμβολίζεται με \mathbf{B} , τότε σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, ισχύει ότι

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathcal{U}_{BS}^{(1,1)} & \mathcal{U}_{BS}^{(1,2)} & \dots & \mathcal{U}_{BS}^{(1,N)} \\ \mathcal{U}_d^{(2,1)} & \mathcal{U}_{BS}^{(2,2)} & \dots & \mathcal{U}_{BS}^{(2,N)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathcal{U}_d^{(N,1)} & \mathcal{U}_d^{(N,2)} & \dots & \mathcal{U}_{BS}^{(N,N)} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathcal{S}_u^{(1)} & \mathcal{S}_u^{(2)} & \dots & \mathcal{S}_u^{(N)} \\ \mathcal{S}_d^{(2,1)} & \mathcal{S}_u^{(2)} & \dots & \mathcal{S}_u^{(N)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathcal{S}_d^{(N,1)} & \mathcal{S}_d^{(N,2)} & \dots & \mathcal{S}_u^{(N)} \end{bmatrix}$$

όπου A_{ij} συμβολίζει το όφελος του Σταθμού Βάσης όταν δεσμεύεται η κλάση \mathcal{C}_i , ενώ η πραγματική ζήτηση των συνδρομητών ανήκει στην κλάση \mathcal{C}_j . Όμοια, με B_{ij} συμβολίζεται το όφελος των συνδρομητών όταν η ζήτηση ανήκει στην κλάση \mathcal{C}_j , ενώ ο Σταθμός Βάσης έχει δεσμεύσει πόρους που ανήκουν στην κλάση \mathcal{C}_i .

Όπως γίνεται εύκολα κατανοητό από την παραπάνω ανάλυση, οι παράμετροι που επηρεάζουν το όφελος του Σταθμού Βάσης είναι δύο. Η πρώτη παράμετρος είναι το βάρος που δίδει ο Σταθμός Βάσης στην ικανοποίηση της ζήτησης, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (6.4), και η δεύτερη παράμετρος σχετίζεται με το κόστος των περιττών πόρων που δεσμεύονται, όπως περιγράφεται στην εξίσωση (6.2). Η επίδραση της πρώτης παραμέτρου στο όφελος του Σταθμού Βάσης είναι τετριμμένη και μπορεί εύκολα να υπολογιστεί με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω. Όσον αφορά τη δεύτερη παράμετρο, γίνεται η υπόθεση ότι αν το κόστος των περιττών πόρων που δεσμεύονται από το Σταθμό Βάσης είναι μικρό, τότε ο Σταθμός Βάσης αιτείται τη δέσμευση της υψηλότερης κλάσης, η οποία αφορά το πιο δυσμενές σενάριο. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η διαστασιολόγηση των πόρων του δικτύου με βάση ένα δυσμενές σενάριο καθιστά μη αποδοτική την ανάπτυξη των δικτύων 4G λόγω της μεγάλης χωρητικότητας που απαιτούν. Συνεπώς, γίνεται η θεώρηση ότι το κόστος των περιττών πόρων καθιστά τη δέσμευση μιας υψηλότερης κλάσης ρυθμού πληροφορίας απαγορευτική για το Σταθμό Βάσης. Η θεώρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το όφελος του Σταθμού Βάσης είναι μεγαλύτερο όταν έχει ορθά δεσμεύσει τους κατάλληλους πόρους από το οπισθοζευκτικό δίκτυο, δηλαδή ισχύει ότι $\mathcal{U}_{BS}^{(i,j)} < \mathcal{U}_{BS}^{(j,j)}$ για $i < j \in [1, \dots, N]$.

6.1.2 Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση

6.1.2.1 Προτεινόμενο μοντέλο

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζεται το μοντέλο δυναμικής διαχείρισης των πόρων, το οποίο βασίζεται στην εξελικτική θεωρία παιγνίων. Έστω ότι οι μεταβλητές x_i και y_i συμβολίζουν τη συχνότητα με την οποία συναντάται η κλάση \mathcal{C}_i , $i \in [1, \dots, N]$ στον πληθυσμό των πρακτόρων του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών, αντίστοιχα. Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν στο παράρτημα, ισχύει ότι $\sum_i x_i = 1$ και $\sum_i y_i = 1$. Αν οι

μεταβλητές φ_i και ϑ_j συμβολίζουν το όφελος του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών όταν χρησιμοποιείται από αυτούς η κλάση \mathcal{C}_i και \mathcal{C}_j , αντίστοιχα, τότε ισχύει ότι

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} y_j \quad (6.5)$$

$$\vartheta_j = \sum_{i=1}^N B_{ij} x_i \quad (6.6)$$

Στο παίγνιο το οποίο μελετάται, γίνεται η υπόθεση ότι σε κάθε περίοδο (γενεά) ο Σταθμός Βάσης αναθεωρεί τις στρατηγικές του με πιθανότητα r_{BS} , και μόνο οι στρατηγικές που επιφέρουν όφελος μεγαλύτερο από το μέσο όφελος ευνοούνται. Όμοια, οι συνδρομητές αναθεωρούν τις δικές τους στρατηγικές με πιθανότητα r_S . Για μικρή περίοδο του χρόνου που οι παίχτες αναθεωρούν τις στρατηγικές τους, ο ρυθμός μεταβολής αυτών μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις της δυναμικής των αντιγραφών που δίδονται από τους τύπους

$$\dot{x}_i = r_{BS} \cdot x_i (\varphi_i - \bar{\varphi}) \quad (6.7\alpha')$$

$$\dot{y}_j = r_S \cdot y_j (\vartheta_j - \bar{\vartheta}) \quad (6.7\beta')$$

για $i, j = 1, \dots, N$, όπου η μεταβλητή $\bar{\varphi} = \sum_i x_i \varphi_i$ και η μεταβλητή $\bar{\vartheta} = \sum_i y_i \vartheta_i$ είναι τα μέσα οφέλη του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών, αντίστοιχα. Με βάση τις εξισώσεις αυτές, ισχύει το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 6.1.1. *Οι πόροι που δεσμεύονται από το Σταθμό Βάσης και οι πόροι που αιτούνται από τους συνδρομητές συγκλίνουν.*

Απόδειξη. Η απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ'.3. □

Με άλλα λόγια, το θεώρημα αυτό υποστηρίζει ότι το παίγνιο συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας που αντιστοιχεί σε σημείο ισορροπίας καθαρών στρατηγικών κατά Nash. Επομένως, η αλληλεπίδραση μεταξύ του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών θα οδηγήσει το σύστημα σε μια κατάσταση σύμφωνα με την οποία οι πόροι που δεσμεύει ο Σταθμός Βάσης θα είναι αυτοί οι οποίοι ικανοποιούν τις ανάγκες των συνδρομητών. Συγκεκριμένα, έπειτα από έναν αριθμό αλληλεπιδράσεων, και με βάση τις αρχικές συνθήκες του συστήματος, οι συνδρομητές μαθαίνουν τη διαθεσιμότητα της κλάσης \mathcal{C}_i και τροποποιούν ανάλογα τις απαιτήσεις τους προκειμένου να αυξηθεί το όφελός τους. Παράλληλα, ο Σταθμός Βάσης αναγνωρίζει την κλάση που ζητάνε οι συνδρομητές και προσαρμόζει δυναμικά τις επιλογές του προκειμένου να αυξηθεί το όφελος του. Στην τελική κατάσταση, η κλάση η οποία ζητείται από τους συνδρομητές και η κλάση η οποία δεσμεύεται από το Σταθμό Βάσης συγκλίνουν και το παίγνιο ισορροπεί σε αυτή την κατάσταση.

Στην παραπάνω ανάλυση, έγινε η υπόθεση ότι υπάρχει ένα συγκεκριμένο κόστος που βαρύνει το Σταθμό Βάσης όταν δεσμεύει περιττούς πόρους. Το γεγονός αυτό αφορά την περίπτωση όπου το ασύρματο δίκτυο πρόσβασης και το οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους. Αντίθετα, στην περίπτωση που ο ίδιος πάροχος είναι ιδιοκτήτης του ασύρματου και του οπισθοζευκτικού δικτύου και δεν μπορεί να μισθώσει τους αδιάθετους πόρους του οπισθοζευκτικού δικτύου σε έναν τρίτο

πάροχο, τότε το παραπάνω κόστος είναι μηδενικό. Γίνεται εμφανές ότι στην περίπτωση αυτή η στρατηγική του Σταθμού Βάσης να δεσμεύσει την κλάση C_1 γίνεται αυστηρώς κυρίαρχη στρατηγική και ως εκ τούτου αποτελεί μια εξελικτικά ευσταθή στρατηγική για το Σταθμό Βάσης. Επομένως, σύμφωνα με το Θεώρημα 6.1.1, η κλάση η οποία ζητείται από τους συνδρομητές συγκλίνει στην κλάση C_1 .

6.1.2.2 Συζήτηση επί του μοντέλου

Στην προηγούμενη παράγραφο αποδείχτηκε ότι οι πόροι που δεσμεύονται από το Σταθμό Βάσης και οι πόροι που αιτούνται από τους συνδρομητές συγκλίνουν υπό το μοντέλο της δυναμικής των αντιγραφών. Προκειμένου να ερμηνευθεί το αποτέλεσμα αυτό σε ένα πραγματικό σενάριο εφαρμογής γίνεται η υπόθεση ότι ο Σταθμός Βάσης δεσμεύει πόρους² που ανήκουν στην κλάση C_i , ενώ η αθροιστική ζήτηση των συνδρομητών ανήκει στην κλάση C_j . Στην περίπτωση που η κλάση η οποία δεσμεύεται από το Σταθμό Βάσης είναι μικρότερη από την κλάση που αιτείται από τους συνδρομητές, τότε οι συνδρομητές αντιλαμβάνονται μια υποβαθμισμένη παροχή ποιότητας υπηρεσίας, η οποία, για παράδειγμα, μπορεί να αντιστοιχεί σε χαμηλής ποιότητας βίντεο, χαμηλή ταχύτητα ζεύξης καθόδου, κτλ., ανάλογα με τις απαιτήσεις τους. Επομένως, ο Σταθμός Βάσης πρέπει να δεσμεύσει περισσότερους πόρους προκειμένου να ικανοποιήσει την υψηλή ζήτηση. Παράλληλα, όμως, η χαμηλή ποιότητα υπηρεσίας που αντιλαμβάνονται οι συνδρομητές αυξάνει τη δυσαρέσκειά τους³ οδηγώντας στη μείωση της αθροιστικής ζήτησης. Η εν λόγω μείωση αντιστοιχεί σε διαφορετικά σενάρια, όπως για παράδειγμα ότι οι συνδρομητές αναγκάζονται να μειώσουν τις απαιτήσεις τους επειδή δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν ή χρησιμοποιούν κάποια εναλλακτική τεχνολογία πρόσβασης (πχ. Wi-Fi). Ειδικότερα, στο πρώτο σενάριο που αναφέρθηκε, οι συνδρομητές μπορούν είτε να ανεχθούν μια υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας, που αναφέρεται σε χαμηλές τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων ποιότητας, όπως η ανάλυση βίντεο, ή ακόμα και να σταματήσουν να χρησιμοποιούν κάποια υπηρεσία (πχ. στην περίπτωση πολύ χαμηλής ποιότητας υπηρεσίας). Επομένως, τόσο ο Σταθμός Βάσης όσο και οι συνδρομητές προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους οδηγώντας το σύστημα στο σημείο ισορροπίας.

Παρόμοια, αν οι δεσμευμένοι πόροι από το Σταθμό Βάσης είναι περισσότεροι από την τρέχουσα ζήτηση των συνδρομητών, τότε ο Σταθμός Βάσης αποδεσμεύει ένα μέρος αυτών προκειμένου ο πάροχος κινητών επικοινωνιών να αυξήσει τα έσοδά του. Ωστόσο, καθώς οι συνδρομητές αντιλαμβάνονται μια υψηλή παροχή ποιότητας υπηρεσίας, αυξάνουν την αθροιστική τους ζήτηση χρησιμοποιώντας ο καθένας εξ' αυτών περισσότερες υπηρεσίες (πχ. λήψη κάποιου αρχείου FTP και περιήγηση στο διαδίκτυο ή παρακολούθηση ροής βίντεο). Όμοια, στην περίπτωση αυτή, τόσο ο Σταθμός Βάσης όσο και οι συνδρομητές προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους οδηγώντας το σύστημα σε ένα σημείο ισορροπίας σύμφωνα με το οποίο η κλάση των πόρων που ζητείται και η κλάση των πόρων που δεσμεύεται ταυτίζονται.

Η προσαρμοστική συμπεριφορά του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών έχει σημαντικές διαφορές, οι οποίες σχετίζονται με τις τιμές των πιθανοτήτων επαναξιολόγησης των στρατηγικών τους r_{BS} και r_S . Ειδικότερα, αναμένεται ότι οι συνδρομητές

²Ο εκχωρημένος ρυθμός πληροφορίας δίδεται σε διακριτά βήματα όπως προτείνεται από την NGMN [56].

³Παρά τη δυσαρέσκεια των συνδρομητών θεωρείται απίθανο για αυτούς να αλλάξουν τον υφιστάμενο πάροχο κινητών επικοινωνιών λόγω των συμβολαίων που υπάρχουν μεταξύ τους και δεσμεύουν τους συνδρομητές, όπως αναφέρεται στην εργασία [88].

παρουσιάζουν πιο προσαρμοστική συμπεριφορά, καθώς ο Σταθμός Βάσης περιορίζεται από τις καθυστερήσεις και τους τεχνικούς περιορισμούς των οντοτήτων του δικτύου.

6.1.3 Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση υπό Καθυστέρηση

Στην προηγούμενη παράγραφο αποδείχτηκε η ασυμπτωτική ευστάθεια του μοντέλου της δυναμικής των αντιγραφών. Ωστόσο, ένα κύριο μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η υπόθεση ότι οι παίκτες έχουν άμεση γνώση της στρατηγικής του αντιπάλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι παίκτες αποφασίζουν τις στρατηγικές τους με βάση τη γνώση αυτή.

Στην παράγραφο αυτή, μελετάται μια πιο ρεαλιστική περίπτωση, κατά την οποία οι αποφάσεις για τις στρατηγικές που ακολουθούν οι παίκτες βασίζονται σε πληροφορίες που έχουν λάβει σε παλαιότερο χρόνο. Ειδικότερα, γίνεται η υπόθεση ότι ο Σταθμός Βάσης πληροφορείται τις επιλογές των συνδρομητών με καθυστέρηση τ_1 , ενώ οι συνδρομητές μαθαίνουν τη στρατηγική του Σταθμού Βάσης με καθυστέρηση τ_2 . Επομένως, το όφελος της στρατηγικής i του Σταθμού Βάσης είναι το όφελος τ_1 χρονικές μονάδες στο παρελθόν, ενώ για τους συνδρομητές είναι τ_2 χρονικές μονάδες. Το σύστημα λαμβάνει τη μορφή

$$\dot{x}_i = r_{BS} \cdot x_i (\varphi_i^{\tau_1} - \bar{\varphi}^{\tau_1}) \quad (6.8\alpha')$$

$$\dot{y}_j = r_S \cdot y_j (\vartheta_j^{\tau_2} - \bar{\vartheta}^{\tau_2}) \quad (6.8\beta')$$

για $i, j = 1, \dots, N$, όπου η μεταβλητή $\varphi_i^{\tau_1} = \sum_{j=1}^N A_{ij} y_j(t - \tau_1)$ συμβολίζει το όφελος που αντιλαμβάνεται ο Σταθμός Βάσης υπό καθυστέρηση όταν χρησιμοποιεί την κλάση C_i , $\bar{\varphi}^{\tau_1} = \sum_i x_i \varphi_i^{\tau_1}$ είναι το μέσο όφελος, $\vartheta_j^{\tau_2} = \sum_{i=1}^N B_{ij} x_i(t - \tau_2)$ είναι το όφελος που αντιλαμβάνονται οι συνδρομητές υπό καθυστέρηση όταν η ζήτηση ανήκει στην κλάση C_j και $\bar{\vartheta}^{\tau_2} = \sum_i y_i \vartheta_i^{\tau_2}$ είναι το μέσο όφελος αυτών. Ισχύει το παρακάτω θεώρημα.

Θεώρημα 6.1.2. *Υπό τις χρονικές καθυστερήσεις τ_1 και τ_2 , οι πόροι που δεσμεύει ο Σταθμός Βάσης και οι πόροι που αιτούνται από τους συνδρομητές συγκλίνουν.*

Απόδειξη. Η απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ'.4. □

Το αποτέλεσμα του Θεωρήματος 6.1.2 είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς αποδεικνύει ότι το παίγνιο ισορροπεί σε ένα σημείο ισορροπίας σύμφωνα με το οποίο οι πόροι που αιτούνται οι συνδρομητές και οι πόροι που δεσμεύει ο Σταθμός Βάσης συγκλίνουν, ακόμα και υπό την επίδραση της καθυστέρησης στη γνώση των στρατηγικών του αντιπάλου.

6.1.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται η επικύρωση του προτεινόμενου μοντέλου με χρήση προσομοιώσεων. Για το σκοπό αυτό, θεωρούνται κατάλληλες συναρτήσεις οφέλους που είναι σύμφωνες με την ανάλυση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 6.1.1 και διαμορφώνονται τα προφίλ των παικτών. Συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ότι το όφελος των συνδρομητών $S_u^{(j)}$ περιγράφεται από τη σιγμοειδή συνάρτηση

$$S_u^{(j)} = \frac{\mu}{1 + \nu \cdot \exp[-(N - j)\xi + \sigma]} \quad (6.9)$$

Σταθμός Βάσης		Συνδρομητές	
Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
ϵ	4	μ	8
ζ	0.1	ν	1
ω	1.2	ξ	0.1
δ	0.4	σ	1

Πίνακας 6.1: Τιμές των παραμέτρων για τα προφίλ του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών.

όπου τα $\nu, \mu, \xi, \sigma > 0$ είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το προφίλ των συνδρομητών. Επιπλέον, το όφελος του Σταθμού Βάσης $U_{BS}^{(i)}$ δίδεται από τη συνάρτηση εκθετικής μείωσης ως προς την κλάση C_i η οποία δεσμεύεται

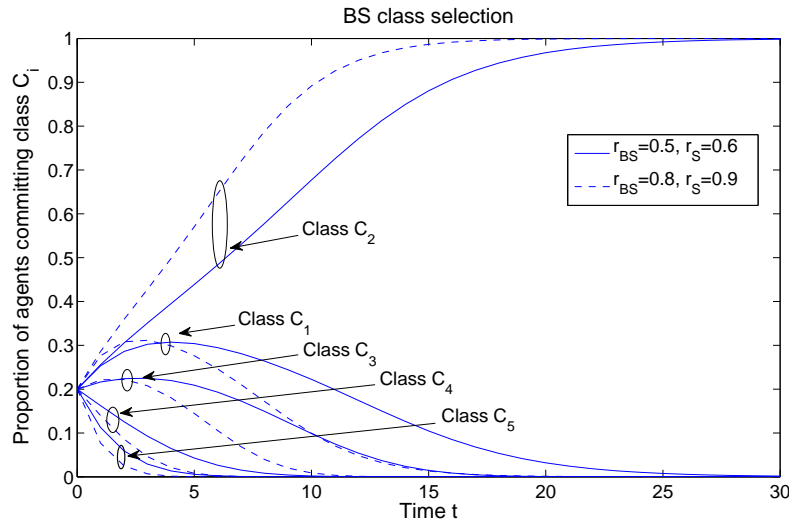
$$U_{BS}^{(i)} = \epsilon \cdot e^{(N-i)\zeta} \quad (6.10)$$

όπου τα $\epsilon, \zeta > 0$ είναι παράμετροι που εξαρτώνται από το προφίλ του Σταθμού Βάσης. Παρόμοιες συναρτήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στην εργασία [40] προκειμένου να αναπαραστήσουν την ικανοποίηση τόσο των συνδρομητών, όσο και του παρόχου κινητών επικοινωνιών στο πρόβλημα επιλογής τεχνολογίας πρόσβασης σε ετερογενή ασύρματα δίκτυα.

Τέλος, το κόστος των περιττών πόρων θεωρείται ότι είναι γραμμικό ως προς τη διαφορά μεταξύ αιτούμενης και δεσμευμένης κλάσης, δηλαδή

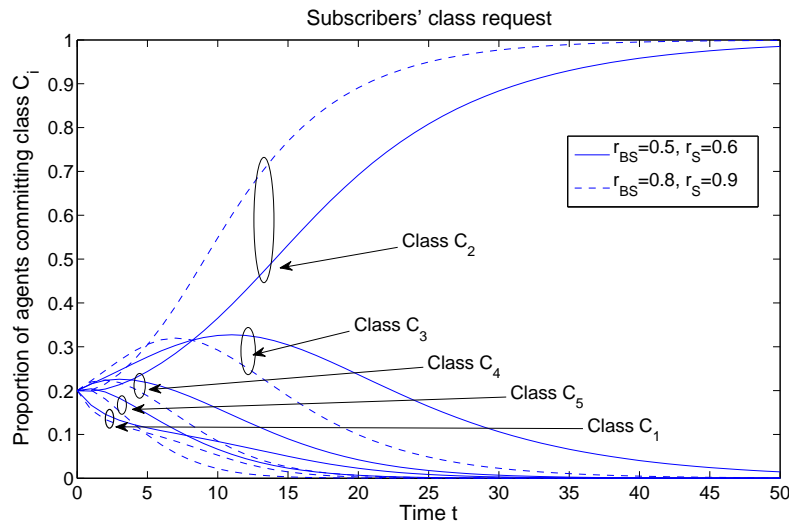
$$C_{BS}^{(j-i)} = \omega \cdot (j - i) \quad (6.11)$$

όπου $\omega > 0$ είναι παράμετρος που εξαρτάται από το προφίλ του Σταθμού Βάσης. Οι τιμές των παραμέτρων των προφίλ των παικτών δίδονται στον Πίνακα 6.1.



Σχήμα 6.2: Εξέλιξη των κλάσεων που έχουν δεσμευτεί από το Σταθμό Βάσης, για τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.

Έστω η περίπτωση ότι υπάρχουν $N = 5$ κλάσεις. Στο Σχήμα 6.2 και στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται η εξέλιξη των στρατηγικών του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών, αντίστοιχα. Γίνεται, επομένως, αντιληπτό ότι υπάρχει μια ταχεία σύγκλιση των

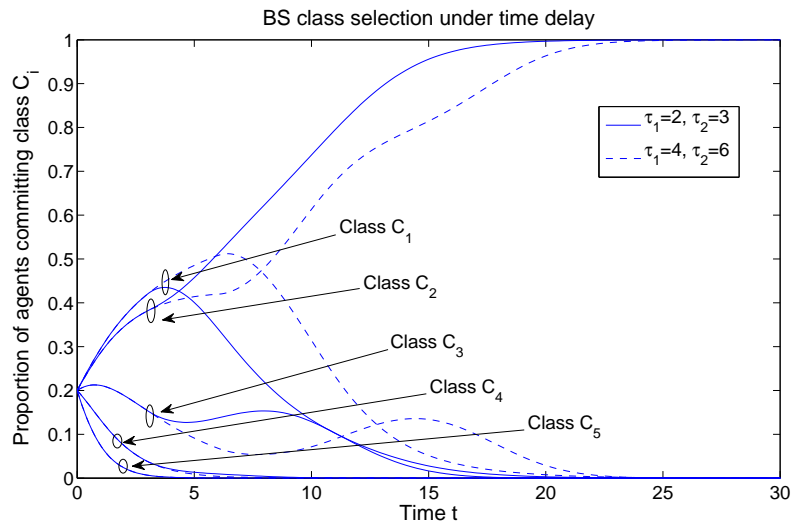


Σχήμα 6.3: Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τους συνδρομητές, για τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.

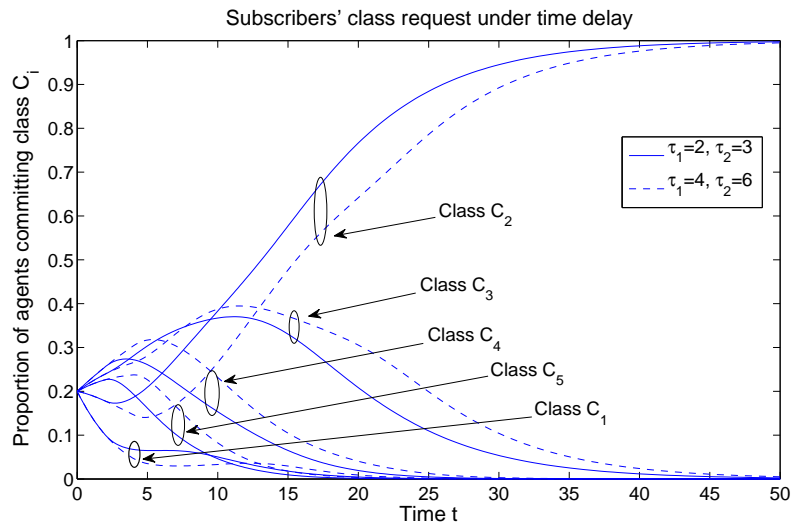
δεσμευμένων πόρων και τον πόρων που ζητούνται από τους συνδρομητές. Σημειώνεται ότι αν και η σύγκλιση των στρατηγικών για τους δύο παίκτες είναι αποδεδειγμένη, η κλάση C_i στην οποία θα γίνει η σύγκλιση εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες του συστήματος και από τις περιοχές έλξης (basins of attraction) των σημείων ισορροπίας. Ειδικότερα, το σύστημα συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας για το οποίο οι αρχικές συνθήκες ευρίσκονται εντός της περιοχής έλξης αυτού. Το μέγεθος των περιοχών έλξης εξαρτάται από τα οφέλη των παικτών, τα οποία ορίζονται από τις τιμές των παραμέτρων. Συγκεκριμένα, αν ένα σημείο ισορροπίας παρέχει υψηλότερα οφέλη τόσο για το Σταθμό Βάσης, όσο και για τους συνδρομητές σε σύγκριση με τα άλλα σημεία ισορροπίας, τότε χαρακτηρίζεται από μια μεγαλύτερη περιοχή έλξης. Ωστόσο, ο υπολογισμός των περιοχών αυτών είναι έξω από τα πλαίσια της διατριβής και ο αναγνώστης παραπέμπεται στις εργασίες [24], [27] και [83] για περισσότερες λεπτομέρειες.

Επιπλέον, στα Σχήματα 6.2 και 6.3 παρουσιάζεται και η επίδραση των πιθανοτήτων αναθεώρησης των στρατηγικών r_{BS} και r_S στο χρόνο σύγκλισης. Γίνεται εμφανές ότι όταν ο Σταθμός Βάσης και οι συνδρομητές αναθεωρούν τις στρατηγικές τους σε συχνότερη βάση, τότε η σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας είναι ταχύτερη.

Η επίδραση της καθυστέρησης στις στρατηγικές επιλογές του Σταθμού Βάσης και των συνδρομητών απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4 και στο Σχήμα 6.5, αντίστοιχα. Αν και οι στρατηγικές των δύο παικτών συγκλίνουν στην ίδια κλάση όπως αποδείχτηκε στο Παράρτημα Δ'.4, γίνεται εμφανές ότι υπάρχει μια αρνητική επίδραση της καθυστέρησης στην ταχύτητα σύγκλισης. Ωστόσο, το Θεώρημα 6.1.2 διασφαλίζει ότι ακόμα και για υψηλές τιμές των χρόνων καθυστέρησης τ_1 και τ_2 , το σύστημα συγκλίνει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Τέλος, σημειώνεται ότι τα σημεία ισορροπίας υπό το καθεστώς της δυναμικής των αντιγραφών και της δυναμικής των αντιγραφών υπό καθυστέρηση δεν είναι απαραίτητα ίδια, ακόμα και για ίδιες αρχικές συνθήκες.



Σχήμα 6.4: Εξέλιξη των κλάσεων που έχουν δεσμευτεί από το Σταθμό Βάσης υπό την επίδραση καθυστέρησης, για $r_{BS} = 0.8$, $r_S = 0.9$ και τιμές παραμέτρων όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.



Σχήμα 6.5: Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τους συνδρομητές υπό την επίδραση καθυστέρησης, για $r_{BS} = 0.8$, $r_S = 0.9$ και τιμές παραμέτρων όπως εμφανίζονται στον Πίνακα 6.1.

6.2 Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση στην Πλευρά του Οπτικού Δικτύου

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος της διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου για την περίπτωση όπου δύο Σταθμοί Βάσης που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους, μοιράζονται το οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο. Κατ' ουσίαν, κάθε Σταθμός Βάσης, ο οποίος ανήκει σε διαφορετικό πάροχο, εκτιμάει τους απαραίτητους πόρους που απαιτούνται για την ικανοποίηση των συνδρομητών του και αιτείται εκ των προτέρων τη δέσμευσή τους από τον πάροχο του οπτικού δικτύου. Αν το άθροισμα των πόρων που αιτούνται από τους Σταθμούς Βάσης είναι μικρότερο από τη χωρητικότητα του οπτικού δικτύου, τότε τα αιτήματά τους μπορούν να ικανοποιηθούν από τον οπτικό πάροχο. Αντίθετα, αν το άθροισμα των πόρων που αιτούνται από τους Σταθμούς Βάσης υπερβαίνει τη χωρητικότητα του οπτικού δικτύου, τότε οι αιτήσεις αυτές δεν μπορούν να ικανοποιηθούν ταυτόχρονα. Στο πλαίσιο αυτό, μελετάται η δυναμική συμπεριφορά των Σταθμών Βάσης για την εκχώρηση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται η εξελικτική θεωρία παιγνίων προκειμένου να αποτυπώσει τη δυναμική συμπεριφορά των εταίρων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, ενώ παράλληλα μελετάται η ευστάθεια του προτεινόμενου μοντέλου με τη χρήση της δυναμικής των αντιγραφών.

6.2.1 Διατύπωση του Προβλήματος

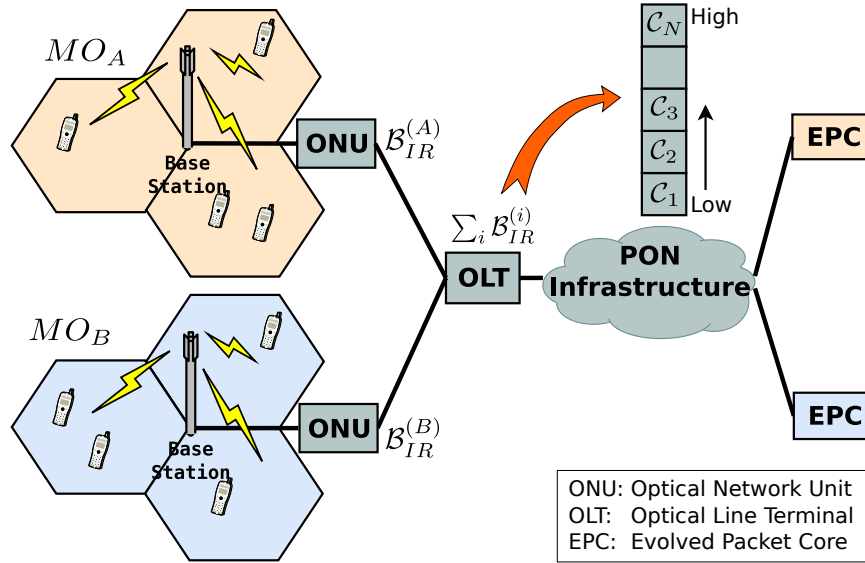
Για τη μελέτη του προβλήματος, γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν δύο Σταθμοί Βάσης που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους κινητών επικοινωνιών που συμβολίζονται με MO_A και MO_B , και μοιράζονται μια κοινή οπισθοζευκτική υποδομή που αποτελείται από ένα παθητικό οπτικό δίκτυο που ανήκει σε διαφορετικό πάροχο, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6.

Κάθε Σταθμός Βάσης υπολογίζει τους απαραίτητους πόρους που απαιτούνται για την ικανοποίηση των συνδρομητών του και αιτείται εκ των προτέρων τη δέσμευσή τους από το οπτικό δίκτυο. Ειδικότερα, σε καθορισμένες χρονικές περιόδους, κάθε Σταθμός Βάσης υπολογίζει τον κατάλληλο ρυθμό πληροφορίας⁴, $B_{IR}^{(A)}$ και $B_{IR}^{(B)}$ για τον πάροχο MO_A και τον πάροχο MO_B , αντίστοιχα, και αιτείται τη δέσμευσή του από το οπτικό δίκτυο. Από τη μεριά του, ο πάροχος του οπτικού δικτύου λαμβάνει όλες τις αιτήσεις, αξιολογεί τη διαθέσιμη χωρητικότητα και εκχωρεί τους απαραίτητους πόρους αν τα αθροιστικά αιτήματα $\sum_z B_{IR}^{(z)}$, $z \in \{A, B\}$, είναι μικρότερα από τη χωρητικότητα του οπτικού δικτύου \mathcal{D} .

Προκειμένου να απλοποιηθεί το πρόβλημα, γίνεται η υπόθεση ότι η χωρητικότητα του οπτικού δικτύου διαχωρίζεται σε N κλάσεις C_i , $i \in [1, \dots, N]$, διατεταγμένες σε αύξουσα σειρά ως προς το ρυθμό πληροφορίας, έτσι ώστε η κλάση C_N να συμβολίζει το μέγιστο δυνατό ρυθμό πληροφορίας που μπορεί να αιτηθεί και να προσφερθεί. Αν ο Σταθμός Βάσης που ανήκει στον πάροχο MO_A αιτηθεί την κλάση C_i , δηλαδή $B_{IR}^{(A)} \in C_i$, και ο Σταθμός Βάσης που ανήκει στον πάροχο MO_B αιτηθεί την κλάση C_j , δηλαδή $B_{IR}^{(B)} \in C_j$, τότε διακρίνονται δύο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις:

- Αν $i + j \leq N$, τότε ισχύει ότι $\sum_z B_{IR}^{(z)} \leq \mathcal{D}$ και η αθροιστική ζήτηση των Σταθμών Βάσης μπορεί να ικανοποιηθεί από τον πάροχο του οπτικού δικτύου.

⁴Αναφέρεται στον εκχωρημένο ρυθμό πληροφορίας, όπως αυτός καθορίζεται στα [28], [32] και [56].



Σχήμα 6.6: Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος εκχώρησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου με δύο παρόχους.

Στην περίπτωση αυτή, οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών έχουν όφελος $U_A^{(i)}$ και $U_B^{(j)}$, αντίστοιχα, που περιγράφονται από τις σχέσεις

$$U_A^{(i)} = S_A^{(i)} - C^{(i)} \quad (6.12)$$

$$U_B^{(j)} = S_B^{(j)} - C^{(j)} \quad (6.13)$$

όπου τα $S_A^{(i)}$ και $S_B^{(j)}$ είναι μονοτονικά αύξουσες συναρτήσεις ως προς το ρυθμό πληροφορίας, έτσι ώστε το όφελος των παρόχων κινητών επικοινωνιών να αυξάνεται όταν δεσμεύονται περισσότεροι πόροι, λόγω της ικανοποίησης των συνδρομητών τους και των αντίστοιχων εσόδων που προκύπτουν, ενώ με $C^{(i)}$ και $C^{(j)}$ συμβολίζεται το κόστος δέσμευσης των πόρων που αφορά την κλάση C_i και C_j , αντίστοιχα, τα οποία εξαρτώνται από τα συμφωνητικά επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και του παρόχου οπτικού δικτύου. Σημειώνεται ότι για λόγους ευκολίας γίνεται η θεώρηση πως η τιμολογιακή πολιτική του παρόχου του οπτικού δικτύου σχετικά με τη μίσθωση των πόρων είναι η ίδια για όλους τους πελάτες του.

- Αν $i+j > N$, τότε ισχύει ότι $\sum_z B_{IR}^{(z)} > D$ και η αθροιστική ζήτηση των Σταθμών Βάσης δεν μπορεί να ικανοποιηθεί από τον πάροχο του οπτικού δικτύου. Θεωρώντας μια δίκαιη πολιτική κατανομής των πόρων του οπτικού δικτύου, σύμφωνα με την οποία δεν ευνοείται κάποιος πάροχος-πελάτης απέναντι σε κάποιον άλλο, ο πάροχος του οπτικού δικτύου απορρίπτει τα αιτήματα των Σταθμών Βάσης, δεδομένου ότι τα συμφωνητικά επιπέδου υπηρεσίας δεν παραβιάζονται, και ξεκινάει μια νέα φάση διαπραγμάτευσης για την εκχώρηση των πόρων. Στην περίπτωση αυτή, τα οφέλη των παρόχων κινητών επικοινωνιών θεωρούνται μηδενικά.

Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, αν με \mathbf{A} συμβολίζεται ο πίνακας οφέλους για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_A και με \mathbf{B} συμβολίζεται ο πίνακας οφέλους για τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_B , τότε ισχύει ότι

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathcal{U}_A^{(1)} & \mathcal{U}_A^{(1)} & \cdots & \mathcal{U}_A^{(1)} & 0 \\ \mathcal{U}_A^{(2)} & \mathcal{U}_A^{(2)} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathcal{U}_A^{(N-1)} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathcal{U}_B^{(1)} & \mathcal{U}_B^{(2)} & \cdots & \mathcal{U}_B^{(N-1)} & 0 \\ \mathcal{U}_B^{(1)} & \mathcal{U}_B^{(2)} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathcal{U}_B^{(1)} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

όπου με $A_{i,j}$ συμβολίζεται το όφελος του παρόχου MO_A όταν αιτείται τη δέσμευση της κλάσης C_i , ενώ ο πάροχος MO_B αιτείται τη δέσμευση της κλάσης C_j . Όμοια, με $B_{i,j}$ συμβολίζεται το όφελος του παρόχου MO_B όταν αιτείται τη δέσμευση της κλάσης C_j , ενώ ο πάροχος MO_A αιτείται τη δέσμευση της κλάσης C_i .

Όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, το όφελος των παρόχων κινητών επικοινωνιών επηρεάζεται σημαντικά από το κόστος των πόρων που αιτούνται προς δέσμευση. Συγκεκριμένα, αν οι αιτούμενοι πόροι από τους παρόχους αυξάνονται, τότε το κόστος μίσθωσης αυτών, επίσης, αυξάνεται. Ωστόσο, το όφελος $S_z^{(i)}$, $z \in \{A, B\}$ των παρόχων κινητών επικοινωνιών που σχετίζεται με την αίτηση εκχώρησης της κλάσης C_i δεν εξαρτάται μόνο από τα έσοδα τους αλλά και από την ικανοποίηση των συνδρομητών τους, η οποία αυξάνεται όταν διατίθενται προς αυτούς περισσότεροι πόροι. Ως αποτέλεσμα, υποθέτοντας ότι οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών δίδουν μεγαλύτερη βαρύτητα στην ικανοποίηση των συνδρομητών τους σε σύγκριση με το κόστος μίσθωσης των πόρων, τα οφέλη $\mathcal{U}_A^{(i)}$ και $\mathcal{U}_B^{(i)}$ για τη δέσμευση των κλάσεων C_i και C_j , αντίστοιχα, είναι μονοτονικά αύξουσες συναρτήσεις του ρυθμού πληροφορίας. Σημειώνεται ότι η υπόθεση αυτή αντιστοιχεί στην υπερδιαστασιολόγηση των πόρων από τους παρόχους προκειμένου να παρέχουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας προς τους τελικούς συνδρομητές τους. Σε επόμενη παράγραφο, η υπόθεση αυτή αναιρείται και μελετάται η συμπεριφορά του συστήματος για την ειδική αυτή περίπτωση.

6.2.2 Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση

6.2.2.1 Προτεινόμενο μοντέλο

Στην παράγραφο αυτή μελετάται το πρόβλημα του διαμοιρασμού των πόρων μεταξύ δύο Σταθμών Βάσης που ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους και μοιράζονται την ίδια οπτική οπισθοζευκτική υποδομή με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων. Για το σκοπό αυτό, γίνεται η υπόθεση ότι με x_i και y_i συμβολίζονται οι συχνότητες με τις οποίες συναντάται η κλάση C_i , $i \in [1, \dots, N]$ στον πληθυσμό των πρακτόρων για τον πάροχο MO_A και τον πάροχο MO_B , αντίστοιχα. Ισχύει ότι $\sum_i x_i = 1$ και $\sum_i y_i = 1$. Αν με φ_i και με ψ_j συμβολίζεται το όφελος του παρόχου MO_A και του παρόχου MO_B όταν χρησιμοποιούν τις κλάσεις C_i και C_j , αντίστοιχα, τότε ισχύει ότι

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^N A_{i,j} y_j \quad (6.14)$$

$$\vartheta_j = \sum_{i=1}^N B_{i,j} x_i \quad (6.15)$$

Στο παίγνιο το οποίο μελετάται, γίνεται η υπόθεση ότι σε καθορισμένες περιόδους (γενεές), οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών αναθεωρούν τις στρατηγικές τους, και μόνο αυτές οι στρατηγικές που έχουν όφελος μεγαλύτερο από το μέσο όφελος ευνοούνται. Για μικρή περίοδο του χρόνου που οι παίχτες αναθεωρούν τις στρατηγικές τους, ο ρυθμός μεταβολής αυτών μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις της δυναμικής των αντιγραφέντων που δίδονται από τους τύπους

$$\dot{x}_i = x_i(\varphi_i - \bar{\varphi}) \quad (6.16\alpha')$$

$$\dot{y}_j = y_j(\vartheta_j - \bar{\vartheta}) \quad (6.16\beta')$$

για $i, j = 1, \dots, N$, όπου η μεταβλητή $\bar{\varphi} = \sum_i x_i \varphi_i$ και η μεταβλητή $\bar{\vartheta} = \sum_i y_i \vartheta_i$ είναι τα μέσα οφέλη του παρόχου MO_A και του παρόχου MO_B , αντίστοιχα. Με βάση τις εξισώσεις αυτές, ισχύει το ακόλουθο θεώρημα.

Θεώρημα 6.2.1. *Τα αθροιστικά αιτήματα των παρόχων κινητών επικοινωνιών συγκλίνουν στους διαθέσιμους πόρους του οπτικού δικτύου.*

Απόδειξη. Η απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ'.5. □

Το παραπάνω θεώρημα υποστηρίζει ότι το παίγνιο μεταξύ των παρόχων κινητών επικοινωνιών συγκλίνει σε ένα σημείο ισορροπίας που αντιστοιχεί σε σημείο ισορροπίας καθαρών στρατηγικών κατά Nash⁵. Επομένως, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παρόχων κινητών επικοινωνιών και του παρόχου του οπτικού δικτύου οδηγούν το σύστημα σε μια κατάσταση σύμφωνα με την οποία η αθροιστική ζήτηση από τους παρόχους κινητών επικοινωνιών ικανοποιείται από τον πάροχο του οπτικού δικτύου.

6.2.2.2 Υπερτιμολόγηση των πόρων

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκε η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση η οποία βασίστηκε στην υπόθεση ότι τα οφέλη $U_A^{(i)}$ και $U_B^{(i)}$ των παρόχων κινητών επικοινωνιών για τη δέσμευση της κλάσης C_i είναι μονοτονικά αύξουσες συναρτήσεις του ρυθμού πληροφορίας. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, η αύξηση στο κόστος μίσθωσης των πόρων $C^{(i)}$ είναι μικρότερη από την αύξηση του οφέλους $S_z^{(i)}$, $z \in \{A, B\}$, των παρόχων όταν δεσμεύουν την κλάση C_i . Ωστόσο, η υπόθεση αυτή δεν ισχύει πάντα. Ειδικότερα, αναμένεται ότι το κόστος μίσθωσης περισσότερων πόρων μπορεί να είναι απαγορευτικά υψηλό.

Συνεπώς, υπάρχουν τιμές κατωφλίου C_{thr}^A και C_{thr}^B για τις κλάσεις που αιτούνται οι πάροχοι MO_A και MO_B , αντίστοιχα, πάνω από τις οποίες οι αιτούμενοι πόροι χαρακτηρίζονται από απαγορευτικά υψηλό κόστος. Υποθέτοντας ότι η τιμολογιακή πολιτική του οπτικού παρόχου δεν δημιουργεί ανεκμετάλλετους πόρους, καθώς τα έσοδά του μεγιστοποιούνται όταν όλοι οι διαθέσιμοι πόροι εκχωρηθούν στους παρόχους κινητών επικοινωνιών, το Θεώρημα 6.2.1 εξακολουθεί να ισχύει⁶.

⁵Υπενθυμίζεται ότι ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash περιγράφει μια κατάσταση όπου η στρατηγική κάθε παίχτη είναι βέλτιστη, δεδομένων των στρατηγικών όλων των άλλων παιχτών [65].

⁶Ωστόσο, στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των σημείων ισορροπίας μειώνεται σύμφωνα με την

6.2.2.3 Συζήτηση επί του μοντέλου

Όπως αποδείχτηκε παραπάνω, η αθροιστική ζήτηση των πόρων από τους παρόχους κινητών επικοινωνιών συγκλίνει στη διαθέσιμη χωρητικότητα του οπτικού δικτύου υπό το μοντέλο της δυναμικής των αντιγραφών. Προκειμένου να ερμηνευθεί το αποτέλεσμα αυτό σε ένα πραγματικό σενάριο εφαρμογής γίνεται η υπόθεση ότι ο πάροχος κινητών επικοινωνιών MO_A αιτείται πόρους που ανήκουν στην κλάση C_i , ενώ ο πάροχος MO_B αιτείται πόρους που ανήκουν στην κλάση C_j ⁷. Όταν η αθροιστική ζήτηση των παρόχων κινητών επικοινωνιών είναι μικρότερη από τους διαθέσιμους πόρους του οπτικού δικτύου, τότε μπορούν να ικανοποιηθούν τα αιτήματα και των δύο παρόχων. Ωστόσο, οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών μαθαίνοντας τη διαθεσιμότητα των πόρων του οπτικού δικτύου, αιτούνται περισσότερους πόρους προκειμένου να παρέχουν βελτιωμένη ποιότητα υπηρεσίας στους συνδρομητές τους και να αυξήσουν τα έσοδά τους. Από την άλλη πλευρά, αν η αθροιστική ζήτηση ξεπεράσει τη διαθέσιμη χωρητικότητα του οπτικού δικτύου, τότε ο πάροχος του οπτικού δικτύου ενημερώνει τους παρόχους κινητών επικοινωνιών για την αδυναμία ικανοποίησης των αιτημάτων τους είτε απορρίπτοντας αυτά, είτε αντιπροτείνοντας ένα εναλλακτικό εφικτό τρόπο εκχώρησης των πόρων. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι πάροχοι κινητών επικοινωνιών να μειώσουν τους αιτούμενους πόρους. Η μείωση αυτή μπορεί να αφορά διαφορετικά σενάρια, όπως για παράδειγμα οι πάροχοι να προσφέρουν υποβαθμισμένη ποιότητα υπηρεσίας στους συνδρομητές τους, ή να χρησιμοποιήσουν τη διαδικασία της διαπομπής προκειμένου να εξυπηρετήσουν ένα ποσοστό των συνδρομητών τους από γειτονικούς Σταθμούς Βάσης, μειώνοντας, κατ' αυτόν τον τρόπο, τις απαιτήσεις του Σταθμού Βάσης. Συμπερασματικά, οι δύο πάροχοι κινητών επικοινωνιών προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους, οδηγώντας το σύστημα σε ένα σημείο ισορροπίας.

6.2.3 Παιγνιοθεωρητική Προσέγγιση υπό Καθυστέρηση

Στην προηγούμενη παράγραφο αποδείχτηκε η ασυμπτωτική ευστάθεια του μοντέλου της δυναμικής των αντιγραφών. Ωστόσο, ένα κύριο μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η υπόθεση ότι οι παίχτες έχουν άμεση γνώση της στρατηγικής του αντιπάλου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι παίχτες αποφασίζουν τις στρατηγικές τους με βάση τη γνώση αυτή.

Στην παράγραφο αυτή, μελετάται μια πιο ρεαλιστική περίπτωση κατά την οποία οι αποφάσεις για τις στρατηγικές που θα ακολουθήσουν οι παίχτες βασίζονται σε πληροφορίες που έχουν λάβει σε παλαιότερο χρόνο. Ειδικότερα, γίνεται η υπόθεση ότι ο πάροχος κινητών επικοινωνιών MO_A πληροφορείται τις επιλογές του παρόχου MO_B με καθυστέρηση τ_1 , ενώ ο πάροχος κινητών επικοινωνιών MO_B μαθαίνει τη στρατηγική του παρόχου MO_A με καθυστέρηση τ_2 . Επομένως, το όφελος της στρατηγικής i του παρόχου MO_A είναι το όφελος τ_1 χρονικές μονάδες στο παρελθόν, ενώ για τον πάροχο MO_B είναι τ_2 χρονικές μονάδες. Το σύστημα λαμβάνει τη μορφή

ανάλυση που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Δ'.5, καθώς υπάρχουν σημεία που ενώ αρχικά ήταν σημεία ευσταθούς ισορροπίας, τώρα χαρακτηρίζονται από θετικές ιδιοτιμές. Αυτά τα σημεία αφορούν τις κλάσεις πέραν των κλάσεων κατωφλίου C_{thr}^A και C_{thr}^B και αντιστοιχούν στις περιπτώσεις στις οποίες ένα μεγάλο μέρος των διαθέσιμων πόρων έχει εκχωρηθεί στον έναν εκ των δύο παρόχων κινητών επικοινωνιών.

⁷Οι πόροι αιτούνται σε διακριτά βήματα όπως προτείνεται από την NGMN Alliance [56].

$$\dot{x}_i = x_i(\varphi_i^{\tau_1} - \bar{\varphi}^{\tau_1}) \quad (6.17\alpha')$$

$$\dot{y}_j = y_j(\vartheta_j^{\tau_2} - \bar{\vartheta}^{\tau_2}) \quad (6.17\beta')$$

για $i, j = 1, \dots, N$, όπου η μεταβλητή $\varphi_i^{\tau_1} = \sum_{j=1}^N A_{i,j} y_j(t - \tau_1)$ συμβολίζει το όφελος που αντιλαμβάνεται ο πάροχος MO_A υπό καθυστέρηση όταν χρησιμοποιεί την κλάση C_i , $\bar{\varphi}^{\tau_1} = \sum_i x_i \varphi_i^{\tau_1}$ είναι το μέσο όφελος του παρόχου MO_A , $\vartheta_j^{\tau_2} = \sum_{i=1}^N B_{i,j} x_i(t - \tau_2)$ είναι το όφελος που αντιλαμβάνεται ο πάροχος MO_B υπό καθυστέρηση όταν χρησιμοποιεί την κλάση C_j και $\bar{\vartheta}^{\tau_2} = \sum_i y_i \vartheta_i^{\tau_2}$ είναι το μέσο όφελος αυτού. Ισχύει το παρακάτω θεώρημα.

Θεώρημα 6.2.2. *Υπό τις χρονικές καθυστερήσεις τ_1 και τ_2 , τα αθροιστικά αιτήματα των παρόχων κινητών επικοινωνιών συγκλίνουν στους διαθέσιμους πόρους του οπτικού δικτύου.*

Απόδειξη. Η απόδειξη παρατίθεται στο Παράρτημα Δ'.6. □

Το αποτέλεσμα του Θεωρήματος 6.2.2 είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς αποδεικνύει ότι το παίγνιο ισορροπεί σε ένα σημείο ισορροπίας σύμφωνα με το οποίο οι αθροιστικοί πόροι που αιτούνται από τους Σταθμούς Βάσης συγκλίνουν στους πόρους που διαθέτει το οπτικό δίκτυο, ακόμα και υπό την επίδραση της καθυστέρησης στη γνώση των στρατηγικών του αντιπάλου.

6.2.4 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στην παράγραφο αυτή, γίνεται η επικύρωση του προτεινόμενου μοντέλου με χρήση προσομοιώσεων. Για το σκοπό αυτό, θεωρούνται κατάλληλες συναρτήσεις οφέλους που είναι σύμφωνες με την ανάλυση που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη παράγραφο και διαμορφώνουν τα προφίλ των παικτών. Συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ότι το όφελος $S_z^{(i)}$, $z \in \{A, B\}$ των παρόχων κινητών επικοινωνιών είναι εκθετική συνάρτηση της αιτούμενης κλάσης C_i , δηλαδή

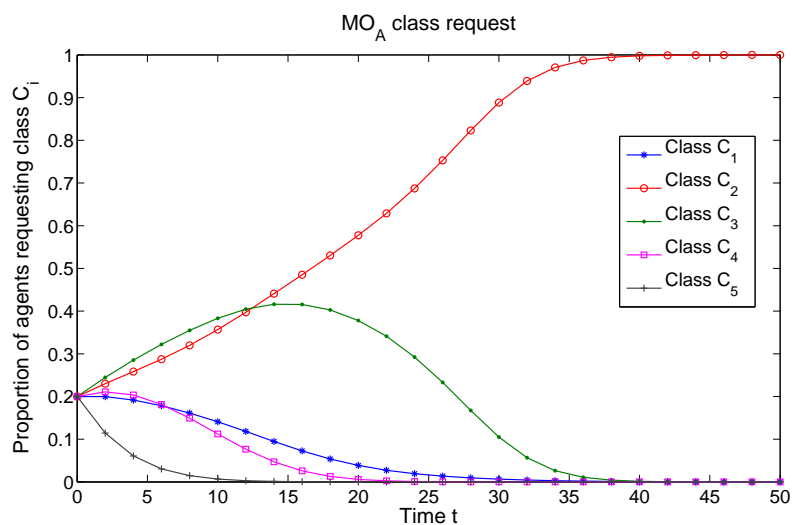
$$S_z^{(i)} = \epsilon_z \cdot e^{(i)\omega_z} \quad (6.18)$$

όπου οι παράμετροι $\epsilon_z, \omega_z > 0$ εξαρτώνται από το προφίλ των παρόχων κινητών επικοινωνιών. Επιπλέον, το κόστος των πόρων είναι κι αυτό εκθετική συνάρτηση της αιτούμενης κλάσης C_i , δηλαδή

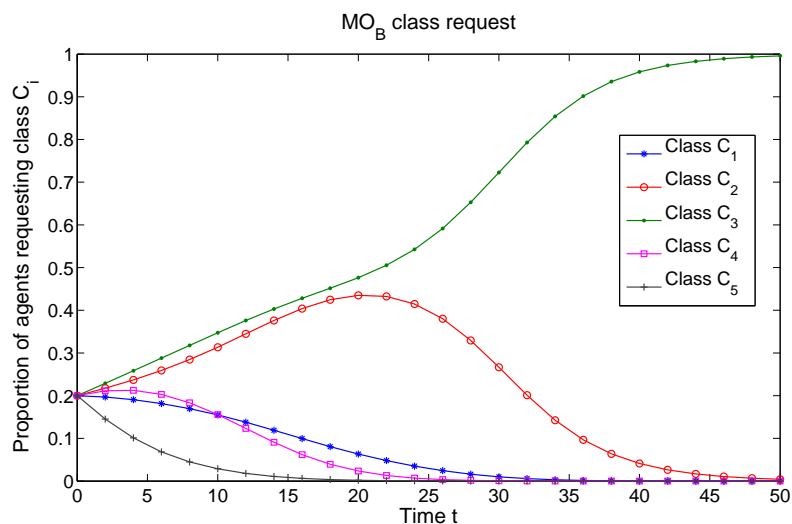
$$C^{(i)} = \mu \cdot e^{(i)\nu} \quad (6.19)$$

όπου οι παράμετροι $\mu, \nu > 0$ εξαρτώνται από τη τιμολογιακή πολιτική του παρόχου του οπτικού δικτύου.

Έστω η περίπτωση όπου οι πόροι του οπτικού δικτύου διαχωρίζονται σε $N = 5$ κλάσεις, και οι παράμετροι λαμβάνουν τις τιμές $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$ και $\nu = 0.4$. Οι τιμές αυτές των παραμέτρων διαμορφώνουν διαφορετικά προφίλ για τους Σταθμούς Βάσης και αντιστοιχούν σε διαφορετικές πολιτικές χρέωσης για τις παρεχόμενες υπηρεσίες τους, όπως επεξηγήθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ότι ο πάροχος κινητών επικοινωνιών MO_A έχει μεγαλύτερο όφελος σε σύγκριση με τον πάροχο MO_B για τους ίδιους πόρους. Στο Σχήμα 6.7 και στο Σχήμα 6.8, παρουσιάζεται η εξέλιξη των στρατηγικών για τους



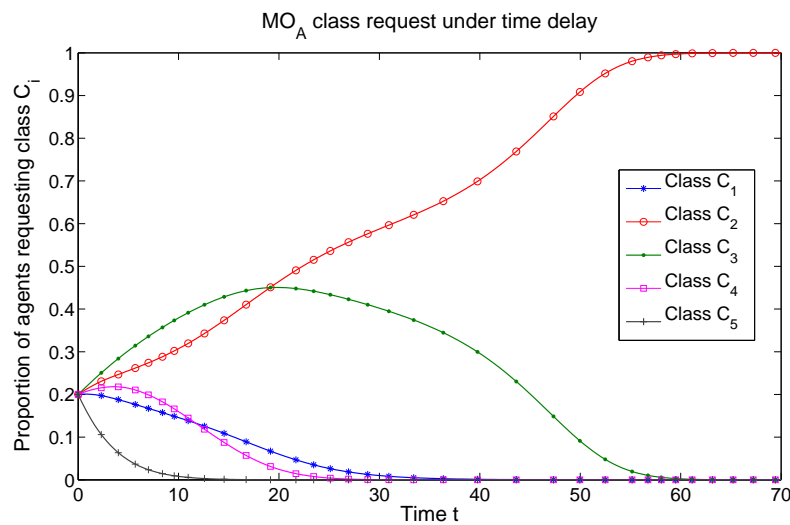
Σχήμα 6.7: Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_A για τις τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$.



Σχήμα 6.8: Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_B για τις τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$.

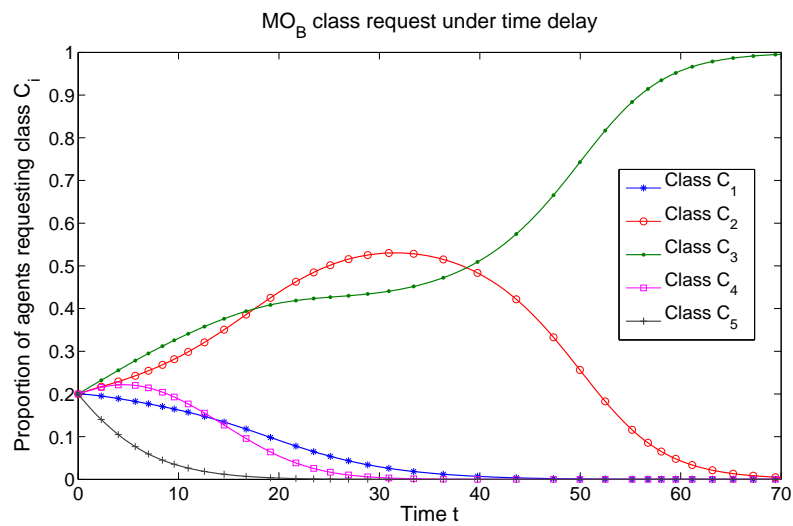
Σταθμούς Βάσης του παρόχου MO_A και MO_B , αντίστοιχα. Με βάση τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται εμφανές ότι υπάρχει μια ταχεία σύγκλιση των αιθροιστικών πόρων που αιτούνται από τους δύο παρόχους κινητών επικοινωνιών στους διαθέσιμους πόρους του οπτικού δικτύου.

Σημειώνεται ότι αν και η σύγκλιση των στρατηγικών για τους δύο παίχτες είναι αποδεδειγμένη, οι κλάσεις στις οποίες τελικά συγκλίνουν οι δύο πάροχοι κινητών επικοινωνιών εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες του συστήματος, δηλαδή την εκτιμώμενη ζήτηση των συνδρομητών τους, και από τις περιοχές έλξης των σημείων ισορροπίας. Ειδικότερα, το σύστημα συγκλίνει στο σημείο ισορροπίας για το οποίο οι αρχικές συνθήκες ευρίσκονται εντός της περιοχής έλξης αυτού. Το μέγεθος των περιοχών έλξης εξαρτάται από τα οφέλη των παικτών, τα οποία ορίζονται από τις τιμές των παραμέτρων. Ωστόσο, ο υπολογισμός των περιοχών αυτών είναι έξω από τα πλαίσια της διατριβής και ο αναγνώστης παραπέμπεται στις εργασίες [24], [27] και [83] για περισσότερες λεπτομέρειες.



Σχήμα 6.9: Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_A υπό την επίδραση καθυστέρησης $\tau_1 = 2$ και $\tau_2 = 3$ και για τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$.

Η επίδραση της καθυστέρησης στις στρατηγικές επιλογές των Σταθμών Βάσης απεικονίζεται στο Σχήμα 6.9 και στο Σχήμα 6.10. Αν και οι στρατηγικές των δύο Σταθμών Βάσης συγκλίνουν στους διαθέσιμους πόρους του οπτικού δικτύου, όπως αποδείχτηκε στο Παράρτημα Δ'6, γίνεται εμφανές ότι υπάρχει μια αρνητική επίδραση της καθυστέρησης στην ταχύτητα σύγκλισης. Ωστόσο, το Θεώρημα 6.2.2 διασφαλίζει ότι ακόμα και για υψηλές τιμές του χρόνου καθυστέρησης τ_1 και τ_2 , το σύστημα συγκλίνει σε μια κατάσταση ισορροπίας. Τέλος, σημειώνεται ότι τα σημεία ισορροπίας υπό το καθεστώς της δυναμικής των αντιγραφών και της δυναμικής των αντιγραφών υπό καθυστέρηση δεν είναι απαραίτητα ίδια, ακόμα και για ίδιες αρχικές συνθήκες.



Σχήμα 6.10: Εξέλιξη των κλάσεων που αιτούνται από τον πάροχο κινητών επικοινωνιών MO_B υπό την επίδραση καθυστέρησης $\tau_1 = 2$ και $\tau_2 = 3$ και για τιμές παραμέτρων $\epsilon_A = 0.5$, $\epsilon_B = 0.4$, $\omega_A = 0.45$, $\omega_B = 0.45$, $\mu = 0.3$, $\nu = 0.4$.

Κεφάλαιο 7

Ανακεφαλαίωση - Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η σύνοψη των θεμάτων που μελετήθηκαν στην παρούσα διατριβή και παρατίθενται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν. Επίσης, περιγράφονται οι κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας και οι δυνατές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας.

7.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διατριβή μελετήθηκε το πρόβλημα της δυναμικής διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου σε μια συγκεκλιμένη ασύρματη-οπτική δικτυακή υποδομή με σκοπό τη διασφάλιση της παροχής ποιότητας υπηρεσίας από το Σταθμό Βάσης του παρόχου κινητών επικοινωνιών.

Στα πρώτα κεφάλαια, αφού έγινε μια σύντομη ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των δικτύων κινητών επικοινωνιών, παρουσιάστηκαν οι μελλοντικές τάσεις ως προς τη ζήτηση ευρυζωνικών υπηρεσιών, εντοπίζοντας με αυτό τον τρόπο το πρόβλημα που αναμένεται να υπάρξει στο οπισθοζευκτικό δίκτυο. Ακόμη, αναλύθηκαν οι δυνατές τεχνολογικές λύσεις υποστήριξης του οπισθοζευκτικού δικτύου και τεκμηριώθηκε η καταλληλότητα της χρήσης των παθητικών οπτικών δικτύων για την εξυπηρέτηση των υψηλών ρυθμών μετάδοσης που απαιτούνται στο δίκτυο πρόσβασης. Επιπλέον, αναφέρθηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ενός οπτικού δικτύου και οι απαιτήσεις ενός οπισθοζευκτικού δικτύου νέας γενιάς για τη δυναμική διαχείριση των πόρων.

Στη συνέχεια, μελετήθηκε η φυσική αρχιτεκτονική ενός τέτοιου συστήματος δυναμικής διαχείρισης και επιλέχθηκε η χρήση κατανεμημένων ευφυών πρακτόρων στους Σταθμούς Βάσης, οι οποίοι είναι ενισχυμένοι με υπολογιστικές δυνατότητες. Στη βάση αυτή, περιγράφηκε η λειτουργικότητα ενός τέτοιου συστήματος και δόθηκε μεγαλύτερη βαρύτητα στην ανάλυση της διαδικασίας πρόβλεψης της κίνησης του οπισθοζευκτικού δικτύου. Για το σκοπό αυτό, αποδείχθηκε αρχικά η ύπαρξη περιοδικοτήτων στην κίνηση που καλείται να εξυπηρετήσει ο Σταθμός Βάσης, προκειμένου υποστηριχτεί η ωφελιμότητα της διαδικασίας της πρόβλεψης, και στη συνέχεια μελετήθηκαν τρία διαφορετικά είδη τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την υλοποίηση της διαδικασίας αυτής. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν έγινε εμφανής η υπεροχή των δικτύων GRNN, ενώ για την περαιτέρω τεκμηρίωσή τους, ερευνήθηκε η εξάρτηση της επίδοσης των νευρωνικών δικτύων από τις παραμέτρους που τα χαρακτηρίζουν. Η ανάλυση αυτή κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα νευρωνικό δίκτυο GRNN με παράμετρο εξομάλυν-

σης στο εύρος $0.05 < \sigma < 0.3$ μπορεί να αποδώσει ακριβέστερα αποτελέσματα ως προς την πρόβλεψη.

Έπειτα, μελετήθηκε η εξάρτηση των στατιστικών χαρακτηριστικών της κίνησης στην επίδοση της πρόβλεψης και παρατηρήθηκε ότι η σχετική τυπική απόκλιση αποτελεί μια καλή προσέγγιση για την επίδοση του μοντέλου, και επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δυναμική επιλογή ενός συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης.

Ακόμη, εξετάστηκαν σε θεωρητική βάση και θέματα που άπτονται της διαδικασίας εκπαίδευσης. Ειδικότερα, ερευνήθηκε η σχέση ανταλλαγής μεταξύ της ακρίβειας των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης και του υπολογιστικού κόστους που επιφέρει η διαδικασία της εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου συναρτήσει της συχνότητας με την οποία εκτελείται και του μεγέθους των δεδομένων που χρησιμοποιούνται γι' αυτή. Για το σκοπό της μελέτης αυτής, θεωρήθηκαν κατάλληλες συναρτήσεις οφέλους και εφαρμόστηκε η εξελικτική θεωρία παιγνίων, αποδεικνύοντας τη σύγκλιση στη βέλτιστη συχνότητα εκπαίδευσης και στο βέλτιστο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης υπό τη δυναμική των αντιγραφών. Επιπλέον, παρουσιάστηκε η ανάλυση διακλάδωσης για καθένα εκ των δύο αυτών προβλημάτων και υπολογίστηκαν τα όρια ευστάθειας του συστήματος.

Στη συνέχεια, μελετήθηκαν οι υπόλοιπες βασικές λειτουργίες του ευφυούς πράκτορα, οι οποίες κρίνονται απαραίτητες για την αποδοτική διαχείριση των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Σε αυτές συμπεριλαμβάνεται η διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης, η διαδικασία της αντιμετώπισης έκτακτων καταστάσεων και η διαδικασία της αίτησης των πόρων. Συγκεκριμένα, η διαδικασία της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης διασφαλίζει την αποδοτική λειτουργία του Σταθμού Βάσης στις περιπτώσεις απότομων μεταβολών της κίνησης που μεταφέρεται στο οπισθοζευκτικό δίκτυο. Στα πλαίσια αυτά, χρησιμοποιήθηκε ένα υβριδικό μοντέλο που συνδυάζει τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα με ανάλυση χρονοσειρών και μελετήθηκε η επίδοσή του για διαφορετικά χρονικά παράθυρα, ορίζοντα πρόβλεψης και όγκο δεδομένων εκπαίδευσης. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι ένα δίκτυο GRNN με χρήση ενός χρονικού παραθύρου 24 ωρών για την προγενέστερη ζήτηση και με ένα μικρό ορίζοντα πρόβλεψης επιφέρουν καλύτερα αποτελέσματα για τη βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της ζήτησης του Σταθμού Βάσης. Ως προς το μέγεθος του όγκου των δεδομένων κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός μεγάλου συνόλου δεδομένων εκπαίδευσης για την περίπτωση της κίνησης της ζεύξης ανόδου, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της, ενώ αντίθετα δεν παρατηρήθηκε αξιόλογη επίδραση του όγκου δεδομένων στην κίνηση της ζεύξης καθόδου.

Όσον αφορά τη διαδικασία αντιμετώπισης έκτακτων καταστάσεων, περιγράφηκαν συνοπτικά οι βασικές λειτουργίες και απαιτήσεις που πρέπει να πληρεί ο ευφυής πράκτορας για την αντιμετώπιση προγραμματισμένων διακοπών ή μη αναμενόμενων καταστάσεων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Κύριο χαρακτηριστικό της διαδικασίας αυτής είναι η παρακολούθηση του οπισθοζευκτικού δικτύου και η άμεση έναρξη της διαδικασίας διαπομπής σε περίπτωση παροχής υποβαθμισμένης ποιότητας υπηρεσίας προς τους συνδρομητές του Σταθμού Βάσης. Επιπλέον, περιγράφηκε η διαδικασία επεξεργασίας και αίτησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου που έχει ως σκοπό τη σύναψη κατάλληλων συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ του παρόχου κινητών επικοινωνιών και οπτικού δικτύου. Σημειώνεται, ότι η διαδικασία αυτή εξαρτάται από τον ίδιο τον πάροχο και τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας που έχει θέσει. Παρόλα αυτά, προτείνεται ένα απλό μοντέλο υπολογισμού των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου ως πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους μίσθωσης και με περιορισμούς που σχετίζονται με την παροχή

ποιότητας υπηρεσίας. Το πρόβλημα αυτό επιλύθηκε με τις παραδοσιακές μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού και τα αποτελέσματα έδειξαν τη βελτίωση της χρησιμοποίησης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου και την αποτελεσματική εκχώρηση του εύρους ζώνης. Τέλος, αξιολογήθηκε η επίδοση του ευφυούς πράκτορα και έγινε η σύγκριση του προτεινόμενου συστήματος δυναμικής διαχείρισης των πόρων με τις παραδοσιακές μεθόδους στατικής εκχώρησης. Ειδικότερα, με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν συμπεραίνεται ότι το προτεινόμενο σύστημα προσφέρει για τη ζεύξη καθόδου μια μέση βελτίωση της τάξης του 88% σε σύγκριση με ένα δυσμενές σενάριο και 40% σε σύγκριση με ένα μετριοπαθές σενάριο εκχώρησης πόρων. Αντίστοιχα, η μέση βελτίωση για τη ζεύξη ανόδου ήταν 93% και 79% σε σύγκριση με το δυσμενές και με το μετριοπαθές σενάριο, αντίστοιχα.

Πέραν των λειτουργιών του ευφυούς πράκτορα, μελετήθηκε και η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου. Αρχικά το πρόβλημα εξετάστηκε από την πλευρά του Σταθμού Βάσης, ο οποίος καλείται να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των συνδρομητών του που μεταβάλλονται ανάλογα με τους διαθέσιμους πόρους. Η αλληλεπίδραση του Σταθμού Βάσης με τους συνδρομητές μοντελοποιήθηκε με τη χρήση της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων, και αποδείχτηκε ότι οι πόροι που αιτούνται από τους συνδρομητές και οι πόροι που δεσμεύονται από το Σταθμό Βάσης, συγκλίνουν υπό τη δυναμική των αντιγραφών και υπό τη δυναμική των αντιγραφών με την επίδραση καθυστέρησης. Στη συνέχεια, μελετήθηκε το πρόβλημα από τη πλευρά του οπτικού δικτύου, όπου ο οπτικός πάροχος καλείται να εξυπηρετήσει τις ανάγκες πολλών Σταθμών Βάσης οι οποίοι δεν ανήκουν στον ίδιο πάροχο και, συνεπώς, είναι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους. Ειδικότερα εξετάστηκε η περίπτωση δύο Σταθμών Βάσης οι οποίοι υπολογίζουν την κίνηση που πρέπει να εξυπηρετήσουν και αιτούνται τους απαραίτητους πόρους από το οπτικό δίκτυο. Παρά την υψηλή χωρητικότητα του οπισθοζευκτικού δικτύου δεν είναι πάντα εφικτή η ικανοποίηση των αναγκών των Σταθμών Βάσης, οι οποίοι καλούνται να τροποποιήσουν κατάλληλα τα αιτήματά τους. Επομένως, για τη μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων των οντοτήτων αυτών, χρησιμοποιήθηκε η εξελικτική θεωρία παιγνίων και αποδείχτηκε ότι τα αθροιστικά αιτήματα των Σταθμών Βάσης συγκλίνουν στους διαθέσιμους πόρους του οπτικού δικτύου υπό τη δυναμική των αντιγραφών και τη δυναμική των αντιγραφών με την επίδραση της καθυστέρησης.

7.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Η παρούσα εργασία εστίασε στη μελέτη της δυναμικής διαχείρισης των πόρων του οπισθοζευκτικού δικτύου και προτάθηκε μια καινοτόμα και ολοκληρωμένη προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος αυτού. Επιπλέον, εξετάστηκε και η παιγνιοθεωρητική προσέγγιση του προβλήματος διαχείρισης των πόρων και προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των εταίρων που συμμετέχουν στη διαδικασία αυτή. Η συνέχιση της παρούσας διατριβής μπορεί να εστιάσει στα ακόλουθα σημεία:

- Στη μελέτη του ευφυούς πράκτορα υπό διαφορετική φυσική αρχιτεκτονική, η οποία θα λαμβάνει υπόψη της τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς του δικτύου κατά περίπτωση.
- Στην επέκταση του προτεινόμενου σχήματος σε αρχιτεκτονικές με κόμβους αναμετάδοσης, όπου μέρος της λειτουργικότητας του ευφυούς πράκτορα του Σταθ-

μού Βάσης θα επιμερίζεται σε κατανεμημένους πράκτορες που βρίσκονται στους κόμβους αναμετάδοσης.

- Στη διερεύνηση εναλλακτικών μη γραμμικών μεθόδων πρόβλεψης και σύγκρισή αυτών με το προτεινόμενο μοντέλο.
- Στην επέκταση του προτεινόμενου σχήματος για πρόβλεψη της ζήτησης ανά κλάση υπηρεσίας των δικτύων LTE.
- Στη μελέτη της εκχώρησης των πόρων με χρήση παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας και υπολογίζονται με βάση την προγενέστερη ζήτηση.
- Στην επέκταση της μελέτης για περισσότερους Σταθμούς Βάσης και εξαγωγή συμπερασμάτων για τη βέλτιστη συχνότητα εκπαίδευσης και το απαιτούμενο μέγεθος δεδομένων του συνόλου εκπαίδευσης ανά γεωγραφική περιοχή.
- Στην επέκταση της παιγνιοθεωρητικής προσέγγισης με περισσότερους από δύο Σταθμούς Βάσης που ανήκουν στον ίδιο και σε διαφορετικούς παρόχους κινητών επικοινωνιών.
- Στη μελέτη της παιγνιοθεωρητικής προσέγγισης με χρήση εναλλακτικών δυναμικών μοντέλων, όπως για παράδειγμα της δυναμικής βέλτιστης απόκρισης.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν επεκτάσεις της παρούσης εργασίας και καθιστούν κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας.

Παράρτημα Α΄

Μαθηματικό Μοντέλο Δυναμικής Εκχώρησης Εύρους Ζώνης σε Οπτικά Δίκτυα

Στο παράρτημα αυτό, παρουσιάζεται ένα τυπικό μοντέλο εκχώρησης εύρους ζώνης του οπτικού δικτύου που περιγράφει τη συμπεριφορά του μηχανισμού δυναμικής εκχώρησης (dynamic bandwidth allocation - DBA) για την καλύτερη κατανομή του, όπως αναφέρεται μέσα στις υποδείξεις της ITU (ITU-T G.984.3) [32]. Για την υλοποίηση του μηχανισμού αυτού χρησιμοποιούνται οι T-CONTs (transmission containers), οι οποίες είναι οντότητες στην ONU (Optical Network Unit) που μεταφέρουν την κίνηση και βελτιώνουν τη χρησιμοποίηση του εύρους ζώνης της ροής ανόδου στο οπτικό δίκτυο. Στο GPON κάθε οντότητα στην οποία εκχωρείται εύρος ζώνης στη ροή ανόδου συμβολίζεται με μια ταυτότητα εκχώρησης Alloc-ID (allocation ID).

Α΄.1 Περιγραφείς Κίνησης

Σε κάθε Alloc-ID παρέχεται ένας περιγραφέας κίνησης (traffic descriptor) που καθορίζει τρία διαφορετικά είδη εύρους ζώνης: ένα σταθερό εύρος ζώνης (fixed bandwidth), ένα εξασφαλισμένο εύρος ζώνης (assured bandwidth) και ένα μέγιστο εύρος ζώνης (maximum bandwidth). Το σταθερό εύρος ζώνης αναπαριστά το ποσοστό της χωρητικότητας της ροής ανόδου την οποία εκχωρεί στατικά το OLT (Optical Line Terminal) σε δεδομένη Alloc-ID, ανεξαρτήτως των απαιτήσεων της κίνησης που έχει αυτή ή του συνολικού φόρτου στο οπτικό δίκτυο. Το διασφαλισμένο εύρος ζώνης αναπαριστά το ποσοστό της χωρητικότητας της ροής ανόδου που αναμένεται να εκχωρήσει το OLT σε μια δεδομένη Alloc-ID, εφόσον αυτό απαιτηθεί από την κίνηση που ικανοποιεί η ONU, ανεξαρτήτως του συνολικού φόρτου στο οπτικό δίκτυο. Σημειώνεται, ότι εφόσον ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της κίνησης, το OLT μπορεί να εκχωρήσει μέρος ή το σύνολο του διασφαλισμένου εύρους ζώνης σε άλλες Alloc-IDs. Τέλος, το μέγιστο εύρος ζώνης αναπαριστά το άνω όριο του συνολικού εύρους ζώνης το οποίο μπορεί να εκχωρηθεί σε μια Alloc-ID.

Πέραν αυτών, ο περιγραφέας της κίνησης περιλαμβάνει και έναν τριαδικό δείκτη επιλεξιμότητας για επιπλέον εκχώρηση εύρους ζώνης. Οι τιμές του δείκτη αυτού σχετίζονται με το μη διασφαλισμένο διαμοιρασμό, το διαμοιρασμό βέλτιστης προσπάθειας ή τον καθόλου διαμοιρασμό των πόρων. Επομένως, ο περιγραφέας της κίνησης για μια Alloc-ID i , μπορεί να αναπαρασταθεί από το διάνυσμα

$$D^i = \langle R_F^i, R_A^i, R_M^i, \chi_{AB}^i \rangle \quad (A'.1)$$

όπου $\mathbf{R}_F \geq 0$ συμβολίζει το σταθερό εύρος ζώνης, $\mathbf{R}_A \geq 0$ συμβολίζει το διασφαλισμένο εύρος ζώνης, $\mathbf{R}_M > 0$ συμβολίζει το μέγιστο εύρος ζώνης και χ_{AB}^i είναι ο δείκτης επιλεξιμότητας.

Με βάση τα παραπάνω, το εύρος ζώνης $R^i(t)$ που εκχωρείται σε μια Alloc-ID αποτελείται από ένα εγγυημένο εύρος ζώνης $R_G(t)$ και ένα επιπρόσθετο εύρος ζώνης που αφορά είτε το μη διασφαλισμένο εύρος ζώνης $R_{NA}(t)$, είτε το εύρος ζώνης βέλτιστης προσπάθειας $R_{BE}(t)$. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι

$$R^i(t) = \begin{cases} R_G^i(t) + R_{NA}^i(t) & \text{αν } \chi_{AB}^i = \text{NA} \\ R_G^i(t) + R_{BE}^i(t) & \text{αν } \chi_{AB}^i = \text{BE} \end{cases} \quad (A'.2)$$

A'.2 Εγγυημένο Εύρος Ζώνης

Υποθέτοντας ότι ισχύει η βασική συνθήκη ευστάθειας,

$$\sum_i (R_F^i + R_A^i) \leq C \quad (A'.3)$$

όπου C είναι η χωρητικότητα της άνω ροής, τότε το εγγυημένο εύρος ζώνης δίδεται από τον τύπο

$$R_G^i(t) = \min\{R_F^i + R_A^i, \max[R_F^i, R_L^i(t)]\} \quad (A'.4)$$

όπου $R_L^i(t)$ είναι το προσφερόμενο φορτίο κίνησης. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι η ελάχιστη τιμή του εγγυημένου εύρους ζώνης είναι R_F^i , ενώ η μέγιστη τιμή του είναι $R_A^i + R_F^i$.

A'.3 Μη Διασφαλισμένο Εύρος Ζώνης

Το μη διασφαλισμένο εύρος ζώνης αποτελεί ένα επιπρόσθετο εύρος ζώνης που το OLT εκχωρεί δυναμικά σε μια Alloc-ID σε αναλογία με το άθροισμα του σταθερού και του διασφαλισμένου εύρους ζώνης. Το μέγεθος του εύρους ζώνης που εκχωρείται ως μη διασφαλισμένο ισούται με την εναπομείνουσα χωρητικότητα της ζεύξης ανόδου όταν εκχωρηθεί το εγγυημένο εύρος ζώνης όλων των Alloc-ID. Το μέγεθος αυτό δίδεται από τη σχέση

$$S_{NA}(t) = C - \sum_i \min\{R_F^i + R_A^i, \max[R_F^i, R_L^i(t)]\} \quad (A'.5)$$

Το κριτήριο δικαιοσύνης που χρησιμοποιείται για το διαμοιρασμό του μη διασφαλισμένου εύρους ζώνης θεωρείται απλό. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες κίνησης, σε δύο επιλέξιμες ($\chi_{AB} = \text{NA}$) και μη κορεσμένες ($R_G(t) + R_{NA}(t) < \min[R_M, R_L(t)]$) Alloc-ID i και j θα εκχωρηθεί μη διασφαλισμένο εύρος ζώνης που ιδανικά ικανοποιεί τη συνθήκη

$$\frac{R_{NA}^i(t)}{R_F^i + R_A^i} = \frac{R_{NA}^j(t)}{R_F^j + R_A^j} \quad (A'.6)$$

Σημειώνεται ότι για μια επιλέξιμη Alloc-ID για την οποία το μερίδιο του μη διασφαλισμένου εύρους ζώνης που έχει υπολογιστεί με βάση το παραπάνω κριτήριο οδηγεί σε κορεσμό ($R_G(t) + R_{NA}(t) \geq \min[R_M, R_L(t)]$), τότε το εκχωρημένο εύρος ζώνης πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$R(t) = \min\{R_M, R_L(t)\} \quad (A'.7)$$

A'.4 Εύρος Ζώνης Βέλτιστης Προσπάθειας

Το εύρος ζώνης βέλτιστης προσπάθειας αποτελεί μια μορφή επιπλέον εύρους ζώνης το οποίο το OLT εκχωρεί δυναμικά στις επιλέξιμες Alloc-ID, σε αναλογία με το μη εγγυημένο ποσοστό του μέγιστου εύρους ζώνης που έχει παρασχεθεί στην Alloc-ID. Το ποσοστό της χωρητικότητας της ζεύξης ανόδου που χρησιμοποιείται για την εκχώρηση του εύρους ζώνης βέλτιστης προσπάθειας είναι η εναπομείνασα χωρητικότητα έπειτα από την εκχώρηση του εγγυημένου εύρους ζώνης και του μη διασφαλισμένου εύρους ζώνης. Το ποσοστό αυτό δίδεται από τον τύπο

$$S_{BE}(t) = C - \sum_{i \in \{\chi_{AB}^i = NA\}} \min\{R_M^i, \max[R_F^i, R_L^i(t)]\} - \sum_{i \in \{\chi_{AB}^i \neq NA\}} \min\{R_F^i + R_A^i, \max[R_F^i, R_L^i(t)]\} \quad (A'.8)$$

Το κριτήριο δικαιοσύνης που χρησιμοποιείται για το διαμοιρασμό του εύρους ζώνης βέλτιστης προσπάθειας ομοιάζει με αυτό του μη διασφαλισμένου εύρους ζώνης. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες κίνησης, σε δύο επιλέξιμες ($\chi_{AB} = BE$) και μη κορεσμένες ($R_G(t) + R_{BE}(t) < \min[R_M, R_L(t)]$) Alloc-ID i και j θα εκχωρηθεί εύρος ζώνης βέλτιστης προσπάθειας που ιδανικά ικανοποιεί τη συνθήκη

$$\frac{R_{BE}^i(t)}{R_M^i - (R_F^i + R_A^i)} = \frac{R_{BE}^j(t)}{R_M^j - (R_F^j + R_A^j)} \quad (A'.9)$$

Σημειώνεται ότι για μια επιλέξιμη Alloc-ID για την οποία το μερίδιο του εύρους ζώνης βέλτιστης προσπάθειας που έχει υπολογιστεί με βάση το παραπάνω κριτήριο οδηγεί σε κορεσμό ($R_G(t) + R_{BE}(t) \geq \min[R_M, R_L(t)]$), τότε το εκχωρημένο εύρος ζώνης πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη:

$$R(t) = \min\{R_M, R_L(t)\} \quad (A'.10)$$

A'.5 Προτεραιότητα Εκχώρησης Εύρους Ζώνης

Σύμφωνα με τα παραπάνω, καθίσταται κατανοητό ότι το μοντέλο εκχώρησης εύρους ζώνης χαρακτηρίζεται από μια αυστηρή ιεραρχική προτεραιότητα που έχει ως εξής:

- Σταθερό εύρος ζώνης (μέγιστη προτεραιότητα)
- Διασφαλισμένο εύρος ζώνης
- Μη διασφαλισμένο εύρος ζώνης
- Εύρος ζώνης βέλτιστης προσπάθειας (ελάχιστη προτεραιότητα)

Αρχικά, το OLT εκχωρεί το σταθερό εύρος ζώνης σε όλες τις Alloc-ID του οπτικού δικτύου, ανεξαρτήτως από το φορτίο της κίνησης. Έπειτα, το OLT εκχωρεί το διασφαλισμένο εύρος ζώνης σε κάθε Alloc-ID μέχρι είτε να επιτευχθεί εκχώρηση R_A , είτε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της ζήτησης. Στη συνέχεια, το OLT εκχωρεί το μη διασφαλισμένο εύρος ζώνης στις επιλέξιμες, μη κορεσμένες Alloc-ID είτε μέχρι να φτάσουν στο επίπεδο κορεσμού, είτε μέχρι να χρησιμοποιηθεί ολόκληρη η διαθέσιμη γι' αυτόν το σκοπό χωρητικότητα S_{NA} . Τέλος, το OLT εκχωρεί το εύρος ζώνης βέλτιστης προσπάθειας στις επιλέξιμες Alloc-ID που δεν έχουν κορεστεί.

Παράρτημα Β'

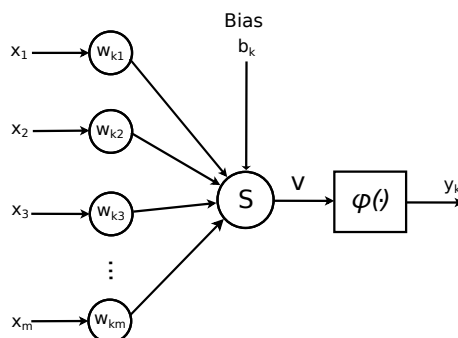
Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Στο παράρτημα αυτό, σκιαγραφούνται τα βασικά χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, περιγράφονται τα πλεονεκτήματά τους και παρουσιάζονται με συνοπτικό τρόπο τα είδη των νευρωνικών δικτύων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Β'.1 Εισαγωγή

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια ιδιαίτερη προσέγγιση στη δημιουργία συστημάτων με νοημοσύνη. Θεμελιώδης συνιστώσα για τη λειτουργία ενός νευρωνικού δικτύου αποτελεί ο τεχνητός νευρώνας [29]. Ο τεχνητός νευρώνας είναι μια υπολογιστική μονάδα που αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα Β'.1:

- Ένα σύνολο συνδέσμων που χαρακτηρίζεται από ένα βάρος. Συγκεκριμένα, ένα σήμα εισόδου x_j από το σύνδεσμο j που συνδέεται με το νευρώνα k , πολλαπλασιάζεται με το βάρος w_{kj} .
- Ένας αθροιστής, ο οποίος αθροίζει τα σήματα των εισόδων που έχουν πολλαπλασιαστεί με το ανάλογο βάρος.
- Τη συνάρτηση ενεργοποίησης $\varphi(\cdot)$, η οποία χρησιμοποιείται για να περιοριστεί το πλάτος της εξόδου του νευρώνα.



Σχήμα Β'.1: Μοντέλο τεχνητού νευρώνα.

Επιπλέον, ο τεχνητός νευρώνας περιλαμβάνει και μια εξωτερική πόλωση που συμβολίζεται με b_k και επιδρά αυξάνοντας ή μειώνοντας την είσοδο της συνάρτησης ενεργοποίησης ανάλογα με την τιμή της. Η συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να έχει διάφορες μορφές. Τα τρία βασικά είδη συναρτήσεων ενεργοποίησης είναι [6]:

- Βηματική συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή δίδει έξοδο συνήθως μονάδα όταν η τιμή που υπολογίζει ο αθροιστής είναι μεγαλύτερη από έναν συγκεκριμένο κατώφλι.
- Συνάρτηση προσήμου. Αυτό το είδος συνάρτησης δίδει έξοδο θετική ή αρνητική αν η έξοδος του αθροιστή δίδει τιμή μεγαλύτερη ή μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι.
- Λογιστική συνάρτηση. Η λογιστική συνάρτηση είναι μια σιγμοειδής συνάρτηση και η έξοδος της εκφράζεται από το γενικό τύπο

$$\varphi(v) = \frac{1}{1 + \exp(-av)} \quad (\text{B'.1})$$

όπου v είναι η έξοδος του αθροιστή και a ο συντελεστής κλίσης της συνάρτησης.

Όπως γίνεται εμφανές, το κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω συναρτήσεων είναι η μη γραμμικότητα, γεγονός που επιτρέπει στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα να χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μη γραμμικών φαινομένων.

B'.2 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα [6] είναι συστήματα επεξεργασίας δεδομένων που αποτελούνται από ένα πλήθος τεχνητών νευρώνων οργανωμένων σε δομές παρόμοιες με αυτές του ανθρώπινου εγκεφάλου. Συνήθως, οι τεχνητοί νευρώνες είναι οργανωμένοι σε μια σειρά από στρώματα ή επίπεδα. Το πρώτο στρώμα από αυτά αποτελεί το στρώμα εισόδου και χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των δεδομένων. Στη συνέχεια, μπορεί να ακολουθούν ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα στρώματα και στο τέλος υπάρχει ένα στρώμα εξόδου. Σκοπός των νευρωνικών δικτύων αποτελεί η παροχή μιας γενικευμένης πρακτικής μεθόδου εκμάθησης πραγματικών ή διακριτών συναρτήσεων μέσα από παραδείγματα. Με άλλα λόγια, σκοπός τους είναι να προσεγγίσουν μια συνάρτηση στόχο χρησιμοποιώντας ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης [54].

Οι νευρώνες μπορεί να είναι πλήρως ή μερικώς συνδεδεμένοι μεταξύ τους¹. Πλήρως συνδεδεμένοι είναι εκείνοι οι οποίοι συνδέονται με όλους τους υπόλοιπους νευρώνες, ενώ σε κάθε άλλη περίπτωση ονομάζονται μερικώς συνδεδεμένοι. Επίσης, όταν οι νευρώνες ενός στρώματος δεν συνδέονται με άλλους νευρώνες προηγούμενου στρώματος, τότε το δίκτυο ονομάζεται πρόσθιας τροφοδότησης. Σε αντίθετη περίπτωση, καθώς και στην περίπτωση συνδέσεων μεταξύ νευρώνων του ίδιου στρώματος, το δίκτυο χαρακτηρίζεται ως νευρωνικό δίκτυο με ανατροφοδότηση.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα πραγματοποιούν δύο βασικές λειτουργίες, τη μάθηση και την ανάκληση. Η μάθηση είναι η διαδικασία της τροποποίησης της τιμής των βαρών του δικτύου, ώστε δοθέντος συγκεκριμένου διανύσματος εισόδου να παραχθεί συγκεκριμένο διάνυσμα εξόδου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται επίσης και εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Αντίθετα, η ανάκληση είναι η διαδικασία του υπολογισμού ενός διανύσματος εξόδου για συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου και τιμές βαρών.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό των μη γραμμικών μεθόδων πρόβλεψης αποτελεί ο κίνδυνος εμφάνισης φαινομένων υποπροσαρμογής (ή ατελούς μάθησης) και υπερπροσαρμογής. Αν ένα νευρωνικό δίκτυο δεν είναι αρκετά πολύπλοκο μπορεί να μην καταφέρει να μοντελοποιήσει επιτυχώς τα δεδομένα εκπαίδευσης οδηγώντας σε ατελή μάθηση.

¹Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων αποκαλούνται συνάψεις.

Αντίθετα, ένα πολύπλοκο νευρωνικό δίκτυο ενδέχεται να μοντελοποιήσει υπερβολικά τα δεδομένα της εκπαίδευσης, καθώς και το θόρυβο που πιθανώς να υπάρχει με αποτέλεσμα να τα απομνημονεύσει και να μη μπορεί το δίκτυο να γενικευτεί σε νέα δεδομένα εισόδου. Για την αντιμετώπιση τέτοιων φαινομένων απαιτείται η αξιολόγηση της επίδοσης του δικτύου να γίνεται με διαφορετικά δεδομένα από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευσή του.

Β'.3 Πλεονεκτήματα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

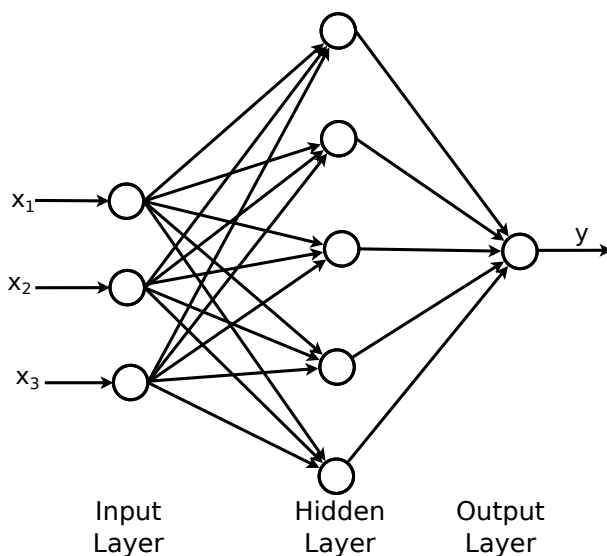
Με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, γίνεται σαφές ότι το νευρωνικό δίκτυο αντλεί την υπολογιστική του ισχύ από την παράλληλη κατανομημένη δομή του, καθώς και από την ικανότητά του να μαθαίνει και, συνεπώς, να γενικεύει. Η έννοια της γενίκευσης αναφέρεται στην ικανότητα του νευρωνικού δικτύου να δημιουργεί λογικά αποτελέσματα εξόδου για δεδομένα εισόδου τα οποία δεν χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης (μάθησης). Αυτές οι δύο δυνατότητες των νευρωνικών δικτύων, τα καθιστούν ικανά να επιλύουν σύνθετα προβλήματα. Η χρήση των νευρωνικών δικτύων προσφέρει τις παρακάτω χρήσιμες ιδιότητες [29]:

- Μη γραμμικότητα. Ένας τεχνητός νευρώνας μπορεί να είναι είτε γραμμικός, είτε μη γραμμικός. Ένα νευρωνικό δίκτυο που κατασκευάζεται από τη διασύνδεση μη γραμμικών νευρώνων είναι κι αυτό μη γραμμικό. Η ιδιότητά τους αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, ειδικά στην περίπτωση που η συνάρτηση στόχος είναι εκ φύσεως μη γραμμική.
- Εκμάθηση μέσω παραδειγμάτων. Μια ευρέως διαδεδομένη τεχνική μηχανικής μάθησης θεωρείται η εκμάθηση με επίβλεψη κατά την οποία τα βάρη του νευρωνικού δικτύου τροποποιούνται με βάση ένα σύνολο δεδομένων εκμάθησης. Συγκεκριμένα, για την εκμάθηση χρησιμοποιείται ένα σύνολο δεδομένων εισόδου μαζί με τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, τα βάρη του νευρωνικού δικτύου τροποποιούνται κατάλληλα προκειμένου το σφάλμα της εξόδου του νευρωνικού και της επιθυμητής εξόδου να ελαχιστοποιείται. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται όταν το δίκτυο φτάσει σε μια ευσταθή κατάσταση κατά την οποία δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες τροποποιήσεις στα βάρη των συνδέσμων. Επομένως, το νευρωνικό δίκτυο μαθαίνει μέσα από παραδείγματα κατασκευάζοντας, κατάλληλες αντιστοιχίσεις μεταξύ δεδομένων εισόδου και εξόδου.
- Προσαρμοστικότητα. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν την ιδιότητα να προσαρμόζουν τα βάρη ανάλογα με τις αλλαγές στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα, ένα νευρωνικό δίκτυο που έχει εκπαιδευτεί για να λειτουργεί σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον μπορεί να επανεκπαιδευτεί προκειμένου να ανταπεξέλθει σε μικρές αλλαγές των συνθηκών του περιβάλλοντος.
- Ανοχή σε εσφαλμένα δεδομένα εισόδου. Τα νευρωνικά δίκτυα εφαρμόζουν μεθόδους εκμάθησης που χαρακτηρίζονται από ευρωστία ως προς την ύπαρξη σφαλμάτων ή θορύβου στα δεδομένα εκπαίδευσης.

- Καθολική ανάλυση και σχεδιασμός. Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των νευρωνικών δικτύων ακολουθεί ορισμένους κοινούς καθολικούς κανόνες και συμβολισμούς. Θεμελιώδης και κοινή οντότητα των νευρωνικών δικτύων είναι ο τεχνητός νευρώνας, ενώ η κατασκευή των διαφορετικών ειδών νευρωνικών δικτύων βασίζεται στη διασύνδεση μεταξύ των διαφορετικών νευρώνων. Αυτά τα κοινά χαρακτηριστικά επιτρέπουν σε θεωρίες και αλγόριθμους που βασίζονται σε διαφορετικές εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων να γίνονται κατανοητά από όλους τους ερευνητές που ασχολούνται με αυτά.
- Αναλογίες με τον τομέα της Νευροβιολογίας. Ο σχεδιασμός ενός νευρωνικού δικτύου είναι επηρεασμένος από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία αποδεικνύουν την ικανότητα ύπαρξης συστημάτων παράλληλης επεξεργασίας με ανοχή στα σφάλματα. Η αναλογία αυτή επιτρέπει στους ερευνητές από τους τομείς της μηχανικής και της νευροβιολογίας να ανταλλάσσουν τεχνογνωσία εξελίσσοντας τον τομέα των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι μεν νευροβιολόγοι χρησιμοποιώντας τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την επεξήγηση φαινομένων της νευροβιολογίας, και οι δε μηχανικοί δανειζόμενοι ιδέες από τη νευροβιολογία για την επίλυση νέων πολύπλοκων προβλημάτων.

Β'.4 Πολυστρωματικά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα (Multilayer Perceptrons - MLP) αποτελούν την πιο διαδεδομένη υλοποίηση νευρωνικών δικτύων [29]. Η δομή ενός πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου αποτελείται από ένα στρώμα εισόδου, ένα ή περισσότερα κρυμμένα στρώματα και ένα στρώμα εξόδου, ενώ το σήμα της εισόδου διαδίδεται ανάμεσα στα στρώματα του δικτύου σε εμπρόσθια κατεύθυνση, όπως φαίνεται στο Σχήμα Β'.2. Τα δίκτυα αυτά έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων, ενώ ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος εκπαίδευσής τους είναι αυτός της οπισθόφορης διάδοσης του σφάλματος (backpropagation).



Σχήμα Β'.2: Παράδειγμα πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου.

Ένα πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- Το μοντέλο κάθε νευρώνα του δικτύου περιλαμβάνει μια μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία είναι ομαλή (δηλ. διαφορίσιμη παντού). Μια συνάρτηση που χρησιμοποιείται ευρέως για το σκοπό αυτό είναι η σιγμοειδής συνάρτηση:

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (\text{B'.2})$$

όπου v_j είναι το σταθμισμένο άθροισμα όλων των συνδέσμων εισόδου και της πόλωσης για έναν νευρώνα j , και με y_j συμβολίζεται η έξοδος του νευρώνα.

- Το δίκτυο περιλαμβάνει ένα ή περισσότερα κρυμμένα στρώματα νευρώνων που δεν συμπεριλαμβάνονται στα στρώματα εισόδου και εξόδου. Οι κρυμμένοι αυτοί νευρώνες επιτρέπουν στο δίκτυο να «μάθει» πολύπλοκες εργασίες/συναρτήσεις, εξάγοντας σταδιακά πιο ουσιαστικά χαρακτηριστικά από τα δεδομένα εισόδου. Υποστηρίζεται ότι κάθε συνάρτηση στόχος, μπορεί να προσεγγιστεί με μεγάλη ακρίβεια από ένα νευρωνικό δίκτυο τριών στρωμάτων [54].
- Το δίκτυο χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο βαθμό συνδεσιμότητας, ο οποίος καθορίζεται από τον αριθμό των συνάψεων. Οι νευρώνες κάθε στρώματος είναι πλήρως συνδεδεμένοι με τους νευρώνες του ακόλουθου στρώματος.

Ο συνδυασμός των παραπάνω χαρακτηριστικών μαζί με την ικανότητά τους να μαθαίνουν μέσα από παραδείγματα καθιστά τα πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα ένα ισχυρό υπολογιστικό εργαλείο.

Σημαντικό ζήτημα στην κατασκευή ενός πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου είναι ο αριθμός των νευρώνων στο κρυμμένο στρώμα. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρός τότε το νευρωνικό δίκτυο μπορεί να μην είναι ικανό να προσεγγίσει τη συνάρτηση στόχο (υποπροσαρμογή). Αντίθετα, αν ο αριθμός είναι μεγάλος τότε το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει στην υπερπροσαρμογή του δικτύου, με άμεσο αποτέλεσμα τη χαμηλή επίδοση σε νέα δεδομένα. Γίνεται, λοιπόν, εμφανής η σημασία της σωστής επιλογής του αριθμού των νευρώνων του κρυμμένου στρώματος για τη βελτίωση της επίδοσης του πολυστρωματικού νευρωνικού δικτύου.

Τέλος, σημειώνεται ότι στα πλαίσια της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν πολυστρωματικά νευρωνικά δίκτυα με τρία στρώματα, ενώ ο υπολογισμός των βαρών των συνάψεων του δικτύου έγινε με τη χρήση του αλγορίθμου συζευγμένης κλίσης (conjugate gradient).

Β'.5 Δίκτυα Ομαδικής Μεθόδου Διαχείρισης Δεδομένων

Τα δίκτυα ομαδικής μεθόδου διαχείρισης δεδομένων (Group Method for Data Handling - GMDH) αποτελούν μια τεχνική που προτάθηκε από τον Ivakhnenko το 1966 για την κατασκευή ενός υψηλού βαθμού πολυωνύμου παλινδρόμησης [35]. Η μέθοδος αυτή αποτελεί ιδανική επιλογή για την περίπτωση πολύπλοκων μη δομημένων συστημάτων που απαιτείται η δημιουργία μιας συνάρτησης υψηλής τάξης που να συσχετίζει τα δεδομένα εισόδου με τα δεδομένα εξόδου [23].

Ο βασικός αλγόριθμος αποτελεί μια διαδικασία κατασκευής ενός υψηλής τάξης πολυωνύμου της μορφής

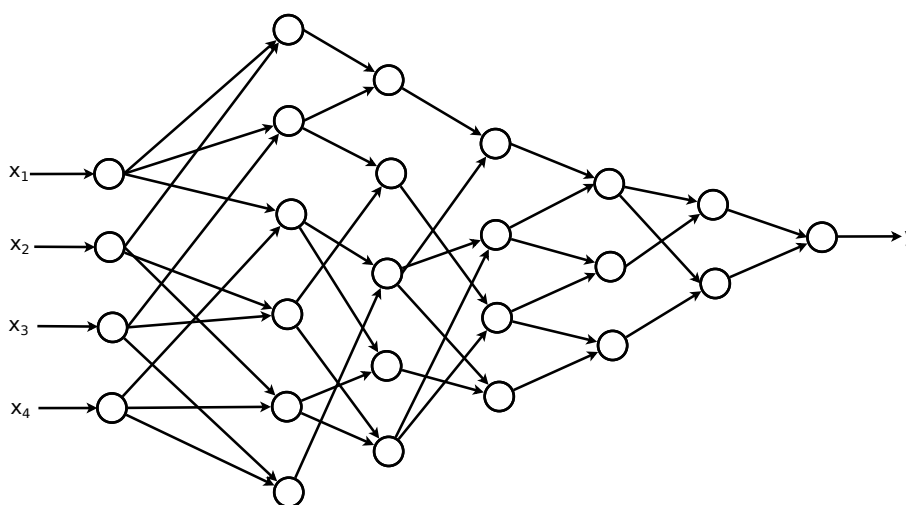
$$y = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m d_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (\text{B'.3})$$

όπου τα $a, b_i, c_{ij}, d_{ijk}, \dots$ είναι οι συντελεστές του πολυωνύμου. Το πολυώνυμο αυτό συσχετίζει m μεταβλητές εισόδου (x_1, x_2, \dots, x_m) με μια μεταβλητή εξόδου y .

Η κατασκευή ενός τέτοιου πολυωνύμου διαφέρει από τις συμβατικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση παλινδρόμησης, και μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ενός νευρωνικού δικτύου όπου κάθε νευρώνας έχει δύο εισόδους και συνάρτηση μεταφοράς της μορφής [61]:

$$z = A + Bu + Cv + Du^2 + Ev^2 + Fuv \quad (\text{B'.4})$$

όπου u, v συμβολίζουν τις εισόδους του νευρώνα, τα A, B, C, D, E, F είναι παράμετροι του μοντέλου και z είναι η βέλτιστη προσαρμογή (best fit) της εξαρτημένης μεταβλητής y . Εξαιτίας της μορφής της σχέσης (B'.4), αναμένεται ότι κάθε επίπεδο του νευρωνικού δικτύου θα διπλασιάζει το βαθμό του πολυωνύμου. Σημειώνεται ότι η αύξηση του βαθμού του πολυωνύμου, οδηγεί στη βελτίωση της επίδοσης του νευρωνικού δικτύου. Ωστόσο, υπάρχει ένας βέλτιστος βαθμός πολυωνύμου, πέραν του οποίου το δίκτυο εκφυλίζεται και η επίδοσή του υποβαθμίζεται. Η υλοποίηση του αλγορίθμου αυτού με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρουσιάζεται στο Σχήμα Β'.3.



Σχήμα Β'.3: Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου ομαδικής μεθόδου διαχείρισης δεδομένων.

Τέλος, σημειώνεται ότι τα δίκτυα GMDH αποτελούν αυτο-οργανούμενα δίκτυα υπό την έννοια ότι οι ενώσεις μεταξύ των νευρώνων δεν είναι σταθερές αλλά επιλέγονται κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης για τη βελτιστοποίηση του δικτύου.

Β'.6 Νευρωνικά Δίκτυα Γενικευμένης Παλινδρόμησης

Τα νευρωνικά δίκτυα γενικευμένης παλινδρόμησης (General Regression Neural Networks - GRNN) είναι ένας αλγόριθμος μοναδικής προσπέλασης που επιτυγχάνει την ταχεία σύγκλιση με την επιφάνεια παλινδρόμησης (γραμμική ή μη γραμμική). Προτάθηκε

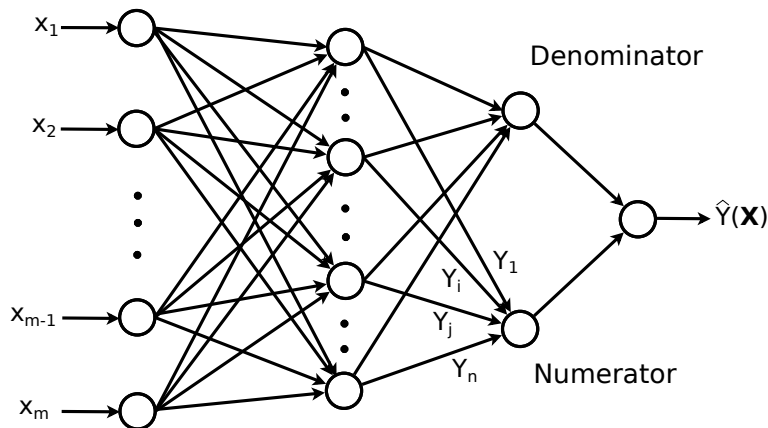
από τον Specht το 1991 και αποτελεί ένα νευρωνικό δίκτυο με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά [82].

Υποθέτοντας ότι τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου μπορούν να εκφραστούν σε ζεύγη (\mathbf{x}, y) , όπου το \mathbf{x} αποτελεί μια διανυσματική τυχαία μεταβλητή και το y μια βαθμωτή τυχαία μεταβλητή τότε η εκτίμηση δίδεται από τον τύπο

$$\hat{Y}(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{i=1}^n Y^i \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{D_i^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (\text{B'.5})$$

$$D_i^2 = (\mathbf{X} - \mathbf{X}^i)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}^i) \quad (\text{B'.6})$$

όπου \mathbf{X} είναι μια συγκεκριμένη τιμή της τυχαίας μεταβλητής \mathbf{x} , n είναι ο αριθμός των παρατηρήσεων του δείγματος, \mathbf{X}^i και Y^i είναι οι τιμές του δείγματος των τυχαίων μεταβλητών \mathbf{x} και y , και σ είναι η παράμετρος εξομάλυνσης. Η έξοδος $\hat{Y}(\mathbf{X})$, που δίδεται από τη σχέση (B'.5), μπορεί να ερμηνευτεί ως ένας σταθμισμένος μέσος όρος των τιμών Y^i που παρατηρήθηκαν, όπου η στάθμιση έχει γίνει εκθετικά με βάση την Ευκλείδεια απόσταση από τη μετρούμενη τιμή \mathbf{X} . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το εύρος των τιμών της εξόδου περιορίζεται από το εύρος των τιμών του ίδιου του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση. Η υλοποίηση του αλγορίθμου με χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων απεικονίζεται στο Σχήμα Β'.4.



Σχήμα Β'.4: Παράδειγμα νευρωνικού δικτύου γενικευμένης παλινδρόμησης.

Ένα σημαντικό ζήτημα στη δημιουργία του δικτύου GRNN αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου εξομάλυνσης σ . Η τιμή της παραμέτρου καθορίζεται συνήθως πειραματικά και προσδιορίζει πόσο αυστηρά το δίκτυο GRNN ταιριάζει το αποτέλεσμα της πρόβλεψης με τα δεδομένα του συνόλου εκπαίδευσης.

Τα βασικά πλεονεκτήματα ενός δικτύου GRNN είναι η ικανότητά του για γρήγορη εκμάθηση και η δυνατότητά του να συγκλίνει στη βέλτιστη επιφάνεια παλινδρόμησης καθώς ο αριθμός των δειγμάτων αυξάνεται. Η χρήση ενός δικτύου GRNN ενδείκνυται κυρίως σε περιπτώσεις που τα δεδομένα είναι αραιά, καθιστώντας το ιδανικό σε συνθήκες πραγματικού χρόνου, διότι η επιφάνεια παλινδρόμησης ορίζεται άμεσα σε όλο το χώρο, ακόμα και στην περίπτωση ενός μόνο δείγματος. Ειδικότερα, στην περίπτωση ενός μόνο δείγματος, η εκτίμηση για τη τιμή του \hat{Y} θα είναι ίδια με τη μοναδική παρατηρηθείσα τιμή, ανεξαρτήτως από το διάνυσμα εισόδου \mathbf{X} . Ένα δεύτερο δείγμα θα διαιρέσει τον υπερχώρο σε δύο μισά με μια ομαλή περιοχή μετάβασης ανάμεσά τους, ενώ η επιφάνεια αυτή που δημιουργείται, γίνεται σταδιακά πιο πολύπλοκη με την προσθήκη νέων δειγμάτων.

Παράρτημα Γ'

Εξελικτική Θεωρία Παιγνίων

Σκοπός του παραρτήματος αυτού είναι να εισάγει τον αναγνώστη στις βασικές έννοιες της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων, στις διαφορές που υπάρχουν με την κλασσική θεωρία παιγνίων, καθώς και να διατυπώσει όλα τα απαραίτητα θεωρήματα τα οποία χρησιμοποιούνται μέσα στο κύριο σώμα της διατριβής.

Γ'.1 Εισαγωγή

Η κλασσική θεωρία παιγνίων [65] έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία προκειμένου να μοντελοποιήσει φαινόμενα που παρατηρούνται όταν ένας αριθμός παικτών που λαμβάνει κάποιες αποφάσεις αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Μια βασική παραδοχή που γίνεται στη θεωρία παιγνίων είναι ότι οι παίκτες λαμβάνουν αποφάσεις με ορθολογικό τρόπο προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν το όφελός τους, λαμβάνοντας υπόψη τους τη συμπεριφορά των υπολοίπων παικτών. Αποτέλεσμα αυτού είναι το γεγονός ότι η λύση ενός τέτοιου παιγνίου είναι στατική.

Εν αντιθέσει με την κλασσική θεωρία παιγνίων, η εξελικτική θεωρία παιγνίων [92] δεν βασίζεται στην παραδοχή της ορθολογικότητας, και μελετάει την αλληλεπίδραση πληθυσμών και όχι παικτών. Στην εξελικτική θεωρία παιγνίων, οι πληθυσμοί αποτελούνται από πράκτορες, οι οποίοι εφαρμόζουν σταθερές στρατηγικές και αλληλεπιδρούν τυχαία με άλλους πράκτορες. Οι πληθυσμοί μπορούν να μάθουν, να προσαρμοστούν και να εξελιχθούν. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων είναι ότι το όφελος μεταφράζεται ως φυσική κατάσταση και η επιτυχία στο παίγνιο ως επιτυχία αναπαραγωγής. Συνεπώς, λοιπόν, οι στρατηγικές που είναι επιτυχημένες (καλύτερες από το μέσο όρο) μέσα στον πληθυσμό αναπαράγονται γρηγορότερα, ενώ οι λιγότερο επιτυχημένες (χειρότερες από το μέσο όρο) στρατηγικές εξαλείφονται.

Γ'.2 Δυναμική των αντιγραφών

Η δυναμική των αντιγραφών (replicator dynamics) προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Taylor και Jonker [84] και χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει τις αλληλεπιδράσεις μη ορθολογικών πληθυσμών σε ένα παίγνιο. Η δυναμική των αντιγραφών περιγράφει την εξέλιξη των συχνοτήτων με τις οποίες απαντώνται οι στρατηγικές μέσα σε έναν πληθυσμό και μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα σύστημα συνήθων διαφορικών εξισώσεων στο μοναδιαίο πολυτόπο (Simplex) S_n [92]. Στη δυναμική των αντιγραφών γίνεται η παραδοχή ότι η συχνότητα x_i μιας στρατηγικής i είναι το ποσοστό του

πληθυσμού που χρησιμοποιεί αυτή τη στρατηγική. Η φυσική κατάσταση (όφελος) π_i μιας καθαρής στρατηγικής i είναι συνάρτηση της σύνθεσης του πληθυσμού, δηλαδή της κατάστασης \mathbf{x} .

Αν ο πληθυσμός είναι πολύ μεγάλος και οι γενεές συνδυάζονται συνεχώς, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι το διάνυσμα $\mathbf{x}(t)$ εξελίσσεται στον μοναδιαίο πολυτόπο S_n σαν διαφορίσιμη συνάρτηση του t . Ο ρυθμός ανάπτυξης \dot{x}_i/x_i του μεριδίου του πληθυσμού που χρησιμοποιεί την καθαρή στρατηγική i είναι ένα μέτρο της εξελικτικής του επιτυχίας [30]. Η επιτυχία αυτή εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ του οφέλους π_i της καθαρής στρατηγικής i και του μέσου οφέλους $\bar{\pi}(\mathbf{x}) = \sum_i (x_i \pi_i(\mathbf{x}))$, δηλαδή,

$$\frac{\dot{x}_i}{x_i} = \text{όφελος καθαρής στρατηγικής } i - \text{μέσο όφελος} \quad (\Gamma'.1)$$

από την οποία προκύπτει η εξίσωση της δυναμικής των αντιγραφών

$$\dot{x}_i = x_i [\pi_i(\mathbf{x}) - \bar{\pi}(\mathbf{x})] \quad (\Gamma'.2)$$

για $i = 1, \dots, n$.

Το άθροισμα $S = x_1 + \dots + x_n$ ικανοποιεί την εξίσωση

$$\dot{S} = (1 - S)\bar{\pi} \quad (\Gamma'.3)$$

η οποία έχει ως λύση την $S(t) = 1$. Επομένως, αν η λύση της δυναμικής των αντιγραφών ξεκινάει από το επίπεδο $\sum_n x_i = 1$, τότε παραμένει στο επίπεδο αυτό [30].

Στην περίπτωση που το όφελος π_i έχει γραμμική μορφή, τότε υπάρχει ένας $n \times n$ πίνακας $\mathbf{A} = (A_{ij})$ τέτοιος ώστε $\pi_i(\mathbf{x}) = (\mathbf{A}\mathbf{x})_i$. Επομένως, η εξίσωση της δυναμικής των αντιγραφών λαμβάνει τη μορφή [30]

$$\dot{x}_i = x_i [(\mathbf{A}\mathbf{x})_i - \mathbf{x} \cdot \mathbf{A}\mathbf{x}] \quad (\Gamma'.4)$$

Γ'.3 Εξελικτικά Ευσταθείς Στρατηγικές

Μια βασική έννοια της εξελικτικής θεωρίας παιγνίων αποτελεί η εξελικτικά ευσταθής στρατηγική (evolutionary stable strategy). Μια εξελικτικά ευσταθής στρατηγική είναι μια στρατηγική η οποία αν υιοθετηθεί από τον πληθυσμό, τότε καμία άλλη στρατηγική δεν μπορεί να εισβάλει στον πληθυσμό αυτό, δεδομένου ότι η νέα στρατηγική δεν ξεπερνάει κάποιο κατώφλι (φράγμα εισβολής). Για να γίνει αυτό κατανοητό, γίνεται η υπόθεση ότι στον πληθυσμό υπάρχει μια επικρατούσα στρατηγική $\hat{\mathbf{x}}$, και ένα μερίδιο $\epsilon \in (0, 1)$ πρακτόρων που έχουν υποστεί μετάλλαξη και χρησιμοποιούν μια νέα στρατηγική \mathbf{x} εισβάλει στον αρχικό πληθυσμό. Ο νέος πληθυσμός που διαμορφώνεται είναι $\epsilon\mathbf{x} + (1 - \epsilon)\hat{\mathbf{x}}$. Η στρατηγική $\hat{\mathbf{x}}$ θεωρείται μια εξελικτικά ευσταθής στρατηγική αν για όλα τα $\mathbf{x} \in S_n$ με $\hat{\mathbf{x}} \neq \mathbf{x}$, ισχύει η ανισότητα (Γ'.5) για όλα τα ϵ που είναι επαρκώς μικρά, δηλαδή μικρότερα από ένα φράγμα εισβολής $\bar{\epsilon}(\mathbf{x}) > 0$.

$$\mathbf{x} \cdot \mathbf{A} [\epsilon\mathbf{x} + (1 - \epsilon)\hat{\mathbf{x}}] < \hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{A} [\epsilon\mathbf{x} + (1 - \epsilon)\hat{\mathbf{x}}] \quad (\Gamma'.5)$$

Σημειώνεται ότι μια εξελικτικά ευσταθής στρατηγική είναι ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας υπό τη δυναμική των αντιγραφών. Ωστόσο, το αντίστροφο δεν ισχύει πάντοτε. Τέλος, με βάση τον ορισμό μιας εξελικτικά ευσταθούς στρατηγικής προκύπτει το συμπέρασμα ότι ένα αυστηρό σημείο ισορροπίας κατά Nash (strict Nash equilibrium) συνεπάγεται μια εξελικτικά ευσταθή κατάσταση.

Γ'.4 Ασύμμετρα Παίγνια

Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση παιγνίων αποτελούν τα ασύμμετρα παίγνια (asymmetric games), στα οποία οι παίκτες έχουν διαφορετικό σύνολο στρατηγικών και ωφελειών. Στην περίπτωση αυτή, γίνεται η υπόθεση ότι ο παίκτης I έχει n στρατηγικές και έναν πίνακα οφέλους \mathbf{A} , ενώ ο παίκτης II έχει m στρατηγικές και έναν πίνακα οφέλους \mathbf{B}^T . Επομένως, ο παίκτης I που χρησιμοποιεί τη στρατηγική i ενάντια στον παίκτη II που χρησιμοποιεί τη στρατηγική j , αποκτά ένα όφελος A_{ij} , ενώ ο αντίπαλός του αποκτά όφελος B_{ij} . Η μεικτή στρατηγική του παίκτη I συμβολίζεται με $\mathbf{x} \in S_n$, ενώ για τον παίκτη II με $\mathbf{y} \in S_m$. Τα αντίστοιχα οφέλη για τις στρατηγικές αυτές είναι $\mathbf{x} \cdot \mathbf{A}\mathbf{y}$ και $\mathbf{y} \cdot \mathbf{B}^T\mathbf{x}$ [30].

Ο συνδυασμός στρατηγικών $(\mathbf{x}^*, \mathbf{y}^*) \in S_n \times S_m$ λέγεται ότι αποτελεί σημείο ισορροπίας κατά Nash αν το \mathbf{x}^* είναι η βέλτιστη απάντηση στη στρατηγική \mathbf{y}^* και η στρατηγική \mathbf{y}^* είναι η βέλτιστη επιλογή ενάντια στη στρατηγική \mathbf{x}^* , δηλαδή αν

$$\mathbf{x} \cdot \mathbf{A}\mathbf{y}^* \leq \mathbf{x}^* \cdot \mathbf{A}\mathbf{y}^* \quad (\Gamma'.6)$$

για όλα τα $\mathbf{x} \in S_n$ και

$$\mathbf{y} \cdot \mathbf{B}^T\mathbf{x}^* \leq \mathbf{y}^* \cdot \mathbf{B}^T\mathbf{x}^* \quad (\Gamma'.7)$$

για όλα τα $\mathbf{y} \in S_m$. Στα ασύμμετρα παίγνια, το σύνολο των σημείων ισορροπίας είναι πάντα μη κενό.

Υποθέτοντας ότι $\mathbf{x} \in S_n$ και $\mathbf{y} \in S_m$ υποδηλώνουν τις συχνότητες των στρατηγικών για τους παίκτες, και το όφελος π_i είναι γραμμικό, τότε η δυναμική των αντιγραφών λαμβάνει τη μορφή [30]

$$\dot{x}_i = x_i [(\mathbf{A}\mathbf{y})_i - \mathbf{x} \cdot \mathbf{A}\mathbf{y}] \quad (\Gamma'.8\alpha')$$

$$\dot{y}_j = y_j [(\mathbf{B}^T\mathbf{x})_j - \mathbf{y} \cdot \mathbf{B}^T\mathbf{x}] \quad (\Gamma'.8\beta')$$

για $i = 1, \dots, n$ και $j = 1, \dots, m$.

Στα ασύμμετρα παίγνια, μια εξελικτικά ευσταθής στρατηγική είναι ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας της δυναμικής των αντιγραφών [25]. Ωστόσο, μια εξελικτικά ευσταθής στρατηγική πρέπει να είναι αυστηρό σημείο ισορροπίας κατά Nash. Σημειώνεται ότι ένα αυστηρό σημείο ισορροπίας κατά Nash αποτελείται από καθαρές στρατηγικές, δηλαδή, οι παίκτες I και II πρέπει να είναι μονομορφικοί στο σημείο ισορροπίας. Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει το ακόλουθο θεώρημα

Θεώρημα Γ'.4.1. Σε ένα ασύμμετρο παίγνιο, ένα σημείο ισορροπία κατά Nash που αποτελείται από αυστηρώς μεικτές στρατηγικές δεν είναι ασυμπτωτικά ευσταθές υπό τη δυναμική των αντιγραφών [25].

Παράρτημα Δ'

Αποδείξεις Θεωρημάτων

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται οι αποδείξεις των θεωρημάτων της διατριβής.

Δ'.1 Απόδειξη Θεωρήματος 4.5.1

Επιλύοντας τις εξισώσεις (4.4) προκύπτει ότι υπάρχουν N σημεία ισορροπίας στο σύνορο της επιφάνειας $\sum_{f \in \mathbf{F}} x_f = 1$ και ένα σημείο ισορροπίας στο εσωτερικό αυτής. Χρησιμοποιώντας τεχνικές γραμμικοποίησης για τον υπολογισμό της Ιακωβιανής μήτρας (Jacobian matrix) στα σημεία ισορροπίας του συστήματος εξισώσεων και απλή άλγεβρα πινάκων, συμπεραίνεται ότι μόνο τα σημεία ισορροπίας στο σύνορο της επιφάνειας έχουν μη μηδενικές ιδιοτιμές, οι οποίες για το k σημείο ισορροπίας, όπου $k \in \mathbf{F}$, δίδονται από τους τύπους

$$\lambda_j^{(k)} = \begin{cases} \mathcal{U}_j - \mathcal{U}_k & \text{αν } j \neq k \\ \mathcal{U}_1 - \mathcal{U}_k & \text{αν } j = k \end{cases} \quad (\Delta'.1)$$

για $j = 1/N, \dots, (N-1)/N$.

Επομένως, υπάρχει μια συχνότητα εκπαίδευσης $f^* \in \mathbf{F}$, $f^* = \arg \max_{f \in \mathbf{F}} \mathcal{U}_f$, για την οποία όλες οι παραπάνω ιδιοτιμές έχουν αρνητικό πραγματικό μέρος, και επομένως αντιστοιχεί σε ένα ασυμπτωτικά ευσταθές σημείο ισορροπίας.

Δ'.2 Απόδειξη Θεωρήματος 4.5.2

Για τη βέλτιστη συχνότητα εκπαίδευσης f^* , ισχύει ότι $\mathcal{U}_{f^*} > \mathcal{U}_j$ όπου $j \neq f^* \in \mathbf{F}$. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.3) και τη μονοτονική ιδιότητα του οφέλους S_f και του κόστους C_f , προκύπτει ο τύπος (4.5).

Δ'.3 Απόδειξη Θεωρήματος 6.1.1

Αποδεικνύεται εύκολα ότι το σύστημα διαθέτει N σημεία ισορροπίας κατά Nash σε καθαρές στρατηγικές, ήτοι (C_k, C_k) για $k \in [1, \dots, N]$ και ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash σε μεικτές στρατηγικές. Σύμφωνα με το Θεώρημα Γ'.4.1, ένα σημείο ισορροπίας σε μεικτές στρατηγικές δεν μπορεί να είναι ασυμπτωτικά ευσταθές, και επομένως δεν μελετάται περαιτέρω. Για την περίπτωση των σημείων ισορροπίας σε καθαρές

στρατηγικές, χρησιμοποιώντας τεχνικές γραμμικοποίησης, ο k Ιακωβιανός πίνακας που υπολογίζεται στο σημείο ισορροπίας $(\mathcal{C}_k, \mathcal{C}_k)$, $k \in [1, \dots, N]$ είναι

$$\mathbf{J}^{(k)} = \left[\begin{array}{c|c} \mathbf{W} & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & \mathbf{Q} \end{array} \right]$$

όπου οι \mathbf{W} και \mathbf{Q} είναι $(N-1) \times (N-1)$ πίνακες με στοιχεία

$$W_{ii} = \begin{cases} r_{BS}(A_{ik} - A_{kk}) & \text{αν } i \neq k \\ r_{BS}(A_{Nk} - A_{kk}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.2\alpha')$$

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{αν } i \neq k \\ r_{BS}(A_{Nk} - A_{jk}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.2\beta')$$

$$Q_{ii} = \begin{cases} r_S(B_{ki} - B_{kk}) & \text{αν } i \neq k \\ r_S(B_{kN} - B_{kk}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.2\gamma')$$

$$Q_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{αν } i \neq k \\ r_S(B_{kN} - B_{kj}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.2\delta')$$

Χρησιμοποιώντας απλή άλγεβρα πινάκων [80], προκύπτει ότι οι ιδιοτιμές του συστήματος για το σημείο ισορροπίας k , $k \in [1, \dots, N]$, δίδονται από τους τύπους

$$\lambda_i^{(k)} = \begin{cases} r_{BS}(A_{ik} - A_{kk}) & \text{αν } i \neq k \\ r_{BS}(A_{Nk} - A_{kk}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.3\alpha')$$

$$\lambda_{N-1+i}^{(k)} = \begin{cases} r_S(B_{ki} - B_{kk}) & \text{αν } i \neq k \\ r_S(B_{kN} - B_{kk}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.3\beta')$$

για $i = 1, \dots, N-1$. Σύμφωνα με τις υποθέσεις που έγιναν στην παράγραφο 6.1.1, όλες οι ιδιοτιμές χαρακτηρίζονται από αρνητικά πραγματικά μέρη. Επομένως, τα N σημεία ισορροπίας κατά Nash, ήτοι $(\mathcal{C}_k, \mathcal{C}_k)$ για $k \in [1, \dots, N]$, είναι ασυμπτωτικά ευσταθή και ως εκ τούτου, οι πόροι που δεσμεύει ο Σταθμός Βάσης και οι πόροι που αιτούνται οι συνδρομητές συγκλίνουν.

Δ'.4 Απόδειξη Θεωρήματος 6.1.2

Χρησιμοποιώντας τεχνικές γραμμικοποίησης, το χαρακτηριστικό πολυώνυμο για το k σημείο ισορροπίας δίδεται από τον τύπο

$$|\mathbf{J}_0^k + e^{-\lambda\tau_1} \mathbf{J}_{\tau_1}^k + e^{-\lambda\tau_2} \mathbf{J}_{\tau_2}^k - \lambda \mathbf{I}| = 0 \quad (\Delta'.4)$$

όπου \mathbf{J}_0^k είναι η Ιακωβιανή μήτρα που υπολογίζεται ως προς το $(\mathbf{x}_k(t), \mathbf{y}_k(t))$, $\mathbf{J}_{\tau_1}^k$ είναι η Ιακωβιανή που υπολογίζεται ως προς το $(\mathbf{x}_k(t - \tau_1), \mathbf{y}_k(t - \tau_1))$ και $\mathbf{J}_{\tau_2}^k$ είναι η Ιακωβιανή που υπολογίζεται ως προς το $(\mathbf{x}_k(t - \tau_2), \mathbf{y}_k(t - \tau_2))$.

Κατά τον ίδιο τρόπο που αποδείχτηκε το Θεώρημα 6.1.1, προκύπτει ότι για τα σημεία ισορροπίας ισχύει ότι $\mathbf{J}_{\tau_1}^k = \mathbf{0}$ και $\mathbf{J}_{\tau_2}^k = \mathbf{0}$. Ως αποτέλεσμα, η ανάλυση της ευστάθειας είναι η ίδια με αυτή της παραγράφου Δ'.3.

Δ'.5 Απόδειξη Θεωρήματος 6.2.1

Αποδεικνύεται εύκολα ότι το σύστημα διαθέτει $N - 1$ σημεία ισορροπίας κατά Nash σε καθαρές στρατηγικές, ήτοι (C_k, C_{N-k}) για $k \in [1, \dots, N - 1]$ και ένα σημείο ισορροπίας κατά Nash σε μεικτές στρατηγικές. Σύμφωνα με το Θεώρημα Γ'.4.1, το σημείο ισορροπίας σε μεικτές στρατηγικές δεν είναι ασυμπτωτικά ευσταθές και επομένως δεν μελετάται περαιτέρω. Για τα σημεία ισορροπίας σε καθαρές στρατηγικές, χρησιμοποιώντας τεχνικές γραμμικοποίησης και απλή άλγεβρα πινάκων [80], μπορεί να αποδειχτεί ότι οι ιδιοτιμές του συστήματος για το σημείο ισορροπίας k , ήτοι (C_k, C_{N-k}) , $k \in [1, \dots, N - 1]$, δίδονται από τους τύπους

$$\lambda_i^{(k)} = \begin{cases} (A_{i,N-k} - A_{k,N-k}) & \text{αν } i \neq k \\ (A_{N,N-k} - A_{k,N-k}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.5\alpha')$$

$$\lambda_{N-1+i}^{(k)} = \begin{cases} (B_{k,i} - B_{k,N-k}) & \text{αν } i \neq k \\ (B_{k,N} - B_{k,N-k}) & \text{αν } i = k \end{cases} \quad (\Delta'.5\beta')$$

για $i = 1, \dots, N - 1$. Με βάση τις υποθέσεις που έγιναν στην παράγραφο 6.2.1, όλες οι παραπάνω ιδιοτιμές είναι αρνητικές. Επομένως, τα $N - 1$ σημεία ισορροπίας (C_k, C_{N-k}) για $k \in [1, \dots, N - 1]$ είναι ασυμπτωτικά ευσταθή, και ως εκ τούτου η αθροιστική ζήτηση από τους παρόχους κινητών επικοινωνιών συγχλίνει στους πόρους που διαθέτει το οπτικό οπισθοζευκτικό δίκτυο.

Δ'.6 Απόδειξη Θεωρήματος 6.2.2

Το σύστημα χαρακτηρίζεται από τα ίδια σημεία ισορροπίας όπως αυτά αναφέρονται στην παράγραφο Δ'.5. Χρησιμοποιώντας και πάλι τεχνικές γραμμικοποίησης, το χαρακτηριστικό πολυώνυμο για το σημείο ισορροπίας k δίδεται από τον τύπο

$$|\mathbf{J}_0^k + e^{-\lambda\tau_1}\mathbf{J}_{\tau_1}^k + e^{-\lambda\tau_2}\mathbf{J}_{\tau_2}^k - \lambda\mathbf{I}| = 0 \quad (\Delta'.6)$$

όπου \mathbf{J}_0^k είναι η Ιακωβιανή μήτρα που υπολογίζεται ως προς το $(\mathbf{x}_k(t), \mathbf{y}_k(t))$, $\mathbf{J}_{\tau_1}^k$ είναι η Ιακωβιανή που υπολογίζεται ως προς το $(\mathbf{x}_k(t - \tau_1), \mathbf{y}_k(t - \tau_1))$ και $\mathbf{J}_{\tau_2}^k$ είναι η Ιακωβιανή που υπολογίζεται ως προς το $(\mathbf{x}_k(t - \tau_2), \mathbf{y}_k(t - \tau_2))$.

Με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκε στη παράγραφο Δ'.5, αποδεικνύεται ότι για τα σημεία ισορροπίας ισχύει ότι $\mathbf{J}_{\tau_1}^k = \mathbf{0}$ και $\mathbf{J}_{\tau_2}^k = \mathbf{0}$. Επομένως, η ανάλυση ευστάθειας του συστήματος ανάγεται σε αυτή της παραγράφου Δ'.5.

Βιβλιογραφία

- [1] ADAS, A. M. Using Adaptive Linear Prediction to Support Real-Time VBR Video Under RCBR Network Service Model. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 6, 5 (1998), 635–644.
- [2] ADLER, G. Using GPON in Mobile Backhaul Networks. *White paper* (2010).
- [3] ALCATEL LUCENT. The LTE Network Architecture, A Comprehensive Tutorial. *White paper* (2009).
- [4] ALI, M., ELLINAS, G., ERKAN, H., HADJANTONIS, A., AND DORSINVILLE, R. On the Vision of Complete Fixed-Mobile Convergence. *Journal of Lightwave Technology* 28, 16 (2010), 2343–2357.
- [5] AVRIEL, M. *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. Dover Publications, USA, 2003.
- [6] ΒΛΑΧΑΒΑΣ, Ι., ΚΕΦΑΛΑΣ, Π., ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ, Ν., ΚΟΚΚΟΡΑΣ, Φ., AND ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ, Η. *Τεχνητή Νοημοσύνη*. Β. Γκιούρδας, 2006.
- [7] BOCK, C., FIGUEROLA, S., PARKER, M., WALKER, S., MENDES, T., MARQUES, V., JUNGNICKEL, V., HABEL, K., AND LEVI, D. Convergent radio and fibre architectures for high-speed access. In *15th International Conference on Transparent Optical Networks* (2013), pp. 1–4.
- [8] BROCADE. Technical Brief: Next-Generation Wireless Backhaul Solutions. *White paper* (2009).
- [9] CERAGON. Mobile backhaul: Fiber vs. Microwave. *White paper* (2009).
- [10] CHABAA, S., ZEROUAL, A., AND ANTARI, J. Identification and Prediction of Internet Traffic Using Artificial Neural Networks. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications* 2, 3 (2010), 147–155.
- [11] CHUNDURY, R. Mobile broadband backhaul: Addressing the challenge. *Ericsson Review*, 3 (2008), 4–9.
- [12] CISCO. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013-2018. *White paper* (2014).
- [13] CLARKSON, T. Applications of Neural Networks In Telecommunication. In *Proc. ERUDIT Workshop on Applications of Computational Intelligence Techniques in Telecommunication* (1999).

- [14] COIMBRA, J., SCHUTZ, G., AND CORREIA, N. A game-based algorithm for fair bandwidth allocation in Fibre-Wireless access networks. *Optical Switching and Networking* 10, 2 (2013), 149–162.
- [15] CONFES. *Παραδοτέο 2.2, Ορισμός υψηλού επιπέδου προδιαγραφών αρχιτεκτονικής CONFES*. 2011.
- [16] CORTEZ, P., RIO, M., ROCHA, M., AND SOUSA, P. Internet Traffic Forecasting using Neural Networks. In *International Joint Conference on Neural Networks* (2006), pp. 4942–4949.
- [17] DARWOOD, P., OPPERMAN, I., JAKAS, S., AND LINTON, W. Mobile network traffic forecasting. In *Vehicular Technology Conference* (2000), vol. 6, pp. 2931–2936.
- [18] DING, L., SHE, J., AND PENG, S. An Integrated Prediction Model for Network Traffic based on Wavelet Transformation. *Elektronika ir elektrotechnika* 19, 3 (2013), 73–76.
- [19] DOUMMAR, F. Why is LTE Essential? *White paper* (2013).
- [20] ETHERNITY NETWORKS. Mobile Backhaul Evolution. *White paper*.
- [21] EXPERT’S FORUM. Mobile backhaul landscape. *White paper* (2008).
- [22] FANG, J., ZHOU, Q., WU, X., AND YANG, S. Network Traffic Prediction Model Based on Catfish-PSO-SVM. *Journal of Networks* 8, 11 (2013), 2534–2540.
- [23] FARLOW, S. The GMDH Algorithm of Ivakhnenko. *The American Statistician* 35, 4 (1981), 210–215.
- [24] GIESL, P., AND WENDLAND, H. Numerical determination of the basin of attraction for asymptotically autonomous dynamical systems. *Nonlinear Analysis* 75, 5 (2012), 2823–2840.
- [25] GINTIS, H. *Game Theory Evolving*. Princeton University Press, 2009.
- [26] GROSCHWITZ, N. K., AND POLYZOS, G. C. A time series model of long-term NSFNET backbone traffic. In *IEEE International Conference on Communications, Conference Record, “Serving Humanity Through Communications”*. (1994), pp. 1400–1404.
- [27] HALE, J., AND KOCUK, H. *Dynamics and Bifurcations*. Springer-Verlang, USA, 2008.
- [28] HARAN, O., AND SHEFFER, A. The Importance of Dynamic Bandwidth Allocation in GPON Networks. *PMC-Sierra inc., White paper* (2008).
- [29] HAYKIN, S. *Neural Networks, A Comprehensive Foundation*. Pearson Prentice Hall, India, 2005.
- [30] HOFBAUER, J., AND SIGMUND, K. *Evolutionary Games and Population Dynamics*. Cambridge University Press, 1998.

- [31] HOLMA, H., AND TOSKALA, A. *WCDMA for UMTS - HSPA Evolution and LTE*. Wiley, United Kingdom, 2010.
- [32] ITU-T G.984.3. Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification. *ITU-T Recommendation* (2008).
- [33] ITU-T G.998.2. Ethernet-based multi-pair bonding. *ITU-T Recommendation* (2005).
- [34] IP/MPLS FORUM. Use of MPLS Technology in mobile backhaul networks. *White paper* (2008).
- [35] IVAKHNENKO, A. Polynomial Theory of Complex Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-1*, 4 (1971), 364–378.
- [36] IXIA. Quality of Service and Policy Management in Mobile Data Networks. *White paper* (2013).
- [37] JUNG, S., KIM, C., AND CHUNG, Y. A Prediction Method of Network Traffic Using Time Series Models. In *Computational Science and Its Applications (ICCSA)* (2006), vol. 3982, Springer Berlin Heidelberg, pp. 234–243.
- [38] JUNIPER RESEARCH. Better Backhaul for Mobile. *White paper* (2011).
- [39] KIM, S. W., KIM, B.-S., AND FANG, Y. Downlink and uplink resource allocation in IEEE 802.11 wireless LANs. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54, 1 (2005), 320–327.
- [40] KOSMIDES, P., ROUSKAS, A., AND ANAGNOSTOU, M. Utility-based RAT selection optimization in heterogeneous wireless networks. *Pervasive and Mobile Computing* 12 (2014), 92–111.
- [41] KUNSTLER, J. PON for next generation applications: Focus on mobile backhaul (MBH). In *China International Optoelectronic Exposition, CIOE 2013* (2013).
- [42] LAIHO, J., WACKER, A., AND NOVOSAD, T. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. Wiley, United Kingdom, 2006.
- [43] LAI, C.-L., LIN, H.-T., CHIANG, H.-H., AND HUANG, Y.-C. Design and analysis of a frame-based dynamic bandwidth allocation scheme for fiber-wireless broadband access networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 6, 5 (2014), 486–500.
- [44] LESCUER, P., AND LUCIDARME, T. *Evolved Packet System, The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. Wiley, United Kingdom, 2008.
- [45] LIANG, Q. Ad Hoc Wireless Network Traffic - Self-Similarity and Forecasting. *IEEE Communications Letters* 6, 7 (2002), 297–299.
- [46] LIEBL, G., MORAES, T. M., SOYSAL, A., AND SEIBEL, E. Fair resource allocation for the relay backhaul link in LTE-Advanced. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)* (2012), pp. 1196–1201.

- [47] LI, X., ZAKI, Y., WEERAWARDANE, T., TIMM-GIEL, A., AND GOERG, C. HSUPA backhaul bandwidth dimensioning. In *IEEE 19th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2008), pp. 1–6.
- [48] LIM, W., MILOSAVLJEVIC, M., KOURTESSIS, P., AND SENIOR, J. QoS mapping for LTE backhauling over OFDMA-PONs. In *14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (2012), pp. 1–4.
- [49] LIN, H.-T., LAI, C.-L., AND HUANG, Y.-C. Dynamic bandwidth allocation with QoS support for integrated EPON/WiMAX networks. In *14th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)* (2013), pp. 74–79.
- [50] LIU, L., AND OZSU, M. *Encyclopedia of Database Systems*. Springer, USA, 2009.
- [51] MARIC, I., BOSTJANCIC, B., AND GOLDSMITH, A. Resource allocation for constrained backhaul in picocell networks. In *Information Theory and Applications Workshop (ITA)* (2011), pp. 1–6.
- [52] MIMURA, T., YAMAMOTO, K., IWATA, A., NISHIO, A., AND MORIKURA, M. Multi-operator mobile relaying: Effect of shared spectrum allocation. In *IEEE 23rd International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2012), pp. 1268–1272.
- [53] MIRAHMADI, M., AND SHAMI, A. Traffic-prediction-assisted dynamic bandwidth assignment for hybrid optical wireless networks. *Computer Networks* 56, 1 (2012), 244–259.
- [54] MITCHELL, T. *Machine Learning*. WCB McGraw-Hill, USA, 1997.
- [55] MOH, W. M., CHEN, M.-J., CHU, N.-M., AND LIAO, C.-D. Traffic prediction and dynamic bandwidth allocation over ATM: a neural network approach. *Computer Communications* 18, 8 (1995), 563–571.
- [56] NGMN ALLIANCE. Next Generation Mobile Networks, Optimised Backhaul Requirements. *A Requirement Specification by the NGMN Alliance* (2009).
- [57] NGMN ALLIANCE. Guidelines for LTE Backhaul Traffic Estimation. *White paper* (2011).
- [58] NEC CORPORATION. Mobile Backhaul Advances Efficiency. *White paper* (2013).
- [59] NEC CORPORATION. Mobile backhaul evolution and convergence. *White paper* (2010).
- [60] OBELE, B., AND KANG, M. Fixed Mobile Convergence: A Self-Aware QoS Architecture for Converging WiMAX and GEAPON Access Networks. In *2nd International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies* (2008), pp. 411–418.

- [61] OH, S.-K., AND PEDRYCZ, W. The design of self-organising Polynomial Neural Networks. *Information Sciencies 141* (2002), 237–258.
- [62] ORAVEC, M., PETRAS, M., AND PILKA, F. Video Traffic Prediction Using Neural Networks. *Acta Polytechnica Hungarica 5*, 4 (2008), 59–78.
- [63] ORPHANOUDAKIS, T., KOSMATOS, E., ANGELOPOULOS, J., AND STAVDAS, A. Exploiting PONs for mobile backhaul. *IEEE Communications Magazine 51*, 2 (2013), S27–S34.
- [64] ORPHANOUDAKIS, T., MATRAKIDIS, C., POLITI, C., STAVDAS, A., AND LELIGOU, H. Converged Access Network Infrastructure based on Virtual PONs. In *International Conference on Telecommunications and Multimedia (TEMU)* (2012), pp. 124–129.
- [65] OSBORNE, M. J., AND RUBINSTEIN, A. *A Course in Game Theory*. The MIT Press, 1994.
- [66] OSSEIRAN, A., MONSERRAT, J. F., AND MOHR, W. *Mobile and Wireless Communications for IMT-Advanced and beyond*. Wiley, United Kingdom, 2011.
- [67] OWEZARSKI, P., AND LARRIEU, N. Internet Traffic Characterization - An Analysis of Traffic Oscillations. In *High Speed Networks and Multimedia Communications* (2004), vol. 3079, pp. 96–107.
- [68] PAPAGIANNAKI, K., TAFT, N., ZHANG, Z.-L., AND DIOT, C. Long-Term Forecasting of Internet Backbone Traffic. *IEEE Transactions on Neural Networks 16*, 5 (2005), 1110–1124.
- [69] PAXSON, V., AND FLOYD, S. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking 3*, 3 (1995), 226–244.
- [70] PREHOFER, C., AND BETTSTETTER, C. Self-organization in communication networks: principles and design paradigms. *IEEE Communications Magazine 43*, 7 (2005), 78–85.
- [71] RAMANTAS, K., VLACHOS, K., ELLINAS, G., AND HADJANTONIS, A. A Converged Optical Wireless Architecture for Mobile Backhaul Networks. In *17th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM)* (2013), pp. 155–160.
- [72] RANAWEERA, C., LIM, C., AND NIRMALATHAS, A. Next Generation Optical-Wireless Converged Network Architectures. *IEEE Network 26*, 2 (2012), 22–27.
- [73] RANAWEERA, C., LIM, C., WONG, E., AND NIRMALATHAS, A. QoS performance of next generation optical-wireless converged network and PON cycle length. In *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)* (2012), pp. 176–179.

- [74] RANAWEERA, C., WONG, E., LIM, C., AND NIRMALATHAS, A. Quality of service assurance in EPON-WiMAX converged network. In *International Topical Meeting on Microwave Photonics and Microwave Photonics Conference* (2011), pp. 369–372.
- [75] RANAWEERA, C., WONG, E., LIM, C., NIRMALATHAS, A., AND JAYASUNDARA, C. An Efficient Resource Allocation Mechanism for LTE-GEAPON Converged Networks. *Journal of Network and Systems Management* (2013), 1–25.
- [76] RANAWEERA, C., WONG, E., LIM, C., NIRMALATHAS, A., AND JAYASUNDARA, C. Architecture discovery enabled resource allocation mechanism for next generation optical-wireless converged networks. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking* 5, 9 (2013), 1083–1095.
- [77] RUTKA, G. Neural Network Models for Internet Traffic Prediction. *Electronics and Electrical Engineering, Elektronika ir elektrotechnika* 4, 68 (2006), 55–58.
- [78] SAHASRABUDHE, A., AND KAR, K. Bandwidth Allocation Games under Budget and Access Constraints. In *Proceedings of the 42nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)* (2008), pp. 761–769.
- [79] SANG, A., AND LI, S. A predictability analysis of network traffic. In *INFOCOM 2000. 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* (2000), vol. 1, pp. 342–351.
- [80] SILVESTER, J. Determinants of block matrices. *The Mathematical Gazette* 48, 501 (2000), 460–467.
- [81] SKYFIBER. Breaking the backhaul bottleneck. *White paper*.
- [82] SPECHT, D. A General Regression Neural Network. *IEEE Transactions on Neural Networks* 2, 6 (1991), 568–576.
- [83] STROGATZ, S. *Nonlinear Dynamics and Chaos*. Westview Press, USA, 1994.
- [84] TAYLOR, P. D., AND JONKER, L. B. Evolutionary stable strategies and game dynamics. *Mathematical Bioscience* 40 (1978), 145–156.
- [85] TELEMANAGEMENTFORUM. *SLA Management Handbook*. 2001.
- [86] ΘΕΟΛΟΓΟΥ, Μ.Ε. *Δίκτυα Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών*. Τζιόλας, 2007.
- [87] TIPMONGKOLSILP, O., ZAGHLOUL, S., AND JUKAN, A. The Evolution of Cellular Backhaul Technologies: Current Issues and Future Trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 13, 1 (2011), 97–113.
- [88] TUREL, O., AND SERENKO, A. Satisfaction with mobile services in Canada: An empirical investigation. *Telecommunications Policy* 30, 5-6 (2006), 314–331.

- [89] ULLAH, F., KHAN, G. M., AND MAHMUD, A. Intelligent Bandwidth Management Using Fast Learning Neural Networks. In *IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communications (2012)*, pp. 867–872.
- [90] VENMANI, D. P., GOURHANT, Y., AND ZEGHLACHE, D. Divide and share: A new approach for optimizing backup resource allocation in LTE mobile networks backhaul. In *8th international conference on Network and service management (CNSM) and 2012 workshop on systems virtualization management (SVM) (2012)*, pp. 189–193.
- [91] WANG, Z., YANG, K., HUNTER, D., HU, Z., AND TIAN, H. A Queuing Theory-Enabled Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for a Wired-Wireless Converged Network. *Wireless Personal Communications* 72, 2 (2013), 1373–1397.
- [92] WEIBULL, J. W. *Evolutionary Game Theory*. The MIT Press, 1995.
- [93] YADAV, R., AND BALAKRISHNAN, M. Comparative evaluation of ARIMA and ANFIS for modeling of wireless network traffic time series. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 15 (2014).
- [94] YANG, C. C.-Y., KETCHAM, M., LU, D., AND KINSEY, D. Performance Monitoring with Predictive QoS Analysis of LTE Backhaul. In *International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (2011)*, vol. 6, pp. 162–169.
- [95] YAN, Y., YU, H., WESSING, H., AND DITTMANN, L. Integrated resource management for hybrid optical wireless (HOW) networks. In *4th International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCOM) (2009)*, pp. 1–5.
- [96] YI, S., AND LEI, M. Backhaul resource allocation in LTE-Advanced relaying systems. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) (2012)*, pp. 1207–1211.
- [97] YOU, C., AND CHANDRA, K. Time series models for Internet data traffic. In *Conference on Local Computer Networks (1999)*, pp. 164–171.
- [98] ZHANG, G. P. Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing* 50 (2003), 159–175.
- [99] ZHANI, M. F., ELBIAZE, H., AND KAMOUN, F. Analysis and Prediction of Real Network Traffic. *Journal of Networks* 4, 9 (2009), 855–865.
- [100] ZHAO, Q., AND GRACE, D. Application of cognition based resource allocation strategies on a multi-hop backhaul network. In *IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS) (2012)*, pp. 423–427.
- [101] ZHOU, D., CHEN, S., AND DONG, S. Network traffic prediction based on ARFIMA model. *International Journal of Computer Science* 9, 3 (2012), 106–111.

- [102] ZHU, K., NIYATO, D., AND WANG, P. Optimal Bandwidth Allocation with Dynamic Service Selection in Heterogeneous Wireless Networks. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)* (2010), pp. 1–5.
- [103] ZHU, K., NIYATO, D., AND WANG, P. Dynamic Bandwidth Allocation under Uncertainty in Cognitive Radio Networks. In *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)* (2011), pp. 1–5.
- [104] ZHU, Y., ZHANG, G., AND QIU, J. Network Traffic Prediction based on Particle Swarm BP Neural Network. *Journal of Networks* 8, 11 (2013), 2685–2691.

Κατάλογος Δημοσιεύσεων του Συγγραφέα

Διεθνή Περιοδικά

- J4. I. Loumiotis, E. Adamopoulou, K. Demestichas, T. Stamatiadi and M. Theologou, “On the trade-off between computational efficiency and prediction accuracy in bandwidth traffic estimation”, *Electronics Letters*, no.10, vol.50, pp.754-756, 2014.
- J3. I. Loumiotis, E. Adamopoulou, K. Demestichas, T. Stamatiadi and M. Theologou, “Dynamic backhaul resource allocation: An evolutionary game theoretic approach”, *IEEE Transactions on Communications*, no.2, vol.62, pp.691-698, 2014.
- J2. I. Loumiotis, E. Adamopoulou, K. Demestichas, T. Stamatiadi and M. Theologou, “On the predictability of next generation mobile network traffic using artificial neural networks”, *International Journal of Communication Systems*, in press, 2013.
- J1. I. Loumiotis, T. Stamatiadi, E. Adamopoulou, K. Demestichas and E. Sykas, “Dynamic backhaul resource allocation in wireless networks using artificial neural networks”, *Electronics Letters*, no.8, vol.49, pp.539-541, 2013.

Κεφάλαια σε βιβλία

- B1. K. Demestichas, E. Adamopoulou, E. Sykas, I. Loumiotis, T. Stamatiadi, N. Papaoulakis and I. Mesogiti, “Dynamic Resource Configurations for the Convergence of Optical and Wireless Networks”, chapter in *Evolution of Cognitive Networks and Self-Adaptive Communication Systems*, IGI Global, 2013

Διεθνή Συνέδρια

- C8. P. Kosmides, E. Adamopoulou, K Demestichas, C. Remoundou I. Loumiotis and M. Theologou, “Community Awareness in Academic Social Networks”, *7th IEEE/ACM International Conference On Utility and Cloud Computing*, London, UK, December 2014 (accepted).
- C7. I. Loumiotis, V. Asthenopoulos, E. Adamopoulou, K. Demestichas and E. Sykas, “Intelligent and Efficient Car Management Application for Advanced Green Routing”, *8th International Wireless Internet Conference - Symposium on Wireless and Vehicular Communication*, Lisbon, Portugal, November 2014 (accepted).

- C6. I. Loumiotis, E. Adamopoulou, K. Demestichas, P. Kosmides and M. Theologou, "Artificial Neural Networks for Traffic Prediction in 4G Networks", *8th International Wireless Internet Conference - Symposium on Wireless and Vehicular Communication*, Lisbon, Portugal, November 2014 (accepted).
- C5. I. Loumiotis, E. Adamopoulou, K Demestichas and M. Theologou, "Optimal backhaul resource management in wireless-optical converged networks", *International Conference on Software-Defined and Virtualized Future Wireless Networks*, Rome, Italy, October 2014 (accepted).
- C4. P. Kosmides, C. Remoundou, I. Loumiotis, K Demestichas, E. Adamopoulou and M. Theologou, "Introducing Community Awareness to Location-Based Social Networks", *International Conference on Mobility and Smart Cities*, Rome, Italy, October 2014 (accepted).
- C3. P. Kosmides, C. Remoundou, K Demestichas, I. Loumiotis, E. Adamopoulou and M. Theologou, "A Location Recommender System for Location-Based Social Networks", in proceedings of *International Conference Mathematics and Computers in Sciences and Industry*, Varna, Bulgaria, September 2014.
- C2. E. Adamopoulou, I. Loumiotis, T. Stamatiadi and E. Sykas, "Towards a converged wireless-optical network infrastructure", in proceedings of *17th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, vol. 1, pp. 93-97, Orlando, USA, July 2013.
- C1. K. Demestichas, I. Loumiotis, T. Stamatiadi and E. Sykas, "Towards a converged wireless optical architecture - Business processes and services", in proceedings of *17th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, vol. 1, pp. 274-278, Orlando, USA, July 2013.