ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνικές Βέλτιστης Διαχείρισης Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς για Διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτρης Ε. Χαρίλας

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

Αθήνα, Μάιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Τεχνικές Βέλτιστης Διαχείρισης Πόρων σε Ασύρματα Δίκτυα Επόμενης Γενιάς για Διασφάλιση Ποιότητας Υπηρεσίας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτρης Ε. Χαρίλας

Συμβουλευτική Επιτροπή : Γεώργιος Φικιώρης
Φίλιππος Κωνσταντίνου
Αθανάσιος Παναγόπουλος

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 10η Μαΐου 2012

..... Γεώργιος Φικιώρης Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Φίλιππος Κωνσταντίνου Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Αθανάσιος Παναγόπουλος Λέκτορας Ε.Μ.Π.
..... Μιχαήλ Θεολόγου Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Χρήστος Καψάλης Καθηγητής Ε.Μ.Π.	..... Αθανάσιος Κανάτας Αναπληρωτής Καθηγητής Πανεπιστημίου Πειραιώς
	..... Παναγιώτης Κοτζανικολάου Λέκτορας Πανεπιστημίου Πειραιώς	

Αθήνα, Μάιος 2012

.....

Δημήτρης Ε. Χαρίλας

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

Copyright © Δημήτρης Ε. Χαρίλας
2012
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.

Συντομογραφίες

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANFIS	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
AP	Access Point
BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
CAC	Congestion Avoidance Control
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CNIDR	Carrier-to-Noise-and-Interference-and-Depolarization Ratio
CNIR	Carrier-to-Noise-and-Interference Ratio
CNR	Carrier-to-Noise Ratio
CTFT	Contrite Tit-for-tat
FAHP	Fuzzy Analytic Hierarchy Process
FIS	Fuzzy Inference System
FTP	File Transfer Protocol
GPRS	General Packet Radio Service
GRC	Grey Relational Coefficient
GSM	Global System for Mobile Communications/Groupe Spécial Mobile
INR	Interference-to-Noise Ratio
IP	Internet Protocol
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Indicator
LMDS	Local Multipoint Distribution Service
LTE	Long Term Evolution
MADM	Multi Attribute Decision Making
MF	Membership Function
MOS	Mean Opinion Score
MT	Mobile Terminal
NGN	Next Generation Networks
OSI	Open Systems Interconnection
PCA	Principal Component Analysis
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RSCP	Received Signal Code Power
SINR	Signal-to-Interference-and-Noise Ratio
SIR	Signal-to-Interference Ratio
TCP	Transmission Control Protocol
TFT	Tit-for-tat
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network
XPD	Cross Polarization Discrimination
E2E	End-to-end

Περίληψη

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζεται στη διαχείριση πόρων των δικτύων επόμενης γενιάς (NGN) ώστε να προσφέρεται πάντα στους χρήστες η βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας. Τα μελλοντικά δίκτυα θα συνίστανται από ένα ετερογενές περιβάλλον δικτύων, όπου ο χρήστης θα μπορεί να συνδεθεί σε περισσότερες από μία διεπαφές. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντική η ανάπτυξη μηχανισμών που θα επιλέγουν το βέλτιστο δίκτυο μέσα από μια σειρά κριτηρίων, τα οποία μπορούν να καλύπτουν τα χαρακτηριστικά του δικτύου, τις προτιμήσεις του χρήστη ή ακόμη και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της τερματικής συσκευής. Το πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής εστιάζει στο ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα της επιλογής του δικτύου (network selection) που είναι ικανό να προσφέρει την υψηλότερη Ποιότητα Υπηρεσίας στο χρήστη, μέσα σε περιβάλλον ετερογενών δικτύων. Αρχικά συζητούνται μερικές από τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις, ενώ στη συνέχεια προτείνονται νέα μοντέλα επιλογής δικτύου βασιζόμενες σε μεθόδους πολυκριτηριακών αποφάσεων και εξετάζεται η αποτελεσματικότητά τους.

Από την άλλη πλευρά, οι νέες τάσεις υποδεικνύουν ότι οι χρήστες θα μπορούν να συνεργάζονται μεταξύ τους και να ανταλλάσσουν πόρους δυναμικά. Μέσω της θεωρίας παιγνίων (game theory) μπορούν να υλοποιηθούν πλαίσια συνεργασίας, όπου οι χρήστες σχηματίζουν ένα είδος κοινωνικής ομάδας. Στο δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής γίνεται αρχικά μια παρουσίαση των βασικών εννοιών της θεωρίας παιγνίων και μερικών εφαρμογών της σε τηλεπικοινωνιακά προβλήματα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων σε προβλήματα κατανομής πόρων, με στόχο την αποφυγή συμφόρησης, την ελαχιστοποίηση του κόστους ή την παροχή κινήτρων για συνεργασία.

Τέλος, το τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής εστιάζει στη χρησιμοποίηση συστημάτων ασαφούς λογικής (fuzzy inference systems) για επίλυση προβλημάτων κατανομής ισχύος και πρόβλεψης ποιότητας υπηρεσιών. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος με ταυτόχρονη διατήρηση της πιθανότητας αποκοπής (outage probability) σε αποδεκτά επίπεδα. Προτείνονται ασαφή συστήματα για δορυφορικά δίκτυα, για συστήματα LMDS καθώς και γενικότερα για συστήματα CDMA. Η διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται με την εφαρμογή των συστημάτων ασαφούς λογικής σε μετρήσεις αληθινών δικτύων, με σκοπό την κατασκευή συστημάτων πρόβλεψης.

Λέξεις Κλειδιά

Ποιότητα υπηρεσιών, Δίκτυα επόμενης γενιάς, Ασύρματα δίκτυα, Δίκτυα 4G, Πολυκριτηριακές μέθοδοι αποφάσεων, Θεωρία παιγνίων, Συστήματα ασαφούς λογικής, Κατανομή πόρων, Μηχανισμοί κινήτρων

Abstract

The current thesis focuses on resource management in next generation networks (NGN) so that the optimal Quality of Service is always offered to end users. Future networks will consist of a heterogeneous network environment where the user will be able to connect to multiple interfaces. For this reason it is highly important to develop mechanisms in order to select the best network through a series of criteria, which may cover network specifications, user preferences or even technical characteristics of the terminal device. The first part of the thesis focuses on the very important problem of choosing the network that is capable of offering the highest Quality of Service to users in a heterogeneous networks environment. Some of the most common approaches are initially discussed and then new network selection models based on multi-attribute decision methods are proposed; finally the effectiveness of these models is discussed.

On the other hand, new trends suggest that users will be able to cooperate and share resources dynamically. Through game theory cooperation frameworks can be implemented where users form a kind of social group. In the second part of the thesis the basic concepts of game theory and some applications in telecommunication problems are primarily presented. Game theory is applied in various resource allocation problems with the objective of avoiding congestions, minimizing cost or providing incentives for cooperation.

Finally, the third part of the thesis focuses on fuzzy inference systems for power allocation problems and Quality of Service prediction. The goal is to minimize the total power consumption while maintaining the outage probability in acceptable levels. Fuzzy systems are proposed for satellite networks, LMDS systems and CDMA in general. The thesis concludes with the application of fuzzy systems in measurements of real-life networks, in order to construct prediction systems.

Keywords

Quality of Service, Next generation networks, Wireless networks, 4G networks, Multi-attribute decision making methods, Game theory, Fuzzy systems, Resource allocation, Incentive mechanisms

Αφιερώνεται στους γονείς μου

Ευστάθιο και Κωνστάντζα

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί επίτευγμα της πενταετούς προσπάθειάς μου ως υποψήφιος διδάκτορας της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το περιεχόμενο των σελίδων αυτών είναι προϊόν πολλών κόπων, επιμονής και προσωπικών θυσιών όλα αυτά τα χρόνια. Ωστόσο, βλέποντας το τελικό αποτέλεσμα, αισθάνομαι περήφανος που κατάφερα να ολοκληρώσω ένα ερευνητικό και συγγραφικό έργο υψηλής ποιότητας.

Η εκπόνηση της διατριβής έγινε σε συνεργασία με εξαίρετους επιστήμονες και ανθρώπους. Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω την τριμελή επιτροπή, κ. Γεώργιο Φικιώρη, κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου και κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για την ευκαιρία που μου έδωσαν να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα και για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπό μου. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διατριβής υπήρξαν κάτι παραπάνω από πρόθυμοι να με καθοδηγήσουν και να μου συμπαρασταθούν.

Ιδιαίτερα θερμά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο, για τις ατελείωτες ώρες που αφιέρωσε στην ερευνητική εργασία μου. Οι πολύτιμες υποδείξεις του ήταν καθοριστικές για το τελικό αποτέλεσμα. Αποτέλεσε σημαντικό κίνητρο για μένα η αδιάκοπη εμπιστοσύνη που μου έδειξε, το ενδιαφέρον που επέδειξε για τις ιδέες μου και η διάθεσή του να αναζητούμε μαζί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Αισθάνομαι τυχερός για τη συνεργασία μας, τόσο σε ερευνητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο ανθρωπίνων σχέσεων.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους δύο φίλους και «μέντορές» μου, Παναγιώτη Βλαχέα και Ηλία Τράγο, τους οποίους είχα την τύχη να γνωρίσω κατά τη διάρκεια της εργασίας μου στο Εργαστήριο Τηλεπικοινωνιών. Ύστερα από όλα αυτά τα χρόνια συνειδητοποιώ ότι μέχρις ενός βαθμού χάρη σε εκείνους πήρα την απόφαση να εκπονήσω διδακτορική διατριβή, θέλοντας να ακολουθήσω τα βήματά τους, αλλά και να συνεργαστώ μαζί τους. Όλα αυτά τα χρόνια με βοήθησαν πολυάριθμες φορές με τις συμβουλές και την εμπειρία τους, καθώς αποτελούν εξαίρετους επιστήμονες.

Φυσικά δεν μπορώ να μην ευχαριστήσω τους ερευνητές με τους οποίους είχα την τιμή να συνεργαστώ όλα αυτά τα χρόνια. Αρχικά χρωστάω ένα ευχαριστώ στον Χρήστο Αναγνωστόπουλο, για τον οποίο τρέφω απεριόριστη εκτίμηση, όχι μόνο γιατί με μύησε στην επιστήμη της Ασαφούς Λογικής, αλλά και γιατί αποτέλεσε στενό μου φίλο κατά τη διάρκεια της κοινής στρατιωτικής μας θητείας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ερευνητές του Εργαστηρίου Ραδιοεπικοινωνιών Σταυρούλα Βασσάκη και Χαράλαμπο Πήτα για τη συνεργασία μας. Επίσης την Ουρανία Μαρκάκη, ερευνήτρια του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, για την άψογη συνεργασία μας σε αρκετές από τις δημοσιεύσεις μας. Τέλος, ο άνθρωπος που με βοήθησε να πραγματοποιήσω τις πρώτες μου δημοσιεύσεις υπήρξε και επιβλέπων της προπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας. Χρωστάω

ευγνωμοσύνη λοιπόν στον Δημήτρη Νικητόπουλο, αφού χάρη στη βοήθειά του μυήθηκα στο πεδίο της έρευνας.

Ολοκληρώνοντας αυτές τις γραμμές, θα ήθελα να εκφράσω την απεριόριστη αγάπη και ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου Ευστάθιο, τη μητέρα μου Κωνστάντζα, καθώς και την Ουρανία, οι οποίοι υπήρξαν συνοδοιπόροι της όλης μου προσπάθειας και μου προσέφεραν απλόχερα τα απαραίτητα ψυχικά και συναισθηματικά εφόδια για να αντεπεξέλθω στις υποχρεώσεις μου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για κάποιον να περιστοιχίζεται από ανθρώπους που τον αγαπούν, τον καταλαβαίνουν και τον στηρίζουν, ανεξαρτήτως συνθηκών.

Οφείλω να παραδεχτώ ότι η πορεία της διατριβής δεν ήταν πάντα εύκολη και χρειάστηκε αρκετή κατανόηση από τους γονείς μου, ιδιαίτερα σε στιγμές πίεσης, άγχους ή απογοήτευσης. Αφιερώνοντάς τους την παρούσα διδακτορική διατριβή, θα ήθελα να τους ευχαριστήσω από βάθος καρδιάς για τη συμπαράστασή τους στο δύσκολο αγώνα μου.

Δημήτρης Χαρίλας

Μάιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ **15**
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ **21**
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ **23**

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ **26**
Ιστορική Αναδρομή *26*
Χαρακτηριστικά και Προκλήσεις των Δικτύων Επόμενης Γενιάς *29*
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ **32**
Στόχοι και Αντικείμενο της Διατριβής *32*
Μέρος Πρώτο: Επιλογή Βέλτιστου Δικτύου με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Αποφάσεων *32*
Μέρος Δεύτερο: Εφαρμογή Θεωρίας Παιγνίων σε Μηχανισμούς Αποφυγής Συμφόρησης και Μηχανισμούς Κινήτρων *33*
Μέρος Τρίτο: Πρόβλεψη Ποιότητας Υπηρεσιών και Κατανομή Ισχύος με Χρήση Συστημάτων Ασαφούς Συμπερασμού *34*
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ **36**

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ: ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.1: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ **38**
1.1.1 Εισαγωγή *38*
1.1.2 Διαδικασίας Επιλογής Βέλτιστου Δικτύου *41*
1.1.3 Επιλογή Κριτηρίων Απόφασης *43*
1.1.4 Συλλογή Μέσων Τιμών *45*
1.1.5 Καθορισμός Βαρών *47*
1.1.6 Κατάταξη Εναλλακτικών *50*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.2: ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ **53**
1.2.1 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων *53*
1.2.2 Η Μέθοδος SAW (Simple Additive Weighting) *54*
1.2.3 Η Μέθοδος AHP (Analytic Hierarchy Process) *55*
1.2.4 Η Μέθοδος GRA (Grey Relational Analysis) *58*
1.2.5 Η Μέθοδος TOPSIS *59*
1.2.6 Η Μέθοδος ELECTRE *59*
1.2.7 Η Μέθοδος FAHP (Fuzzy AHP) *61*
1.2.8 Η Μέθοδος Fuzzy TOPSIS *63*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.3: ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕΘΟΔΩΝ **65**
1.3.1 Επιλογή Δικτύου με Συνδυασμό των Μεθόδων AHP και GRA *65*
1.3.1.1 Περιγραφή Αλγορίθμου 65
1.3.1.2 Εύρεση Βαρών 65
1.3.1.3 Αριθμητικό Παράδειγμα 66
1.3.2 Επιλογή Δικτύου με Συνδυασμό των Μεθόδων FAHP και ELECTRE *67*
1.3.2.1 Εισαγωγή 67
1.3.2.2 Κατάταξη Δικτύων με την ELECTRE 68
1.3.2.3 Αριθμητικό Παράδειγμα 69
1.3.3 Συγκριτική Μελέτη Μεθόδων Κατάταξης *71*
1.3.3.1 Σενάριο Μελέτης 71
1.3.3.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων 72
1.3.3.3 Ευαισθησία Κατατάξεων στο Προφίλ Χρήστη 72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.4: ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ **75**
1.4.1 Περιγραφή του Πλαισίου Επιλογής Δικτύου *75*
1.4.2 Καθορισμός Βαρών Παραμέτρων *77*
1.4.2.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών 77
1.4.2.2 Εφαρμογή PCA και AHP στην Επιλογή Δικτύου 79
1.4.3 Παράδειγμα Εφαρμογής και Προσομοίωση *79*

1.4.3.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος και Αριθμητικό Παράδειγμα 79
1.4.3.2 Αξιολόγηση της Απόδοσης του Πλαισίου 81
1.4.3.3 Συζήτηση για την Απόδοση του Πλαισίου 84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.5: ΑΠΟΦΑΣΗ ΔΙΑΠΟΜΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΚΡΙΒΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ 86
1.5.1 Στρατηγικές Απόφασης για Κάθετες Διαπομπές 86
1.5.2 Προτεινόμενη Στρατηγική για Απόφαση Διαπομπής 88
1.5.2.1 Κριτήρια Απόφασης 88
1.5.2.2 Αλγόριθμος Απόφασης Διαπομπής 88
1.5.2.3 Καινοτομία και Πλεονεκτήματα 90
1.5.3 Στοιχείο Πλειοδοσίας Δικτύων 90
1.5.3.1 Προβλέψεις και Ασαφείς Εκτιμήσεις 91
1.5.3.2 Πολυκριτηριακές Δημοπρασίες 91
1.5.3.3 Κλάσεις Υπηρεσιών και Προσφορές 92
1.5.3.4 Βελτιστοποίηση και Προσαρμογή Προσφορών 93
1.5.4 Αξιολόγηση Προτεινόμενης Στρατηγικής 94
1.5.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης 94
1.5.4.2 Αριθμητικό Παράδειγμα 95
1.5.4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης 96
1.5.4.4 Συζήτηση 98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ 100

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΚΙΝΗΤΡΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ 104
2.1.1 Ιστορική Αναδρομή 104
2.1.2 Ταξινόμηση Παιγνίων 104
2.1.3 Το Δίλημμα των Κρατουμένων 106
2.1.4 Ισορροπία κατά Nash 107
2.1.4.1 Ορισμός Ισορροπίας κατά Nash 107
2.1.4.2 Πολλαπλές Ισορροπίες κατά Nash 108
2.1.5 Παίγνια Μηδενικού Αθροίσματος 109
2.1.6 Μικτές στρατηγικές 111
2.1.7 Επαναλαμβανόμενα παίγνια 112
2.1.8 Θεωρία Παιγνίων και Σχηματισμός Συνασπισμών 113
2.1.8.1 Κανονικά Παίγνια Συνασπισμών 113
2.1.8.2 Παίγνια Σχηματισμών Συνασπισμών 115
2.1.9 Δημοπρασίες 116
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.2: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 118
2.2.1 Προκλήσεις της Θεωρίας Παιγνίων 118
2.2.2 Κατηγοριοποίηση Εφαρμογών Θεωρίας Παιγνίων σε Ασύρματα Δίκτυα 120
2.2.3 Φυσικό Στρώμα 121
2.2.3.1 Έλεγχος Ισχύος 122
2.2.3.2 Κατανομή φάσματος 124
2.2.3.3 Συστήματα MIMO 125
2.2.3.4 Συνεργατικές Επικοινωνίες 126
2.2.4 Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων 126
2.2.4.1 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο 126
2.2.5 Στρώμα Δικτύου 128
2.2.5.1 Δρομολόγηση και Προώθηση Πακέτων 128
2.2.6 Στρώμα Μεταφοράς 129
2.2.6.1 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων 129
2.2.6.2 Έλεγχος Φορτίου 130
2.2.6.3 Επιλογή Κυψέλης 130
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ 131
2.3.1 Έλεγχος Αποφυγής Συμφόρησης 131
2.3.2 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων 132
2.3.3 Έλεγχος Φορτίου 134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4: ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΜΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΠΑΙΓΝΙΑ 137
2.4.1 Μοντελοποίηση Παιγνίου Αποδοχής Κλήσεων 137

2.4.2 Υπολογισμός των Αποδόσεων *139*
2.4.3 Αριθμητικό Παράδειγμα *139*
2.4.4 Σενάριο Προσομοίωσης *141*
2.4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης *143*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΜΕ ΜΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΠΑΙΓΝΙΑ **147**
2.5.1 Συμφωνίες Συνόδων Μεταξύ Παρόχων *147*
2.5.2 Μοντέλα Κοστολόγησης *149*
2.5.3 Το Παίγνιο Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων *150*
2.5.4 Το Παίγνιο Ελέγχου Φορτίου *155*
2.5.5 Προσομοίωση Σεναρίου με Έναν Πάροχο *157*
2.5.6 Γενίκευση Αλγορίθμου και Προσομοίωση για Πολλούς Παρόχους *159*
2.5.7 Επίδραση του Παραθύρου Χρόνου *164*
2.5.8 Επίδραση του Κατωφλίου Αποδοχής *166*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.6: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΡΩΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ **167**
2.6.1 Εισαγωγή στους Μηχανισμούς Κινήτρων *167*
2.6.2 Μηχανισμοί Φήμης που Βασίζονται στη Θεωρία Παιγνίων *169*
2.6.2.1 Συνεργασία χωρίς Συγκρούσεις - Tit For Tat (TFT) 170
2.6.2.2 Συνεργασία με συγκρούσεις- Tit For Tat (TFT) 170
2.6.2.3 Generous Tit For Tat (GTFT) 171
2.6.2.4 Στρατηγικές Πυροδότησης (n-step Trigger και Grim Trigger) 172
2.6.2.5 Μειονεκτήματα 172
2.6.3 CORE (Collaborative Reputation Mechanism) *172*
2.6.3.1 Γενικά Στοιχεία του CORE και Είδη Φήμης 172
2.6.3.2 Αρχή λειτουργίας του CORE 173
2.6.3.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 174
2.6.4 CONFIDANT (Cooperation Of Nodes: Fairness In Dynamic Ad hoc NeTworks) *175*
2.6.4.1 Δομή του CONFIDANT 175
2.6.4.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 176
2.6.5 SORI (Secure and Objective Reputation-based Incentive) *177*
2.6.5.1 Γενικά Στοιχεία του SORI 177
2.6.5.2 Παρακολούθηση Γειτόνων και Τιμωρία 178
2.6.5.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 179
2.6.6 RISM (Semi-distributed Reputation-based Intrusion Detection System) *179*
2.6.6.1 Γενικά Στοιχεία και Δομή του RISM 179
2.6.6.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 181
2.6.7 OCEAN (Observation-based Cooperation Enforcement in Ad hoc Networks) *182*
2.6.7.1 Βασικά Στοιχεία του OCEAN 182
2.6.7.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 183
2.6.8 DARWIN (Distributed and Adaptive Reputation mechanism for WIreless ad-hoc Networks) *184*
2.6.8.1 Περιγραφή Μηχανισμού DARWIN 184
2.6.8.2 Εφαρμογή Αλγορίθμου 185
2.6.8.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 186
2.6.9 Sprite (Simple Cheat Proof Credit Based System for Mobile Ad hoc Networks) *186*
2.6.9.1 Αρχιτεκτονική του Sprite 186
2.6.9.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 188
2.6.10 Packet Purse Model (PPM) και Packet Trade Model (PTM) *189*
2.6.10.1 Packet Purse Model (PPM) 189
2.6.10.2 Packet Trade Model (PTM) 189
2.6.10.3 Διάταξη Ασφάλειας 190
2.6.10.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 191
2.6.11 HEAD (A Hybrid Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks) *192*
2.6.11.1 Μηχανισμός HEAD 192
2.6.11.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα 193
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.7: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΡΩΝ **194**
2.7.1 Εισαγωγή στο ICARUS *194*
2.7.2 Μοντέλο Δικτύου *194*
2.7.2.1 Στρατηγικές και Αποδόσεις 195
2.7.2.2 Δρομολόγηση 196
2.7.2.3 Συμπεριφορά Εγωιστικών Κόμβων 198

2.7.3 Συνεργασία Κόμβων στο ICARUS *199*
2.7.3.1 Λειτουργίες του ICAS 200
2.7.3.2 Τιμολόγηση στο ICARUS 201
2.7.3.3 Εντοπισμός Εγωιστικών Κόμβων 202
2.7.3.4 Απομακρυσμένοι Κόμβοι 202
2.7.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης *204*
2.7.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης 204
2.7.4.2 Σύγκριση του ICARUS με το DARWIN 204
2.7.4.3 Εξέταση της Απόδοσης του ICARUS 207
2.7.5 Συζήτηση για την απόδοση του ICARUS *209*
2.7.5.1 Σύγκριση του ICARUS με Υπάρχοντες Υβριδικούς Μηχανισμούς 209
2.7.5.2 Περιορισμοί του ICARUS 210
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ **211**

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.1: ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ **218**
3.1.1 Ιστορική Αναδρομή *218*
3.1.2 Πλεονεκτήματα από τη Χρήση της Ασαφούς Λογικής *219*
3.1.3 Ασαφή Σύνολα *219*
3.1.4 Ασαφείς Αριθμοί *220*
3.1.5 Ασαφής Λογική *222*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ **224**
3.2.1 Ασαφή Συστήματα Συμπερασμού (Fuzzy Inference Systems) *224*
3.2.2 Ασαφοποίηση των Δεδομένων Εισόδου *224*
3.2.3 Κατασκευή Κανόνων *227*
3.2.4 Επεξεργασία των Κανόνων *228*
3.2.5 Αποασαφοποίηση *228*
3.2.6 Προσαρμοστικά Νευρωνικά-Ασαφή Συστήματα Συμπερασμού - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS). *229*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.3: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LMDS **234**
3.3.1 Περιγραφή των Συστημάτων LMDS *234*
3.3.2 Έλεγχος Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης *236*
3.3.3 Μοντέλο Συστήματος *237*
3.3.4 Υπάρχουσα Προσέγγιση για Κατανομή Ισχύος με FIS *240*
3.3.5 Προτεινόμενο FIS *242*
3.3.5.1 Κριτήρια Εισόδου 242
3.3.5.2 Υπολογισμός Παραμέτρων Εισόδου 244
3.3.6 Προτεινόμενος Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος *248*
3.3.7 Προσομοίωση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων *250*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.4: ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ FIS ΣΧΗΜΑ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CDMA ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ **255**
3.4.1 Εισαγωγή *255*
3.4.2 Συστήματα CDMA Ευρείας Ζώνης *255*
3.4.3 Περιγραφή FIS Σχήματος *256*
3.4.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα *259*
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.5: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ **261**
3.5.1 Έλεγχος Ισχύος σε Δορυφορικά Δίκτυα *261*
3.5.2 Μοντέλο Συστήματος *261*
3.5.3 Υπολογισμός Πιθανότητας Αποκοπής *263*
3.5.3.1 Παθητικός Δορυφορικός Αναμεταδότης 263
3.5.3.2 Αναγεννητικός Δορυφορικός Αναμεταδότης 264
3.5.4 Περιγραφή FIS Σχήματος *264*
3.5.5 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος *267*
3.5.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα *268*
3.5.6.1 Σενάρια Προσομοίωσης 268
3.5.6.2 Απόδοση του FBPC 268
3.5.6.3 Σύγκριση του FBPC με Βηματικό Έλεγχο Ισχύος 271

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.6: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ **274**
3.6.1 Μοντέλα Πρόβλεψης Ποιότητας Υπηρεσιών *274*
3.6.2 Δείκτες Ποιότητας για Ήχο και Βίντεο *275*
3.6.3 Μεθοδολογία Πρόβλεψης Ποιότητας *275*
3.6.4 Παραμετροποίηση του ANFIS *277*
3.6.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα *278*
3.6.5.1 Μοντέλο Πρόβλεψης 278
3.6.5.2 Αξιολόγηση του Μοντέλου Πρόβλεψης 280
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ **283**

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ **288**
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ **290**

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 0.1. Αρχιτεκτονική Δικτύου Επόμενης Γενιάς 27
Εικόνα 0.2. Εξέλιξη από δίκτυα 2G σε 4G 28
Εικόνα 1.1. Υποστήριξη κινητικότητας και διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης για διάφορα δίκτυα 38
Εικόνα 1.2. Διασυνδεσιμότητα μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών τύπων δικτύων 39
Εικόνα 1.3. Το πρόβλημα επιλογής δικτύου 40
Εικόνα 1.4. Επιλογή Δικτύου σε Ετερογενή Περιβάλλοντα 41
Εικόνα 1.5. Βασικά στάδια της επιλογής δικτύου 42
Εικόνα 1.6. Επιλογή δικτύου με χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής 49
Εικόνα 1.7. Παράδειγμα ιεραρχικής δομής της AHP 56
Εικόνα 1.8. Επιλογή δικτύου με AHP και GRA 66
Εικόνα 1.9. Κανονικοποιημένα Βάρη Σεναρίου Σύγκρισης 73
Εικόνα 1.10. Επίδραση προφίλ χρήστη στην κατάταξη των δικτύων 74
Εικόνα 1.11. Πλαίσιο επιλογής δικτύου 73
Εικόνα 1.12. Εξαγωγή βαρών 75
Εικόνα 1.13. Ανακατασκευή δεδομένων μέσω της PCA για Delay (X) και Utilization (Y) a. Αρχικά δεδομένα b. Τελικά δεδομένα c. Ανακατασκευασμένα δεδομένα με κυρίαρχη συνιστώσα 81
Εικόνα 1.14. α) Απο-κεντροποιημένη αρχιτεκτονική για επιλογή δικτύου β) Κεντροποιημένη αρχιτεκτονική για επιλογή δικτύου 82
Εικόνα 1.15. Μέση Απώλεια Πακέτων για όλες τις συνόδους 83
Εικόνα 1.16. Μέση Απώλεια Πακέτων για διαφορετικά βάρη του κόστους 84
Εικόνα 1.17. Προτεινόμενη Στρατηγική για Απόφαση Διαπομπής 89
Εικόνα 1.18. Σενάριο Προσομοίωσης Ετερογενών Δικτύων 95
Εικόνα 1.19. Μέση καθυστέρηση και απώλεια πακέτων για όλες τις συνόδους σε τρία σενάρια διαπομπής 98
Εικόνα 2.1. Προκλήσεις της Θεωρίας Παιγνίων 118
Εικόνα 2.2. Παίγνια ελέγχου αποδοχής κλήσεων 130
Εικόνα 2.3. Παίγνιο αποδοχής κλήσεων 138
Εικόνα 2.4. Πίνακες αποδόσεων για τους τρεις γύρους του αριθμητικού παραδείγματος 140
Εικόνα 2.5. Αρχιτεκτονική σεναρίου προσομοίωσης 141
Εικόνα 2.6. Επικοινωνία μεταξύ οντοτήτων σεναρίου προσομοίωσης 142
Εικόνα 2.7. Μέση καθυστέρηση για όλες τις αιτήσεις 143
Εικόνα 2.8. Μέσο τρεμούλιασμα για όλες τις αιτήσεις 144
Εικόνα 2.9. Μέση ρυθμοαπόδοση για όλες τις αιτήσεις 144
Εικόνα 2.10. Μέση απώλεια πακέτων για όλες τις αιτήσεις 144
Εικόνα 2.11. Αλλαγή παρόχου λόγω έλλειψης πόρων 148
Εικόνα 2.12. Αλλαγή παρόχου λόγω δυσαρέσκειας πελάτη 149
Εικόνα 2.13. Παίγνια μεταξύ πελατών και παρόχων 151
Εικόνα 2.14. Παίγνιο Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων 152
Εικόνα 2.15. Παίγνιο Ελέγχου Φορτίου 156
Εικόνα 2.16. Επίδραση των δύο παιγνίων στην ποιότητα υπηρεσίας α) για τηλεφωνία β) για FTP 158
Εικόνα 2.17. Συνολικό εισόδημα παρόχου 159
Εικόνα 2.18. Μέση καθυστέρηση για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης 161
Εικόνα 2.19. Μέση απώλεια πακέτων για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης 161
Εικόνα 2.20. Μέση ρυθμοαπόδοση για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης 162
Εικόνα 2.21. Μέση απώλεια πακέτων για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης 162
Εικόνα 2.22. Μέση καθυστέρηση για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής 163
Εικόνα 2.23. Μέση απώλεια πακέτων για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής 163
Εικόνα 2.24. Μέση απώλεια πακέτων για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής 163
Εικόνα 2.25. Μέση ρυθμοαπόδοση για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής 164
Εικόνα 2.26. Επίδραση του παραθύρου χρόνου στην ποιότητα υπηρεσίας α) για τηλεφωνία β) για FTP 165
Εικόνα 2.27. Επίδραση του παραθύρου χρόνου στο συνολικό εισόδημα παρόχου 166
Εικόνα 2.28. Συγκεντρωτικές παρατηρήσεις σε μηχανισμούς φήμης 168
Εικόνα 2.29. Χρέωση με τα nuglets 190
Εικόνα 2.30. Ψευδοκώδικας για δρομολόγηση 198
Εικόνα 2.31. Ψευδοκώδικας για ενίσχυση απομακρυσμένων κόμβων 199

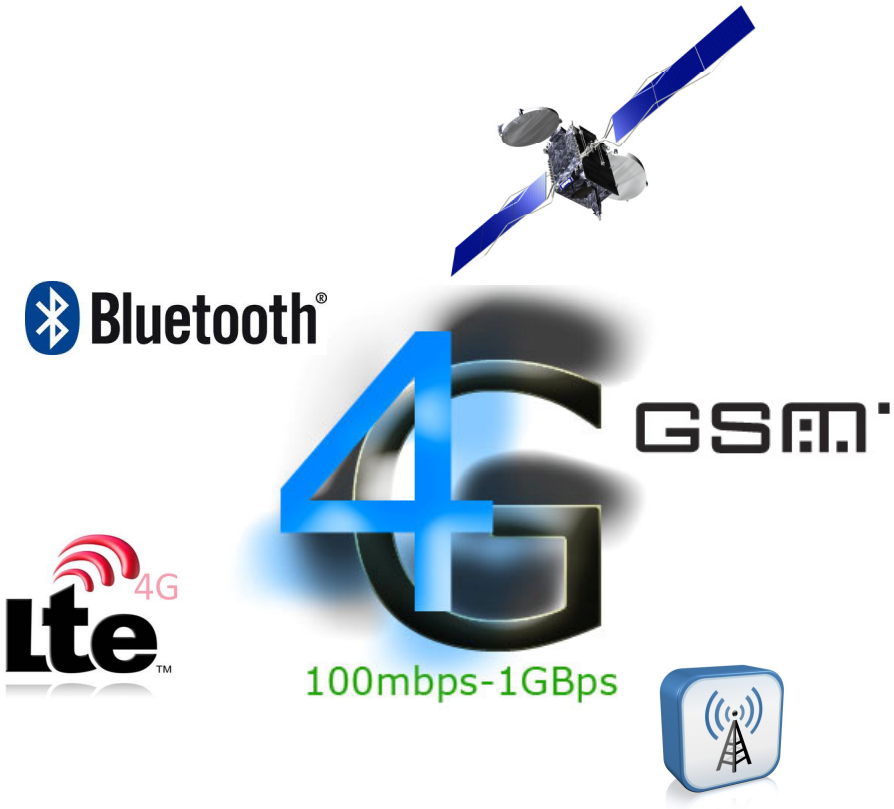
Εικόνα 2.32. Ποσοστό προώθησης πακέτων για συνεργατικούς κόμβους…… .201
Εικόνα 2.33. Ποσοστό προώθησης πακέτων για συνεργατικούς κόμβους 205
Εικόνα 2.34. Ποσοστό προώθησης πακέτων για εγωιστικούς κόμβους 205
Εικόνα 2.35. Ποσοστό προώθησης πακέτων για απομακρυσμένους κόμβους 206
Εικόνα 2.36. Ποσοστό προώθησης πακέτων για απομακρυσμένους κόμβους με διαφορετικές πιθανότητες εξαπάτησης 206
Εικόνα 2.37. Αριθμός κόμβων που δρουν εγωιστικά 207
Εικόνα 2.38. Ποσοστό παράδοσης πακέτων στο ICARUS για διαφορετικές πιθανότητες εξαπάτησης 208
Εικόνα 2.39. Ποσοστό παράδοσης πακέτων στο ICARUS για διαφορετικό αριθμό εγωιστικών κόμβων 208
Εικόνα 3.1. α) Ένωση δυο ασαφών συνόλων β) Συμπλήρωμα ασαφούς συνόλου γ) Τομή δυο ασαφών συνόλων 220
Εικόνα 3.2. Οι α-τομές ενός κυρτού, κανονικού ασαφούς συνόλου 221
Εικόνα 3.4. Παράδειγμα λεκτικής μεταβλητής: απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους. 225
Εικόνα 3.5. Υπόδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής 225
Εικόνα 3.6. Υπόδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής 226
Εικόνα 3.7. Υπόδειγμα συνάρτησης συμμετοχής Gauss και Bell 226
Εικόνα 3.8 Αρχιτεκτονική του ANFIS 230
Εικόνα 3.8. Τα σχήματα FIS και ANFIS 232
Εικόνα 3.9 Δομή ενός κυψελών και διακυψελική παρεμβολή για την κάτω ζεύξη ενός LMDS συστήματος βασισμένο σε CDMA. 237
Εικόνα 3.10. Συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου και εξόδου για το υπάρχον σύστημα ασαφούς συμπερασμού 241
Εικόνα 3.11. Προτεινόμενο FIS 243
Εικόνα 3.12. Συναρτήσεις Συμμετοχής για τις εισόδους και την έξοδο του προτεινόμενου FIS 244
Εικόνα 3.13. Συναρτήσεις Ελέγχου Ισχύος για περιοχές με μέτριες βροχοπτώσεις (a=c=0.5) 249
Εικόνα 3.14. Συναρτήσεις Ελέγχου Ισχύος για διάφορα κλίματα 249
Εικόνα 3.15. Πιθανότητα αποκοπής για $SNIR_{th}$ = 12.3 dB και f = 28 GHz 251
Εικόνα 3.16. Πιθανότητα αποκοπής για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz 251
Εικόνα 3.17. Πιθανότητα αποκοπής για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 42 GHz 252
Εικόνα 3.18. Πιθανότητα αποκοπής σε δύο περιοχές για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz 252
Εικόνα 3.19. Ισχύς μετάδοσης σε δύο περιοχές για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz 253
Εικόνα 3.20. Σύγκριση πιθανότητας αποκοπής μεταξύ αλγορίθμων κατανομής ισχύος 253
Εικόνα 3.21. Σύγκριση καταναλισκόμενης ισχύος μεταξύ αλγορίθμων κατανομής ισχύος 253
Εικόνα 3.22. Συναρτήσεις Συμμετοχής για τις εισόδους και την έξοδο του CDFIS 256
Εικόνα 3.23. Μέση πιθανότητα αποκοπής ανά ρυθμό βροχόπτωσης (περιοχή με μέτριες βροχοπτώσεις). 259
Εικόνα 3.24. Συνολική ισχύς μετάδοσης ανά ρυθμό βροχόπτωσης (περιοχή με μέτριες βροχοπτώσεις). 259
Εικόνα 3.25. Συνολική ισχύς μετάδοσης ανά ρυθμό βροχόπτωσης για διάφορες περιοχές 260
Εικόνα 3.26. Δορυφορική ζεύξη με ένα αναμεταδότη 262
Εικόνα 3.27. Κλίμακες μετατροπής του FIS 265
Εικόνα 3.28. Συνολικό CNIR, Συνολικό CNIDR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο A 269
Εικόνα 3.29. Συνολικό CNIR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο B 270
Εικόνα 3.30. Συνολικό CNIDR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο C 270
Εικόνα 3.31. Συνολικό CNIDR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο D 271
Εικόνα 3.32. Διαφορά στην κατανομή ισχύος για όλα τα σενάρια 272
Εικόνα 3.33. Μεθοδολογία πρόβλεψης ποιότητας 276
Εικόνα 3.34. Ασαφή μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας για δίκτυα GSM και UMTS 277
Εικόνα 3.35. Παραμετροποίηση ANFIS για εκπαίδευση του GSM FIS (άνω ζεύξη) 278
Εικόνα 3.36. Τρισδιάστατες επιφάνειες των FIS: i) GSM Voice (a: UL, b:DL), ii) UMTS Voice (c: UL, d: DL), iii) UMTS Total Video Quality (e: UL, f: DL) 279
Εικόνα 3.37. Επίδραση των παραμέτρων εισόδου στην ESQoS (αντικειμενική MOS): i) Επίδραση RxLevSub σε MOS_a σε GSM Voice για διάφορες τιμές RxQualSub (a: UL, b: DL), ii) Επίδραση RSCP σε MOS_a σε UMTS Voice για διάφορες τιμές E_c/N_0(c: UL, d: DL), iii) Επίδραση RSCP σε MOS_t σε UMTS Video για διάφορες τιμές E_c/N_0 (e: UL, f: DL) 281
Εικόνα 3.38. Μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές της αντικειμενικής MOS_a για μετάδοση φωνής σε GSM (UL). 282

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1. Κατηγοριοποίηση των κριτηρίων απόφασης 44
Πίνακας 1.2. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών συλλογής τιμών 46
Πίνακας 1.3. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών προσδιορισμού βαρών 47
Πίνακας 1.4. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών κατάταξης 51
Πίνακας 1.5. Πίνακας AHP 56
Πίνακας 1.6. Σχετικά βάρη για GPRS 66
Πίνακας 1.7. Σχετικά βάση για WLAN 67
Πίνακας 1.8. Κανονικοποιημένες τιμές της GRA 67
Πίνακας 1.9. Σχετική Βαρύτητα των κριτηρίων σε ασαφείς αριθμούς 70
Πίνακας 1.10. Κανονικοποιημένα Βάρη 70
Πίνακας 1.11. Τιμές των παραμέτρων για όλα τα εναλλακτικά δίκτυα 70
Πίνακας 1.12. Κανονικοποιημένες τιμές 70
Πίνακας 1.13. Κανονικοποιημένες και σταθμισμένες τιμές 70
Πίνακας 1.14. Κατάταξη υποψηφίων δικτύων σύμφωνα με τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας 71
Πίνακας 1.15. Τιμές των παραμέτρων για όλα τα εναλλακτικά δίκτυα 71
Πίνακας 1.16. Κανονικοποιημένες τιμές 72
Πίνακας 1.17. Κανονικοποιημένα Βάρη Σεναρίου Σύγκρισης 72
Πίνακας 1.18. Κατάταξη δικτύων για διαφορετικά βάρη της παραμέτρου Cost 73
Πίνακας 1.19. Πίνακας Απόφασης 80
Πίνακας 1.20. Κανονικοποιημένος Πίνακας Απόφασης 80
Πίνακας 1.21. Πίνακας AHP 80
Πίνακας 1.22. Κανονικοποιημένα Βάρη 80
Πίνακας 1.23. Εξάρτηση του χρόνου απόκρισης από των αριθμό των κριτηρίων 85
Πίνακας 1.24. Κλάσεις Υπηρεσιών και Προσφορές 93
Πίνακας 1.25. Μετρήσεις των υποψήφιων δικτύων 96
Πίνακας 1.26. Πλειοδοσίες δικτύων (πίνακας απόφασης) 96
Πίνακας 1.27. Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης 96
Πίνακας 1.28. Σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης 96
Πίνακας 1.29. Δείκτες εγγύτητας και κατάταξη 96
Πίνακας 1.30. Επίδραση του αριθμού κριτηρίων στο χρόνο απόκρισης 99
Πίνακας 2.1. Το Δίλημμα των Κρατουμένων 106
Πίνακας 2.2. Εύρεση ισορροπίας Nash σε παίγνιο 108
Πίνακας 2.3. Η Μάχη των φύλων 109
Πίνακας 2.4 Παίγνιο Μηδενικού Αθροίσματος 110
Πίνακας 2.5. Ταιριαστά Κέρματα 111
Πίνακας 2.6. Δίλημμα των Κρατουμένων Δύο Σταδίων - Πρώτο στάδιο 112
Πίνακας 2.7. Δίλημμα των Κρατουμένων Δύο Σταδίων - Δεύτερο στάδιο 112
Πίνακας 2.8. Πεδία εφαρμογής θεωρίας παιγνίων στα ασύρματα δίκτυα 121
Πίνακας 2.9. Χαρακτηριστικά αριθμητικού παραδείγματος 140
Πίνακας 2.10. Χαρακτηριστικά υπηρεσιών 142
Πίνακας 2.11. Χρησιμοποίηση εύρους ζώνης 146
Πίνακας 2.12. Σχέση μεταξύ στρατηγικών και αποδόσεων 152
Πίνακας 2.13. Παράμετροι προσομοίωσης 157
Πίνακας 2.14. Όρια κανονικοποίησης 157
Πίνακας 2.15. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανισμών φήμης 169
Πίνακας 2.16. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανισμών πίστωσης 169
Πίνακας 2.17. Συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται στο ICARUS 194
Πίνακας 2.18. Πίνακας αποδόσεων του παιγνίου προώθησης πακέτων 195
Πίνακας 2.19. Κανονικοποιημένος πίνακας αποδόσεων του παιγνίου προώθησης πακέτων 195
Πίνακας 2.20. Παράμετροι προσομοίωσης 204
Πίνακας 2.21. Σύγκριση μεταξύ του ICARUS και των υπαρχόντων υβριδικών μηχανισμών 209
Πίνακας 3.1. Κανόνες υπάρχοντος συστήματος ασαφούς συμπερασμού 240
Πίνακας 3.2. Κανόνες του προτεινόμενου FIS 246
Πίνακας 3.3. Οι συντελεστές a και b για διάφορες συχνότητες 247
Πίνακας 3.4. Παράμετροι για το LMDS σύστημα της προσομοίωσης 250
Πίνακας 3.5. Κανόνες του CDFIS 257

Πίνακας 3.6. Κανόνες του προτεινόμενου FIS 267
Πίνακας 3.7. Μέση διαφορά στην κατανομή ισχύος μεταξύ FBPC και διαφόρων βηματικών αλγορίθμων 273

ΕΙΣΑΓΩΓΗ



ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΟΜΕΝΗΣ ΓΕΝΙΑΣ

Ιστορική Αναδρομή

Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν μπει για τα καλά στη ζωή μας τα τελευταία χρόνια. Ενώ οι κινητές επικοινωνίες έχουν αναπτυχθεί πάρα πολλά χρόνια πιο πριν, μόλις την τελευταία δεκαετία έχουν γίνει ιδιαίτερα γνωστές στο ευρύ κοινό. Η ευρεία ανάπτυξη και χρήση του δικτύου GSM (Global System for Mobile Communications) ήταν ένα πρώτο βήμα για την περαιτέρω ενασχόληση των επιστημόνων με τις κινητές επικοινωνίες, προσπαθώντας να δώσουν νέα στοιχεία στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών.

Τα συστήματα *2ης γενιάς (2G)* εισήχθησαν στην αγορά το 1991 και προσέφεραν ικανοποιητική ποιότητα φωνής και αποδοτική χρησιμοποίηση του φάσματος. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν τεχνικές ψηφιακής διαμόρφωσης. Η 2η γενιά εκπροσωπείται από τα GSM, TDMA IS-136, PDC και cdmaOne, με το GSM να είναι το κυρίαρχο πρότυπο.

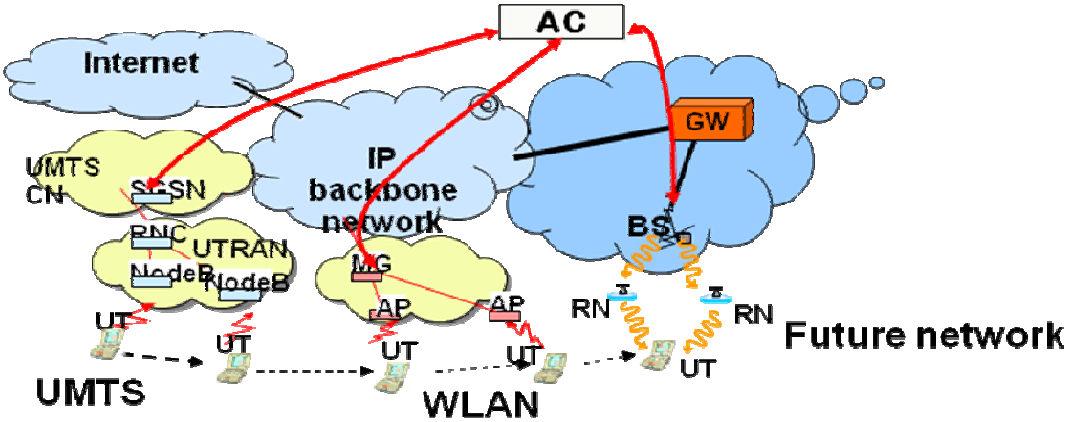
Καθώς το GSM χρησιμοποιείται κυρίως για τηλεφωνία, αναπτύχθηκε σιγά σιγά η ανάγκη για τη δημιουργία ασύρματων δικτύων που βασικός τους στόχος να είναι η παροχή υπηρεσιών δεδομένων. Για αυτό το λόγο αναπτύχθηκαν τα ασύρματα δίκτυα τοπικής περιοχής (Wireless Local Area Networks – WLANs) τα οποία μπορούσαν να παρέχουν απίστευτα υψηλές ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων σε σχέση με τις ταχύτητες του GSM. Το πρόβλημα με τα WLANs ήταν ότι, όπως περιγράφει και το όνομά τους, μπορούν να αναπτυχθούν και να λειτουργήσουν μόνο σε τοπικές περιοχές, δηλαδή έχουν πολύ μικρή εμβέλεια μερικές δεκάδες μέτρα, επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την κάλυψη μικρών χώρων, κυρίως στο εσωτερικό κτιρίων, π.χ. για την ασύρματη δικτύωση μιας εταιρίας.

Από την άλλη μεριά, η αρχιτεκτονική του συστήματος *Wi-Fi*, που είναι συμβατό με το πρότυπο IEEE 802.11, καλύπτει τόσο δομημένες τοπολογίες (κυψελωτές) όσο και αδόμητες (ad-hoc). Βασικό της στοιχείο είναι ο σταθμός (Station - STA), δηλαδή οποιαδήποτε συσκευή διαθέτει μια διεπαφή (interface) συμβατή με το πρότυπο IEEE 802.11 και επιθυμεί να συνδεθεί και να μεταδώσει στο σύστημα. Στις δομημένες τοπολογίες, η μετάδοση γίνεται μόνο από/προς το Σημείο Πρόσβασης (Access Point - AP), δηλαδή του σταθμού εκείνου που διαθέτει και διεπαφή με σταθερό δίκτυο (πχ. Ethernet), ενώ στις αδόμητες η μετάδοση γίνεται απευθείας σε οποιοδήποτε άλλο σταθμό στην περιοχή κάλυψης.

Στη συνέχεια αναπτύχθηκε το UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) το οποίο ανήκει στην *3η γενιά (3G)* των δικτύων κινητών επικοινωνιών. Το UMTS είναι ένα δίκτυο που αναπτύσσεται σε μεγάλες περιοχές, παρόμοια με το GSM, αλλά ταυτόχρονα

προσφέρει πολύ υψηλότερες ταχύτητες στη μετάδοση δεδομένων σε σχέση με το GSM. Οι ρυθμοί στη μετάδοση δεδομένων είναι της τάξης των 144 Kbps για χρήστες υψηλής κινητικότητας σε ευρείες περιοχές, 384 Kbps για χρήστες χαμηλής κινητικότητας σε ευρείες περιοχές αλλά και 2 Mbps για τοπική κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους. Η εξέλιξη από τη 2η στην 3η γενιά δεν πραγματοποιήθηκε σε ένα βήμα, αλλά ένα πολύ σημαντικό ενδιάμεσο στάδιο αποτέλεσε η λεγόμενη *2,5 γενιά (2,5G)*. Το GPRS (General Packet Radio Service) είναι ένα εξελιγμένο σύστημα GSM που προσφέρει λύσεις μεταγωγής πακέτου.

Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη του *διαδικτύου (Internet)* έφερε νέες απαιτήσεις για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Πλέον έχουν αναπτυχθεί υπηρεσίες τις οποίες δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τα υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα. Η ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service) είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας στα ασύρματα δίκτυα, μιας και οι πόροι τους είναι περιορισμένοι λόγω της φύσεως των ασύρματων ζεύξεων. Η ποιότητα υπηρεσίας είναι ένας δείκτης που καθορίζει τις απαιτήσεις που έχει κάθε υπηρεσία για την επιτυχή μετάδοσή της μέσα από ένα δίκτυο με τρόπο που θα ικανοποιεί το χρήστη. Ενώ αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου οι υπηρεσίες που προσφέρουν τα κινητά δίκτυα, αλλάζουν και οι απαιτήσεις σε σχέση με την ποιότητα των υπηρεσιών.

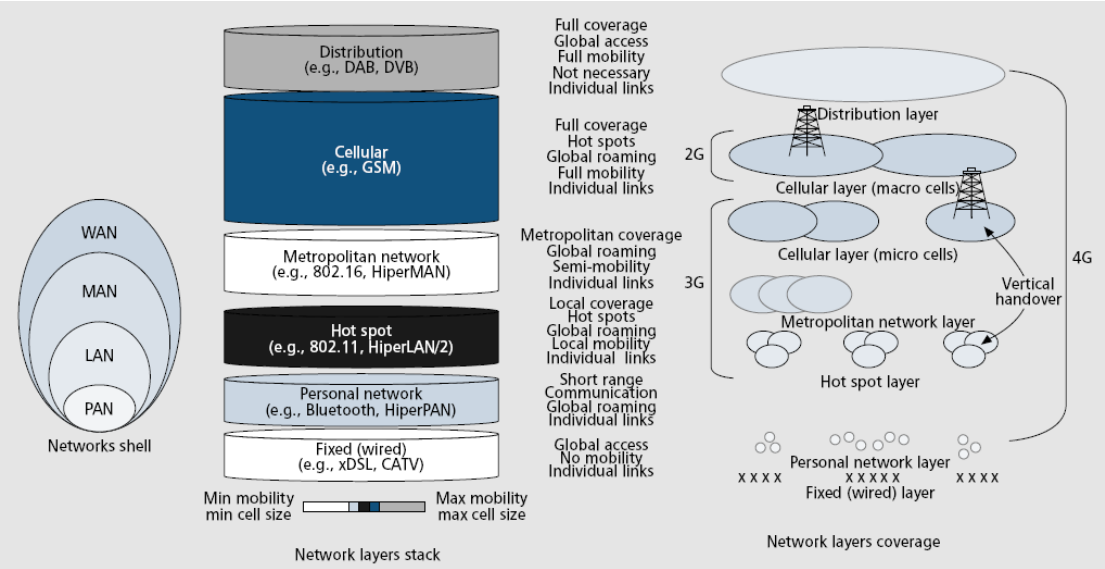


Εικόνα 0.1. Αρχιτεκτονική Δικτύου Επόμενης Γενιάς

Παρόλη την επιτυχία των δικτύων 3ης γενιάς, οι ανάγκες των χρηστών αυξάνονται δραματικά χρόνο με το χρόνο. Ήδη από το 2006 έχει αρχίσει από κάποιες εταιρίες η μελέτη για την ανάπτυξη δικτύων 4ης γενιάς ενώ ακόμα δεν είχε διαδοθεί σε όλες τις χώρες το 3G. Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2010 υπήρχαν περίπου 4.8 δισεκατομμύρια συσκευές κινητής τηλεφωνίας ενώ η κίνηση δεδομένων στις γραμμές υπερδιπλασιάζεται κάθε χρόνο [1]. Ο αριθμός αυτός επαληθεύει την ανάγκη για καλυτέρευση των δικτύων και μεταπήδηση στην επόμενη γενιά.

Τα *δίκτυα 4ης γενιάς (4G)* αποτελούν το μέλλον των κινητών επικοινωνιών. Βέβαια βρίσκονται ακόμα σε πειραματικό και ερευνητικό στάδιο δηλαδή δεν έχουν εισαχθεί ακόμη στην αγορά, ωστόσο είναι γνωστά κάποια από τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, τα

πλεονεκτήματά τους και τις υπηρεσίες τους. Η ITU έχει θέσει τα πρότυπα (standards) για την τεχνολογία αυτή. Κάποιες προσπάθειες που έγιναν από κάποιους φορείς , όπως η ανάπτυξη των Mobile WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access-IEEE 802.16m) από την IEEE που αποτελεί επέκταση του IEEE 802.16e και του LTE από την 3GPP ήταν πολύ καλύτερες από την προηγούμενη γενιά και για τον λόγο αυτό θεωρούνται οι προκάτοχοι των δικτύων 4G. Για να θεωρηθεί ένα δίκτυο ότι είναι δίκτυο «4ης γενιάς» ή όπως επίσης αναφέρεται ως IMT-advanced, η ITU θέτει ως κατώφλι για τον ρυθμό μετάδοσης τα 100Mbit/s για κινούμενους χρήστες σε μεγάλες ταχύτητες ενώ οι ρυθμοί μετάδοσης πρέπει να φτάνουν το 1Gbit/s για σταθερούς χρήστες.



Εικόνα 0.2. Εξέλιξη από δίκτυα 2G σε 4G

Οι υποδομές των δικτύων 4ης γενιάς θα αποτελούνται από διάφορα δίκτυα που χρησιμοποιούν το IP (Internet Protocol) ως κοινό πρωτόκολλο, ώστε οι χρήστες να μπορούν να επιλέγουν κάθε εφαρμογή και περιβάλλον [2][3]. Η λύση αυτή επιτρέπει τη δημιουργία νέων υπηρεσιών με επαναχρησιμοποίηση του λογισμικού εφαρμογών, ενώ η ανεξαρτησία του IP, του επιτρέπει να δουλεύει πάνω σε οποιαδήποτε τεχνολογία πρόσβασης. Αυτό σημαίνει ότι τα ετερογενή ασύρματα δίκτυα θα συγχωνευτούν σε ένα μοναδικό δίκτυο, κάνοντας έτσι την πλειοψηφία των υπηρεσιών ανεξάρτητη από τις τεχνολογίες πρόσβασης. Λόγω της ταχείας αυξανόμενης ζήτησης είναι πολύ πιθανό να χρησιμοποιηθεί η 6η έκδοση του IP (IPv6) αντί για την 4η.

Τα *δίκτυα νέας γενιάς (Next Generation Networks - NGN)*. θα χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο εύρος ζώνης, υψηλότερο ρυθμό δεδομένων και ομαλότερες-γρηγορότερες διαπομπές. Το κλειδί είναι η ενοποίηση των νέων δυνατοτήτων με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες [4][5][6][7]. Η προσαρμοστικότητα στις εφαρμογές και η υψηλή δυναμικότητα θα είναι τα κύρια χαρακτηριστικά των υπηρεσιών 4G. Τα χαρακτηριστικά αυτά σημαίνουν

ότι οι υπηρεσίες μπορούν να παραδοθούν και να είναι διαθέσιμες στην προσωπική προτίμηση διαφορετικών χρηστών.

Η ποιότητα των υπηρεσιών που θα παρέχουν τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς θα είναι εξαιρετική, αφού βασικός τους στόχος είναι η παροχή νέων υπηρεσιών που να ικανοποιούν τους χρήστες. Επειδή όμως υπάρχουν ήδη ανεπτυγμένα τα δίκτυα 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς και τα WLANs τα νέα δίκτυα θα πρέπει να κατασκευαστούν με τρόπο που να επιτρέπει τη συνεργασία με τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα, ώστε να μη δημιουργηθεί πρόβλημα στη μετάβαση σε αυτά [4][6][7] (Εικόνα 0.1). Η Εικόνα 0.2 αναπαριστά την εξέλιξη των δικτύων στα 4G [8].

Χαρακτηριστικά και Προκλήσεις των Δικτύων Επόμενης Γενιάς

Οι κινητοί χρήστες αναμένουν από τις τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες να είναι διαθέσιμες *παντού και πάντα*. Τα σημερινά ομοιογενή δίκτυα είναι ανίκανα να προσφέρουν αυτές τις απαιτήσεις διαθεσιμότητας υπηρεσιών με ικανοποιητικό τρόπο, από άποψη κάλυψης, ποιότητας υπηρεσίας, κόστους κτλ. Ωστόσο, η διασύνδεση ή ακόμη και η συνεργασία των υπαρχουσών ασύρματων τεχνολογιών μπορεί να βοηθήσει στο να επιτευχθεί καθολική διαθεσιμότητα των υπηρεσιών. Βέβαια, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών προκλήσεων που πρέπει να ξεπεραστούν, προκειμένου να παρέχεται μια υπηρεσία ικανοποιητικά σε ένα τέτοιο ετερογενές περιβάλλον, αλλά και να είναι δυνατή η πλήρης εξατομίκευση των υπηρεσιών.

Γενικά, τα ασύρματα δίκτυα ευρείας πρόσβασης, όπως τα GPRS και UMTS, έχουν μεγαλύτερη κάλυψη και υποστηρίζουν καλύτερη κινητικότητα, αλλά χαρακτηρίζονται από χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης και απαιτούν υψηλότερη ισχύ μετάδοσης στα κινητά τερματικά. Από την άλλη πλευρά τα δίκτυα τοπικής πρόσβασης, όπως τα WLAN και Bluetooth, υποστηρίζουν υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και καταναλώνουν σημαντικά λιγότερη ισχύ, αλλά προσφέρουν μικρότερη κάλυψη με περιορισμένη κινητικότητα. Η αντίστροφη σχέση μεταξύ κάλυψης και ρυθμού μετάδοσης οφείλεται στη σχέση της εξασθένισης σήματος με την απόσταση.

Παρόλο που η χρήση των κινητών τηλεφώνων γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη ανά όλο τον κόσμο, αρκετοί χρήστες είναι ακόμα διστακτικοί στη χρησιμοποίησή του για πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες. Οι δύο κύριοι λόγοι είναι οι εξής:

1) *Οι υψηλές τιμές:* Τα περισσότερα μοντέλα κοστολόγησης είναι ακόμη σχεδιασμένα για το πρωτόκολλο WAP, στα πλαίσια του οποίου ανταλλάσσονταν μικρά ποσά δεδομένων. Ως εκ τούτου, για τους χρήστες που θέλουν να έχουν πρόσβαση σε διαδικτυακές υπηρεσίες μέσω του κινητού τους τηλεφώνου, η αύξηση της κίνησης δεδομένων οδηγεί σε δραματική αύξηση του κόστους.

2) *Οι χαμηλοί ρυθμοί δεδομένων*: Οι κινητές επικοινωνίες θέτουν ορισμένα προβλήματα που δεν υφίστανται στα ενσύρματα δίκτυα, όπως οι περιορισμένοι πόροι και ιδιαίτερα οι μικροί ρυθμοί δεδομένων.

Ένας χρήστης με τερματικό πολλαπλών τεχνολογιών μπορεί να επωφεληθεί από *ετερογενείς τεχνολογίες* και επιπλέον να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών, οι οποίοι μπορεί να διαφοροποιούνται τόσο στον τύπο της υπηρεσίας όσο και στο κόστος. Ωστόσο, η απόφαση για το ποιο δίκτυο να χρησιμοποιηθεί γίνεται πιο σύνθετη, καθώς ο αριθμός των υποψήφιων δικτύων, αλλά και των κριτηρίων απόφασης, αυξάνεται. Επιπλέον, οι χρήστες δύνανται να παίξουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία απόφασης, υποδεικνύοντας τις προτιμήσεις τους σε ορισμένα κριτήρια ή ακόμη μεταβάλλοντας τις τελευταίες δυναμικά. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω, ένας σύνθετος μηχανισμός επιλογής δικτύου είναι ζωτικός για την πρόσβαση σε ετερογενή δίκτυα. Καθώς πολλαπλά μεγέθη κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης λαμβάνονται υπόψη , δεν είναι πλέον εύκολο να καταταχθούν τα υποψήφια δίκτυα ανάλογα με τις προτιμήσεις σε ένα συγκεκριμένο κριτήριο. Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει τα διαφορετικά κριτήρια να συνδυαστούν και κλιμακωθούν με έναν ουσιαστικό τρόπο. Επιπλέον, ορισμένες παράμετροι ενδέχεται να είναι αντικρουόμενες: για παράδειγμα η βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσίας μπορεί να επιφέρει ανεπιθύμητη αύξηση στο κόστος. Είναι εμφανές λοιπόν ότι ορισμένες φορές απαιτούνται συμβιβασμοί ή «ανταλλαγές».

Με τις ολοένα και περισσότερο συμφορημένες μπάντες συχνοτήτων και τη διαρκώς αυξανόμενη απαίτηση για υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, υπάρχει επιτακτική ανάγκη για καινοτόμες προσεγγίσεις, προκειμένου να αυξηθεί η αποδοτικότητα του φάσματος. Ένας τρόπος για να αυξηθούν οι ρυθμοί δεδομένων είναι η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Από την άλλη πλευρά, τα συνεργατικά συστήματα, που είναι ικανά να σχηματίζουν με έξυπνο τρόπο αμοιβαία συνεργαζόμενες οντότητες, είναι ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος για να επιτευχθεί η ζητούμενη αύξηση στη χωρητικότητα.

Προκειμένου να γίνουν πραγματικότητα τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα, θα πρέπει αφενός τα κυψελωτά και νομαδικά δίκτυα να συνεργάζονται μεταξύ τους, και αφετέρου τα τερματικά που σχηματίζουν μια ομάδα να μπορούν να αλληλεπιδρούν. Η επιθυμητή αρχιτεκτονική συνεργατικών δικτύων συνίσταται στη λήψη δεδομένων από κυψελωτά δίκτυα και την προώθησή τους σε γειτονικά τερματικά μέσω ζεύξεων μικρής εμβέλειας. Φυσικά, προϋπόθεση για τα παραπάνω αποτελεί η ικανότητα τόσο των δικτύων όσο και των κινητών συσκευών να μπορούν να συνεργαστούν αποτελεσματικά.

Η ετερογένεια των δικτύων εξασφαλίζει ένα ελάχιστο επίπεδο προσφερόμενης Ποιότητας Υπηρεσίας, αλλά και την παροχή εξατομικευμένων υπηρεσιών στο χρήστη. Η έννοια της συνεργασίας κόμβων εισάγει μια νέα μορφή διαφορικότητας που καταλήγει σε επαυξημένη αξιοπιστία της επικοινωνίας, οδηγώντας τόσο στην επέκταση της κάλυψης όσο και στην

ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ισχύος. Έρευνες έχουν δείξει ότι κατά τον τρόπο αυτό τα κινητά τερματικά είναι λιγότερα ευάλωτα σε εναλλαγές του καναλιού και φαινόμενα σκίασης, ενώ μπορούν να μεταδώσουν σε χαμηλότερα επίπεδα ισχύος, προκειμένου να επιτύχουν ένα συγκεκριμένο ρυθμό απόδοσης, αυξάνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας [9]. Επιπλέον, στρατηγικές συνεργατικής μετάδοσης μπορούν να αυξήσουν την από άκρη σε άκρη χωρητικότητα και κατά συνέπεια τη φασματική αποδοτικότητα του συστήματος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Στόχοι και Αντικείμενο της Διατριβής

Τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα θα χαρακτηρίζονται από ετερογένεια, ενσωματώνοντας διαφορετικά πρωτόκολλα και τεχνολογίες πρόσβασης, όπως τα 802.15 WPAN, 802.11 WLAN, 802.16 WMAN, GPRS/ EDGE, cdma2000, WCDMA, δορυφορικά δίκτυα κ.α. Η ποικιλία τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης, σε συνδυασμό με την εξέλιξη των κινητών τερματικών (PDAs, smart phones κτλ), προδιαγράφουν ένα μέλλον όπου ο χρήστης δε θα είναι απλά πάντα συνδεδεμένος, αλλά επιπλέον θα καλύπτεται από πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης.

Κύριος στόχος της παρούσης διδακτορικής διατριβής είναι η μοντελοποίηση μηχανισμών για αποδοτικότερη *διαχείριση πόρων σε ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς (NGN)*. Η αποδοτική κατανομή πόρων έχει ως στόχο αφενός την *παροχή καλύτερης Ποιότητας Υπηρεσιών στο χρήστη,* και αφετέρου την *αύξηση του κέρδους του παρόχου*. Για το λόγο αυτό οι μηχανισμοί διαχείρισης πόρων αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, καθώς μια ορθολογική κατανομή μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση ενός δικτύου.

Η εν λόγω διατριβή εξετάζει μια πληθώρα θεμάτων κατανομής πόρων και προτείνει λύσεις, εστιάζοντας σε μοντελοποιήσεις με τεχνικές και εργαλεία που προέρχονται από διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς και μόλις τα τελευταία χρόνια έχουν αρχίσει να βρίσκουν εφαρμογή στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα διατριβή αποτελείται από τρεις θεματολογικούς άξονες, κάθε ένας από τους οποίους παρουσιάζει διαφορετικά εργαλεία και αντιμετωπίζει προβλήματα διαφορετικής φύσεως. Στη συνέχεια ακολουθεί μια περιγραφή του περιεχομένου κάθε κύριου μέρους της διατριβής.

Μέρος Πρώτο: Επιλογή Βέλτιστου Δικτύου με χρήση Πολυκριτηριακών Μεθόδων Αποφάσεων

Οι χρήστες στο μέλλον δε θα είναι δεσμευμένοι μέσω ενός μακροπρόθεσμου συμβολαίου σε έναν πάροχο αποκλειστικά, αλλά θα μπορούν δυναμικά να αλλάζουν τρόπο πρόσβασης. Ως αποτέλεσμα, η *επιλογή του πιο αποτελεσματικού και κατάλληλου δικτύου*, προκειμένου να καλύπτονται οι απαιτήσεις του χρήστη σε Ποιότητα Υπηρεσίας, έχει γίνει ένα ιδιαίτερα σημαντικό θέμα. Η απόφαση του χρήστη σχετικά με την επιλογή του δικτύου στο οποίο θα συνδεθεί μπορεί να βασίζεται σε διάφορους παράγοντες, όπως για παράδειγμα ο φόρτος του δικτύου, η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής, το κόστος σύνδεσης κ.α. Με χρήση κατάλληλων

μαθηματικών εργαλείων μπορούν να μοντελοποιηθούν συστήματα αποφάσεων, ώστε να επιλέγεται η βέλτιστη λύση ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες.

Το πρώτο μέρος της διδακτορικής διατριβής εστιάζει στο ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα της εύρεσης μηχανισμών για επιλογή του δικτύου (network selection) που είναι ικανό να προσφέρει την υψηλότερη Ποιότητα Υπηρεσίας στο χρήστη, μέσα σε περιβάλλον ετερογενών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, αναζητούνται αρχικά κατάλληλες παράμετροι που θα αποτελέσουν ικανά κριτήρια επιλογής (Key Performance Indicators – KPIs), όπως ο ρυθμός μετάδοσης, ο σηματοθορυβικός λόγος, η καθυστέρηση πακέτων, η απώλεια πακέτων, το κόστος μετάδοσης κτλ. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται επίσης στην εύρεση της σπουδαιότητας που φέρει κάθε παράμετρος στο τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή στον προσδιορισμό βαρών. Για το λόγο αυτό εξετάζεται η χρήση μαθηματικών εργαλείων που προέρχονται από άλλους επιστημονικούς τομείς, όπως η ασαφής λογική (fuzzy logic) και οι πολυκριτηριακές μέθοδοι αποφάσεων (multi criteria decision making – MADM).

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι συνίστανται στην επιλογή μιας σειράς κριτηρίων που επηρεάζουν μια απόφαση και τη σύγκριση της μεταξύ τους σημασίας, ώστε να μπορεί να επιλεχθεί η βέλτιστη λύση από ένα σύνολο εναλλακτικών. Πιο συγκεκριμένα, μερικές από τις μεθόδους που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι AHP και Fuzzy AHP για τον προσδιορισμό των βαρών των παραμέτρων, καθώς και οι ELECTRE και TOPSIS για την επιλογή του βέλτιστου δικτύου. Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ενσωμάτωση της έννοιας του κόστους στη λήψη της απόφασης, καθώς ο χρήστης δεν αναζητεί μόνο τη βέλτιστη Ποιότητα Υπηρεσιών, αλλά και το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Το πρώτο μέρος της διατριβής παρουσιάζει αρχικά εποπτικά το πρόβλημα της επιλογής δικτύου και συζητούνται μερικές από τις πιο διαδεδομένες προσεγγίσεις, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις σημαντικότερες πολυκριτηριακές μεθόδους. Τέλος, στα επόμενα Κεφάλαια επεξηγούνται οι προτεινόμενες μέθοδοι επιλογής δικτύου και παρουσιάζονται αριθμητικά/πειραματικά αποτελέσματα.

Μέρος Δεύτερο: Εφαρμογή Θεωρίας Παιγνίων σε Μηχανισμούς Αποφυγής Συμφόρησης και Μηχανισμούς Κινήτρων

Δεδομένου ότι στα πλαίσια της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής εξετάζονται και μηχανισμοί λήψης αποφάσεων, η χρήση της θεωρίας παιγνίων (game theory) κρίνεται ως εργαλείο ζωτικής σημασίας. Η *θεωρία παιγνίων* είναι ένα μαθηματικό εργαλείο που αναπτύχθηκε για να μοντελοποιεί ανταγωνιστικές καταστάσεις, όπου οι παίκτες πρέπει να επιλέγουν δράσεις, οι οποίες έχουν αμοιβαίο (και ίσως αντικρουόμενο) αντίκτυπο, ενώ τα παίγνια μπορεί να είναι είτε συνεργατικά είτε μη συνεργατικά. Τα τελευταία χρόνια η θεωρία παιγνίων έχει εφαρμοστεί ευρέως στο πεδίο των τηλεπικοινωνιών, κυρίως για να

μοντελοποιηθούν πλαίσια συνεργασίας ανάμεσα σε κόμβους, τερματικά ή παρόχους δικτύων, με απώτερο σκοπό να λυθούν προβλήματα όπως η δρομολόγηση πακέτων ή η κατανομή πόρων σε ανταγωνιστικά περιβάλλοντα.

Στο δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής γίνεται μοντελοποίηση των μεθοδολογιών εφαρμογής της θεωρίας παιγνίων σε προβλήματα κατανομής πόρων. Πιο συγκεκριμένα, μερικά από τα θέματα που εξετάζονται είναι τα εξής:

- Αλγόριθμοι αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα δίκτυα με χρήση παιγνίων
- Αλγόριθμοι ελέγχου φορτίου με χρήση παιγνίων
- Υποκίνηση συνεργασίας σε αδόμητα (ad hoc) δίκτυα
- Εγγύηση Ποιότητας Υπηρεσίας για τους πελάτες με ταυτόχρονη αύξηση κέρδους για τους παρόχους

Με χρήση της θεωρίας παιγνίων μπορούν να υλοποιηθούν πλαίσια συνεργασίας, όπου οι χρήστες ανταλλάσσουν πόρους δυναμικά: κάποια τερματικά θα μπορούν να λειτουργήσουν ως ενδιάμεσοι κόμβοι (relays), θυσιάζοντας τους δικούς τους πόρους, προκειμένου να ωφεληθεί κάποιο άλλο τερματικό. Φυσικά, προκειμένου να πραγματοποιηθεί ένα τέτοιο σενάριο και οι χρήστες να μην ακολουθούν εγωιστική συμπεριφορά, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν μηχανισμοί κινήτρων (incentive mechanisms). Ο σκοπός τους είναι να παρέχουν κίνητρα στους χρήστες, ώστε να συνεργάζονται μεταξύ τους, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το συμφέρον τόσο το δικό τους όσο και του συνόλου.

Το δεύτερο μέρος της διδακτορικής διατριβής εστιάζει σε όλα τα παραπάνω θέματα. Αρχικά δίνεται μια αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών της θεωρίας παιγνίων, καθώς και μια επισκόπηση των εφαρμογών της πάνω σε προβλήματα κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα. Στη συνέχεια μοντελοποιείται το πρόβλημα της αποδοχής κλήσεων ως μη συνεργατικό παίγνιο, τόσο για την περίπτωση που τα δίκτυα ανταγωνίζονται μεταξύ τους όσο και για την περίπτωση που τα δίκτυα ανταγωνίζονται τους χρήστες. Τέλος, γίνεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση των σπουδαιότερων μηχανισμών κινήτρων και προτείνεται ένας υβριδικός μηχανισμός για την αποτελεσματική επιβολή συνεργασίας σε αδόμητα (ad-hoc) δίκτυα.

Μέρος Τρίτο: Πρόβλεψη Ποιότητας Υπηρεσιών και Κατανομή Ισχύος με Χρήση Συστημάτων Ασαφούς Συμπερασμού

Η ασαφής λογική, που εισήχθηκε από το Zadeh το 1965, προσφέρει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης της έννοιας της ασάφειας/αβεβαιότητας σε σύνθετα προβλήματα: μια μεταβλητή μπορεί να εκφραστεί ως ασαφής αριθμός (fuzzy number), είτε επειδή η ακριβής τιμή της είναι αδύνατον να καταγραφεί είτε επειδή το κόστος υπολογισμού της τιμής της είναι πολύ μεγάλο. Η ασαφής λογική εκφράζει την απόδοση των παραμέτρων με χρήση

λεκτικών όρων (linguistics), αντί για καθαρούς αριθμούς. Στη συνέχεια οι λεκτικές περιγραφές δύνανται να μετατραπούν σε ασαφείς αριθμούς μέσω κατάλληλης κλίμακας μετατροπής. Επιπλέον ορίζεται ένα σύνολο κανόνων EAN-TOTE, μέσω των οποίων προσδιορίζεται ο αντίκτυπος κάθε παραμέτρου στο τελικό αποτέλεσμα και εξετάζεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραμέτρων.

Το τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής εστιάζει στη χρησιμοποίηση συστημάτων ασαφούς λογικής (fuzzy inference systems) για επίλυση προβλημάτων κατανομής ισχύος. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικά καταναλισκόμενης ισχύος με ταυτόχρονη διατήρηση της πιθανότητας αποκοπής (outage probability) σε αποδεκτά επίπεδα. Η χρήση των συστημάτων ασαφούς λογικής προτείνεται έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη μια πληθώρα παραμέτρων που επηρεάζουν τη μετάδοση της πληροφορίας, αλλά και ώστε οι αλγόριθμοι που προκύπτουν να διαφοροποιούνται ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες (και άρα την περιοχή) του υπό εξέταση σεναρίου. Γίνεται μοντελοποίηση για δορυφορικά δίκτυα, για συστήματα LMDS καθώς και γενικότερα για συστήματα CDMA.

Τέλος, η διδακτορική διατριβή ολοκληρώνεται με την εφαρμογή των συστημάτων ασαφούς λογικής σε μετρήσεις αληθινών δικτύων, με σκοπό την κατασκευή συστημάτων πρόβλεψης. Με χρήση της ασαφούς λογικής ερευνώνται τα μοτίβα των δεδομένων και παρουσιάζονται εκτιμήσεις με βάση συγκεκριμένες παραμέτρους εισόδου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ

[1] Amit Kumar, Dr. Yunfei Liu, Dr. Jyotsna Sengupta, "LTE-Advanced and Mobile WiMAX: Meeting the IMT-Advanced specifications for 4G", International Journal of Computer Science and Technology, IJCST Vol. 1, Issue 1, September 2010, pp. 7 – 10.

[2] Keiji Tachikawa, "A perspective on the evolution of mobile communications", IEEE Communications Magazine, October 2003.

[3] M. Katz, F.H.P. Fitzek, "Cooperative Techniques and Principles Enabling Future 4G Wireless Networks", in The International Conference on EUROCON 2005, pages 21-24.

[4] K. Rikitake, K. Nakao, "NGN and internet: From coexistence to integration", Innovations in NGN: Future Network and Services 2008 (K-INGN 2008), First ITU-T Kaleidoscope Academic Conference.

[5] U. Hany, A.B.M. Siddique Hossain, P.K. Saha, "QoS optimization and performance analysis of NGN", International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), 2010.

[6] Shabnam Ladan, Alireza Yari, "Evaluation of Migration Scenarios toward NGN Considering Economic Aspects", IEEE GLOBECOM 2008.

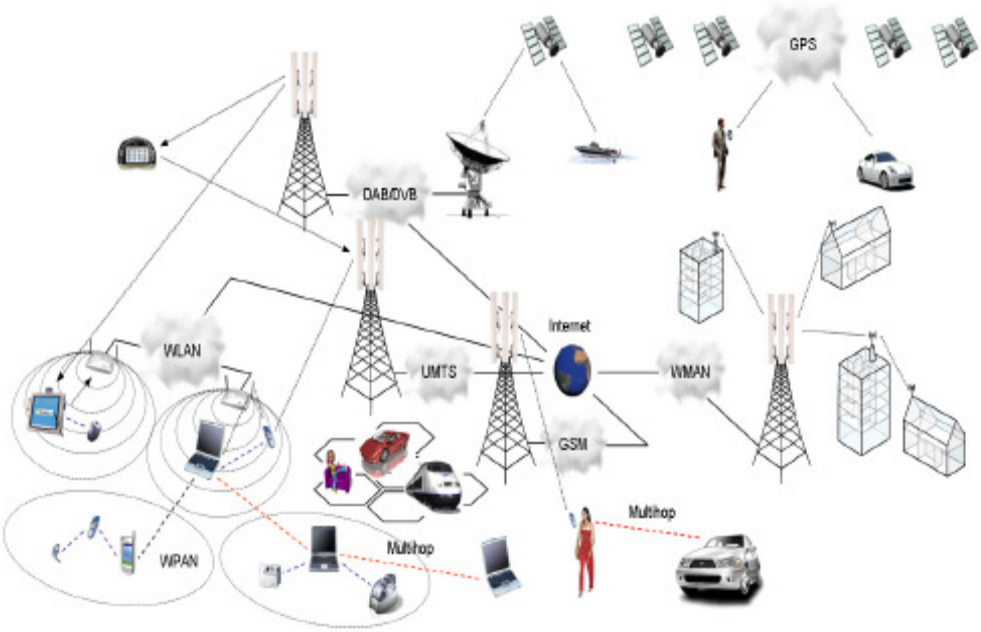
[7] Keith Knightson, Naotaka Morita, Thomas Towle, "NGN architecture: Generic principles, functional architecture, and implementation", IEEE Communications Magazine, vol. 43, no. 10, pp. 49-56, October 2005.

[8] S. Frattasi, H. Fathi, F.H.P Fitzek, R. Prasad, M.D. Katz, "Defining 4G technology from the users perspective", IEEE Network, Volume 20, Issue 1, pp 35-41, 2006.

[9] S. Frattasi, A. Mihovska, F.H.P. Fitzek, S. Kyriazakos, R. Prasad, "Service Architecture and Management in Beyond 3G Systems", in Proceedings of the 14th Wireless World Research Forum (WWRF), 2005, San Diego, USA.

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ:

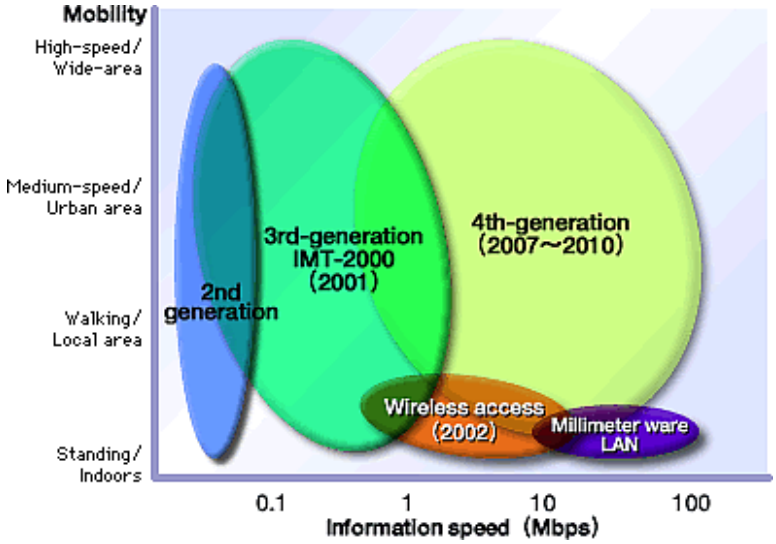
ΕΠΙΛΟΓΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.1: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

1.1.1 Εισαγωγή

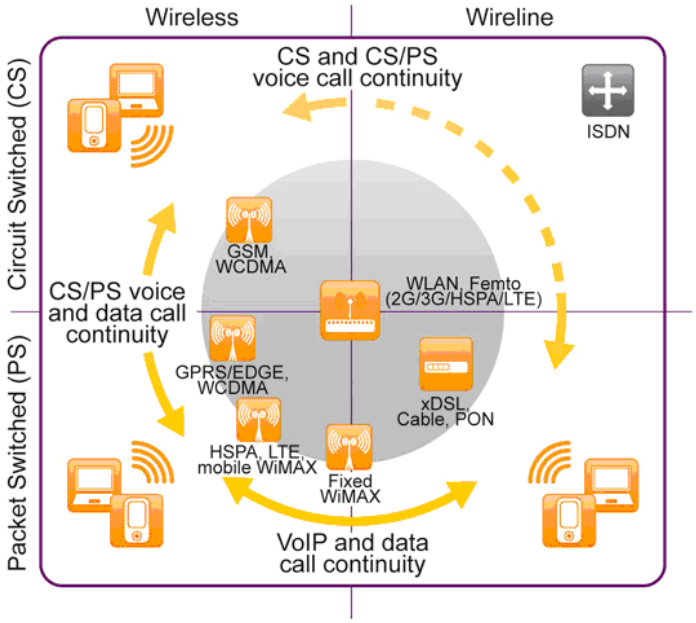
Η επόμενη γενιά των ασύρματων συστημάτων αντιπροσωπεύει ένα ετερογενές περιβάλλον με διαφορετικές τεχνολογίες δικτύων ραδιοπρόσβασης (RATs) που διαφέρουν στο εύρος ζώνης, την καθυστέρηση ή το κόστος (Εικόνα 1.1). Ταυτόχρονα, οι φορητές συσκευές όπως τα laptops, τα notebooks ή τα PDA υποστηρίζουν πολλαπλές τεχνολογίες δικτύων. Επιπλέον, οι απαιτήσεις της σύνδεσης με το Διαδίκτυο οποιαδήποτε στιγμή και οπουδήποτε αυξάνονται. Σε αυτό το είδος περιβάλλοντος, η διαχείριση κινητικότητας είναι το ουσιαστικό ζήτημα που υποστηρίζει την περιπλάνηση των χρηστών από το ένα σύστημα σε άλλο. Η Εικόνα 1.2 αποτελεί μια ένδειξη για το πώς προβλέπεται να είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των διαφορετικών τύπων δικτύων στα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G).



Εικόνα 1.1. Υποστήριξη κινητικότητας και διαθέσιμοι ρυθμοί μετάδοσης για διάφορα δίκτυα

Το όραμα της ITU για βέλτιστη συνδεσιμότητα, οπουδήποτε και οποτεδήποτε, που δημοσιεύεται στη σύσταση ITU-R M.1645 [1] δηλώνει ότι τα μελλοντικά ασύρματα δίκτυα θα μπορούσαν να υλοποιηθούν από ένα συνασπισμό διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης. Σε ένα τέτοιο σενάριο, η ετερογένεια των δικτύων πρόσβασης, τερματικών και υπηρεσιών θα πρέπει να αξιοποιηθεί πλήρως για να καταστεί δυνατή η βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων των δικτύων. Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η συνολική χωρητικότητα του συστήματος καθώς και η παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας στους χρήστες. Επί του παρόντος, η 3GPP (3rd Generation Partnership Project) καθορίζει τη διαδικασία ανακάλυψης και επιλογής δικτύου (*Access Network Discovery and Selection Function - ANDSF*) [2], ώστε

να βοηθηθούν οι κινητές συσκευές στην ανακάλυψη και επιλογή δικτύου πρόσβασης. Στην πραγματικότητα, το ANDSF χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση 3GPP και μη 3GPP δικτύων. Η προδιαγραφή 3GPP TR 22.912 [3] καθορίζει τις απαιτήσεις για τις διαδικασίες επιλογής δικτύου για μη 3GPP τύπους πρόσβασης, π.χ. Bluetooth, WLAN και ενσύρματες συνδέσεις), καλύπτοντας τόσο την αυτόματη όσο και τη χειροκίνητη επιλογή, καθώς και διαχείριση παρόχου και τελικού χρήστη. Σκοπός των προδιαγραφών αυτών είναι να εξασφαλίσουν προβλέψιμη συμπεριφορά και να επιτρέψουν στην εφαρμογή/χρήστη να επιλέξει τον καταλληλότερο τύπο πρόσβασης για τη ζητούμενη υπηρεσία.

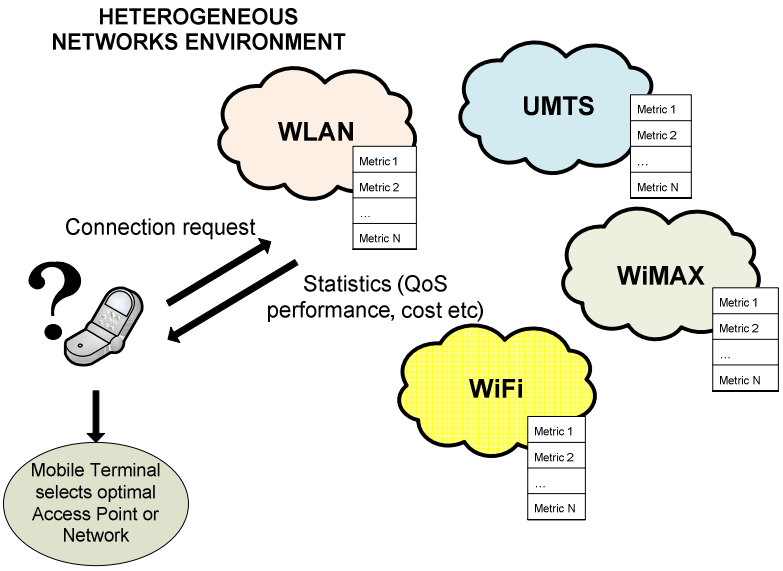


Εικόνα 1.2. Διασυνδεσιμότητα μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών τύπων δικτύων

Επιπλέον, η ομάδα IEEE 802.21 αναπτύσσει πρότυπα για διαπομπές μεταξύ των ετερογενών στρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων των IEEE 802 και μη- IEEE 802 δικτύων [4], ενώ η τεχνική προδιαγραφή 3GPP stage 2 [5] καλύπτει την αρχιτεκτονική 3GPP Interworking WLAN (I-WLAN) με δίκτυα 2G και 3G. Σε αυτήν την προδιαγραφή συζητούνται τα ζητήματα επιλογής δικτύων και παρουσιάζονται ιδέες εμπνευσμένες από τα επίγεια δίκτυα PLMN (Public Land-based Mobile Network).

Η επιλογή επομένως του πιο αποτελεσματικού και κατάλληλου δικτύου πρόσβασης, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας συγκεκριμένων εφαρμογών, έχει γίνει ένα ιδιαίτερα σημαντικό θέμα και ο πραγματικός στόχος του είναι η μεγιστοποίηση της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας στον τελικό χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος αυτής της διαδικασίας είναι η παροχή βοήθειας στο χρήστη/κινητό τερματικό ώστε να συνδεθεί με το δίκτυο ραδιοπρόσβασης που θα εξυπηρετήσει καλύτερα την αιτούμενη υπηρεσία, σύμφωνα με μια λίστα κριτηρίων, τα οποία μπορεί να αναφέρονται

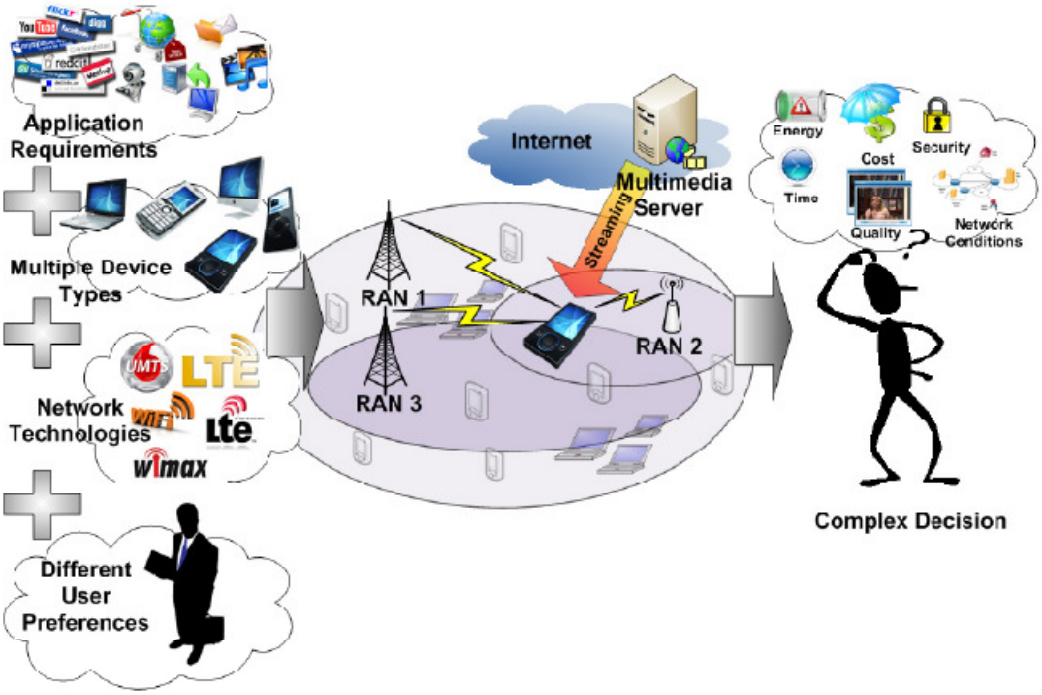
σε τεχνικά χαρακτηριστικά, οικονομικά μεγέθη, κτλ. Η επιλογή δικτύων είναι ένα σημαντικό μέρος των πελατο-κεντρικών μοντέλων για ασύρματες υπηρεσίες [6]. Σύμφωνα με αυτά τα μοντέλα, οι χρήστες είναι ελεύθεροι να αλλάξουν πάροχο υπηρεσιών ή σημείο ασύρματης πρόσβασης, επιλέγοντας εκείνο με τα πιο ικανοποιητικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς, προκειμένου να υποστηριχθεί το όραμα του "*Always Best Connected and Served*" (ABC&S), επιβάλλεται να εφαρμοστούν αποτελεσματικοί μηχανισμοί επιλογής σημείου πρόσβασης.



Εικόνα 1.3. Το πρόβλημα επιλογής δικτύου

Η επιλογή δικτύου είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα κατανομής πόρων και αντιμετωπίζεται στη βιβλιογραφία χρησιμοποιώντας είτε δικτυο-κεντρικές (network-centric) είτε ανθρωπο-κεντρικές (user-centric) προσεγγίσεις. Επιπλέον, υβριδικές ή ανθρωπο-βοηθούμενες (user-assisted) προσεγγίσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Η επιλογή της πιο αποτελεσματικής τεχνικής εξαρτάται από χαρακτηριστικά όπως η αρχιτεκτονική του δικτύου, το περιβάλλον μετάδοσης, ο φόρτος του δικτύου, οι υποστηριζόμενες υπηρεσίες, κτλ. Με την δικτυο-κεντρική προσέγγιση, ένας κεντροποιημένος ελεγκτής αναθέτει πόρους δικτύου στις συνδέσεις που βρίσκονται εντός της περιοχής εξυπηρέτησης. Ωστόσο, στην προσέγγιση αυτή εμπλέκονται όλα τα διαθέσιμα δίκτυα και δημιουργείται σημαντικός φόρτος επικοινωνίας. Επιπλέον, οι χρήστες θα πρέπει να λειτουργούν συνεργατικά, υπακούοντας την απόφαση του κεντρικού ελεγκτή. Από την άλλη πλευρά, με την ανθρωπο-κεντρική προσέγγιση, οι αλγόριθμοι επιλογής δικτύου υλοποιούνται στην πλευρά του χρήστη. Η προσέγγιση αυτή είναι κατανεμημένη και έχει χαμηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης και χαμηλό φόρτο επικοινωνίας. Ωστόσο, αν δεν έχει μοντελοποιηθεί σωστά μπορεί να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση του συστήματος. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της όμως είναι ότι μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε αυτόνομα συστήματα όπου οι χρήστες λαμβάνουν ανεξάρτητα τις αποφάσεις τους με βάση το μοντέλο ABC&S. Για το λόγο αυτό

θα εστιάσουμε σε ανθρωπο-κεντρικές προσεγγίσεις για επιλογή δικτύου, αφού επιτρέπουν την ενσωμάτωση μιας μεγάλης ποικιλίας κριτηρίων απόφασης, όπως οι προτιμήσεις του χρήστη. Η Εικόνα 1.3 αναπαριστά το πρόβλημα επιλογής δικτύου, ενώ η Εικόνα 1.4 δείχνει σχηματικά τις κατηγορίες κριτηρίων που μπορεί να επηρεάσουν τη διαδικασία απόφασης [7].



Εικόνα 1.4. Επιλογή δικτύου σε ετερογενή περιβάλλοντα

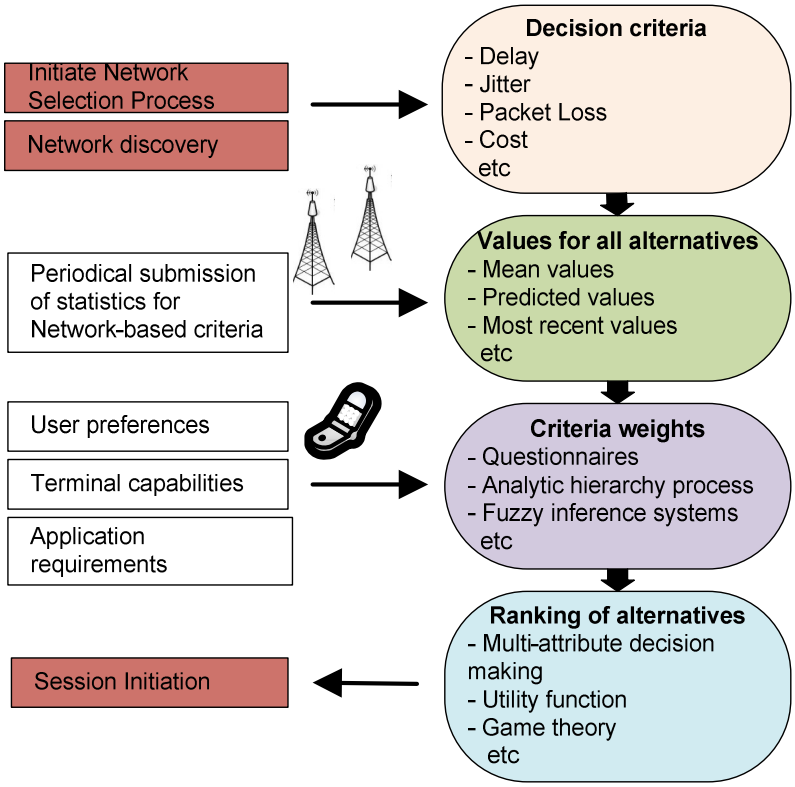
1.1.2 Διαδικασίας Επιλογής Βέλτιστου Δικτύου

Η επιλογή δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνθετο πρόβλημα που εμπεριέχει διάφορα επιμέρους προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν προκειμένου ο χρήστης να μπορέσει να πραγματοποιήσει την τελική επιλογή του. Γενικά, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαδικασίας επιλογής δικτύου αποτελείται από τέσσερα στάδια [8]. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων κάθε ένα από αυτά αποτελεί μια ανεξάρτητη διαδικασία, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις δεν έχουν όλα εφαρμογή. Τα στάδια αυτά είναι:

1. *Η επιλογή των κριτηρίων απόφασης*: το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αναγνώριση όλων των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διάρκεια της απόφασης.
2. *Συλλογή μέσων τιμών για τα επιλεγμένα κριτήρια*: για όλες τις παραμέτρους που επιλέχθηκαν στο προηγούμενο βήμα, συλλέγεται η απόδοση κάθε υποψήφιου δικτύου (τιμές των παραμέτρων).
3. *Εκτίμηση του βάρους κάθε κριτηρίου*: τα βάρη για τις επιλεγμένες παραμέτρους προσδιορίζονται. Τα βάρη δείχνουν τη σημασία που φέρει κάθε παράμετρος στον

προσδιορισμό του τελικού αποτελέσματος (δηλαδή την απόφαση). Το άθροισμα όλων των βαρών πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα.

4. *Κατάταξη των εναλλακτικών*: τελικά πραγματοποιείται η κατάταξη των εναλλακτικών, μέσα από την οποία διακρίνεται η βέλτιστη επιλογή. Η διαδικασία κατάταξης βασίζεται στην πληροφορία που προέρχεται από τα δύο προηγούμενα βήματα.



Εικόνα 1.5. Βασικά στάδια της επιλογής δικτύου

Τα στάδια αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 1.5. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο χρήστης/κινητό τερματικό είναι υπεύθυνος για την επιλογή των κριτηρίων απόφασης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Έπειτα κάθε δίκτυο πρέπει να διαθέσει τις απαιτούμενες πληροφορίες και να υπολογιστούν τα βάρη των κριτηρίων με βάση τον αλγόριθμο που έχει επιλεχθεί για αυτό το σκοπό. Τέλος, πραγματοποιείται η κατάταξη και λαμβάνεται η απόφαση. Το κινητό τερματικό μπορεί πλέον να συνδεθεί με το δίκτυο που διακρίθηκε ως βέλτιστη επιλογή. Σημειώνεται ότι η περιγραφόμενη διαδικασία αποτελεί μια ανθρωπο-κεντρική προσέγγιση, αφού τα δίκτυα πρόσβασης επηρεάζουν την τελική απόφαση μόνο έμμεσα, μέσα από τις πληροφορίες που παρέχουν στο χρήστη. Οι αποφάσεις επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από contextual πληροφορίες, όπως οι προτιμήσεις του χρήστη, οι δυνατότητες του κινητού τερματικού, η αρχιτεκτονική του δικτύου, οι απαιτήσεις της εφαρμογής, κτλ. Στις επόμενες παραγράφους επεξηγείται κάθε ένα από τα προαναφερθέντα στάδια.

1.1.3 Επιλογή Κριτηρίων Απόφασης

Σε γενικές γραμμές οι υπάρχοντες συμβατικοί αλγόριθμοι που βασίζονται σε ένα μόνο κριτήριο δεν μπορούν να αντιδράσουν εύκολα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες περιβάλλοντος και τη συσσωρευμένη ανθρώπινη γνώση. Συνήθως δεν μπορούν να αντιμετωπίσουν τις διαφορετικές οπτικές και στόχους των παρόχων, των χρηστών και τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσιών, γεγονός που τους καθιστά ακατάλληλους για ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα όπως η επιλογή δικτύου.

Η επιλογή του βέλτιστου δικτύου δεν είναι πια θέμα μόνο παραμέτρων QoS. Αντιθέτως, πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια ποικιλία κριτηρίων. Προκειμένου να εγγυηθεί η ποιότητα υπηρεσίας, το δίκτυο ελέγχει διάφορες παραμέτρους όπως το εύρος ζώνης, η καθυστέρηση και το τρεμούλιασμα. Οι παράμετροι αυτές είναι χρήσιμες από τεχνικής απόψεως, αλλά δεν αντικατοπτρίζουν την ικανοποίηση του χρήστη. Από την άλλη μεριά, ο χρήστης λαμβάνει αποφάσεις με βάση την ικανοποίησή του, που είναι υποκειμενική και μπορεί να μοντελοποιηθεί με μια συνάρτηση ωφέλειας (utility function). Αξίζει να αναφερθεί ότι κάποιες από τις πληροφορίες των κριτηρίων μπορεί να είναι ανακριβείς από τη φύση τους ή να είναι δύσκολο να αποκτηθούν οι ακριβείς πληροφορίες.

Η αξιολόγηση της απόδοσης ενός ασύρματου δικτύου προϋποθέτει την ύπαρξη επαρκών μετρικών που αντικατοπτρίζουν την πραγματική ικανότητα ενός δικτύου να ικανοποιήσει τους χρήστες του, μαζί με τις προτιμήσεις κάθε χρήστη. Οι Δείκτες Απόδοσης (*Key Performance Indicators* - KPIs*)*, ένα σύνολο μετρικών που χρησιμοποιούνται για να παρατηρούν την κατάσταση του δικτύου οποιαδήποτε στιγμή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό. Μια μεγάλη ποικιλία δεικτών απόδοσης μπορεί να βρεθεί στην τεχνική περιγραφή 3GPP TR 32.814 [9].Οι δείκτες απόδοσης μπορούν να διαχωριστούν σε δύο τύπους ανάλογα με το αν περιγράφουν τους πόρους του δικτύου (π.χ. διαθεσιμότητα εύρους ζώνης, κάλυψη, κτλ) ή την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας. Οι κύριοι δείκτες απόδοσης που σχετίζονται με την ποιότητα υπηρεσίας μπορούν να μετρηθούν σε κάθε δίκτυο μεταγωγής πακέτου. Μερικοί δείκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήρια αξιολόγησης είναι η καθυστέρηση, το τρεμούλιασμα, ο ρυθμός λαθών (Bit Error Rate – BER), η μέση ρυθμοαπόδοση, κτλ.

Άλλα σημαντικά κριτήρια που επηρεάζουν την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των ασυρμάτων δικτύων πηγάζουν από τις προτιμήσεις κάθε χρήστη. Για παράδειγμα, το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών είναι υψηλής σημασίας για το χρήστη και θα πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε συνάρτηση με άλλα κριτήρια. Με βάση τα παραπάνω μπορούν να διακριθούν τρεις κατηγορίες κριτηρίων, σύμφωνα με τη φύση τους:

- *Κριτήρια που αφορούν το δίκτυο*: τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η απόδοση των δικτύων πρόσβασης, με τη μορφή κάποιων δεικτών απόδοσης. Τα κριτήρια αυτά αφορούν το δίκτυο αυτό καθεαυτό και όχι την παροχή υπηρεσιών.
- *Κριτήρια που αφορούν την υπηρεσία*: αφορούν την ποιότητα υπηρεσίας που παρέχεται στον τελικό χρήστη μέσα από μια σειρά δεικτών απόδοσης. Αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη κατηγορία κριτηρίων, αφού περιλαμβάνει βασικές μετρικές των δικτύων μεταγωγής πακέτου.
- *Κριτήρια που αφορούν το χρήστη*: είναι υποκειμενικά κριτήρια και εκφράζουν διάφορες πτυχές της ικανοποίησης του τελικού χρήστη. Λόγω της αβεβαιότητας που φέρουν, τα κριτήρια αυτά εκφράζονται συνήθως με λεκτικούς όρους.

Criteria Type	**Decision Criterion**	**Subjective (S) / Objective (O)**
Network - based (Network characteristics)	Utilization (%)	O
	Reliability (%)	S/O
	Coverage (%)	S/O
	Seamlessness	S
	Number of active users	O
	Anonymity (%)	S
	Security (%)	S
Service – based (Quality of Service)	Delay (sec)	O
	Jitter (sec)	O
	Packet Loss (%)	O
	Average Throughput (kbps)	O
	Bit Error Rate (%)	O
	Signal Interference Ratio (dB)	O
	Sojourn time (sec)	S/O
	Forced Termination Probability(for handovers)	O
	Blocking probability	O
User – based (User Preferences, Terminal capabilities)	Cost (monetary unit)	S/O
	Battery Consumption (Joules)	S/O
	Velocity (m/sec)	S/O

Πίνακας 1.1. Κατηγοριοποίηση των κριτηρίων απόφασης

Ο Πίνακας 1.1 παρουσιάζει μια κατηγοριοποίηση των κριτηρίων που δύνανται να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία επιλογής δικτύου. Τα κριτήρια αυτά απαντώνται συχνά στη βιβλιογραφία, ενώ παρέχεται και μια ένδειξη για το αν είναι υποκειμενικά (subjective) ή αντικειμενικά (objective). Ο σκοπός αυτής της πληροφορίας είναι η παροχή ένδειξης για το πώς μπορούν να αποκτηθούν τα σχετικά δεδομένα: οι αντικειμενικές μετρικές μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια και άρα να ποσοτικοποιηθούν, ενώ οι υποκειμενικές μετρικές μπορούν μόνο να εκτιμηθούν, συνήθως με τη μορφή ασαφών αριθμών.

Στην αναφορά [10] προτείνεται η χρήση ασαφούς λογικής για την αντιμετώπιση της ανακριβούς πληροφορίας ορισμένων κριτηρίων. Ενώ τα αντικειμενικά κριτήρια αναπαρίστανται από καθαρούς αριθμούς, τα υποκειμενικά εκφράζονται με ασαφείς αριθμούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ασαφείς τριγωνικοί αριθμοί και

εκφράζονται ως (l, m, u) όπου l είναι η ελάχιστη δυνατή τιμή, m είναι η πιο πιθανή τιμή και u είναι η μέγιστη δυνατή τιμή. Για πληροφορίες πάνω στους ασαφείς αριθμούς ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Κεφάλαιο 3.1 της παρούσης διατριβής.

Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον αλγόριθμο που προτείνεται στην αναφορά [10], η απόφαση για διαπομπή βασίζεται σε συνδυασμό υποκειμενικών και αντικειμενικών κριτηρίων. Αυτό επιβάλλεται από το γεγονός ότι είναι αδύνατο να μετρηθούν τα χαρακτηριστικά της μετάδοσης, όπως η καθυστέρηση και η απώλεια πακέτων, πριν να πραγματοποιηθεί η διαπομπή, αφού μόνο περιορισμένες πληροφορίες, όπως ο σηματοθορυβικός λόγος ή το εκτιμώμενο διαθέσιμο εύρος ζώνης, μπορούν να αποκτηθούν εκ των προτέρων. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες από τις παραμέτρους θεωρούνται ως *Smaller-the-better*, που σημαίνει ότι μικρές τιμές είναι επιθυμητές. Αντίθετα, παράμετροι όπως η ρυθμοαπόδοση (throughput), η κάλυψη (coverage) και η αξιοπιστία (reliability) θεωρούνται ως *Larger -the-better*, αφού όσο υψηλότερες είναι οι τιμές τους τόσο πιο ικανοποιημένος θα είναι ο χρήστης.

1.1.4 Συλλογή Μέσων Τιμών

Ένα σετ από χαρακτηριστικά κάθε υποψήφιου δικτύου πρέπει να δοθεί ως είσοδος στον αλγόριθμο απόφασης προκειμένου να εφαρμοστεί η διαδικασία επιλογής. Ωστόσο, το βήμα αυτό τείνει να αγνοείται στις περισσότερες περιπτώσεις που συναντώνται στη βιβλιογραφία, παρόλο που δίνεται μεγάλη έμφαση στη διαμόρφωση σύνθετων μηχανισμών αποφάσεων. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων δεν εξετάζεται καθόλου το θέμα του ποια μέθοδος συλλογής μέσων τιμών είναι η καταλληλότερη.

Η απλούστερη λογική επιλογή θα ήταν η συλλογή *μέσων τιμών* από προηγούμενες συνόδους. Αυτή η προσέγγιση θεωρείται λογική, αφού μια κατάσταση που υπήρξε κυρίαρχη στο παρελθόν είναι λογικό να επικρατήσει ξανά. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου είναι εγγυημένη μόνο στις περιπτώσεις που τα δίκτυα παρουσιάζουν μια σχετικά σταθερή κατάσταση. Με άλλα λόγια, «αφύσικες» καταστάσεις δεν μπορούν να εκφραστούν, ακόμη κι αν συμβαίνουν περιοδικά.

Η δεύτερη πιο λογική επιλογή θα ήταν η συλλογή των *πρόσφατων τιμών*, οι οποίες απεικονίζουν επιτυχώς την τωρινή κατάσταση του δικτύου. Οι τιμές αυτές αγνοούν ωστόσο την πληροφορία που μπορεί να παρασχεθεί από τις προηγούμενες συνόδους και συνεπώς θεωρούν ότι αν συμβεί μια «αφύσικη» κατάσταση, τότε αυτή θα συνεχίσει να υφίσταται.

Από την άλλη πλευρά, η *πρόγνωση δεδομένων* (forecasting) μπορεί να εφαρμοστεί προκειμένου να προβλεφτούν οι μελλοντικές τιμές των μετρικών με βάση την ιστορία των δεδομένων. Για παράδειγμα, με βάση την ώρα της ημέρας και το μοτίβο χρησιμοποίησης, πολλές παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας, όπως η χρησιμοποίηση ενός σημείου ασύρματης

πρόσβασης, μπορούν να προβλεφτούν μέχρι σε ένα βαθμό. Τυπικά οι παρατηρούμενες τιμές εκφράζονται με τη μορφή χρονοσειρών, δηλαδή ως συλλογή παρατηρήσεων διατεταγμένη στο χρόνο. Ντετερμινιστική πρόγνωση δεδομένων μπορεί να επιτευχθεί με χρήση μεθόδων πρόγνωσης, όπως οι *Simple Moving Averages* (SMA), *Weighted Moving Averages* (WMA), ή *Regression*. Οι τεχνικές πρόγνωσης δίνουν μη καθαρούς αριθμούς που μπορούν να εκφραστούν μέσω των ασαφών αριθμών. Οι εκτιμώμενες τιμές μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος σε συμπληρωματικές πολυκριτηριακές μεθόδους αποφάσεων (*compensating Multi Attribute Decision Making* - MADM) [11].

Method	Advantage	Disadvantage
Mean values of past sessions	Exploitation of a large number of past measurements, therefore results are more indicative.	Failure to capture the network's current status (e.g. congestion, malfunction, etc)
Most recent values	Reflect a recent status of the network that will likely to affect future values.	Values are excessively based on current status, no exploitation of past measurements.
Forecasting techniques	Intelligent exploitation of past sessions to successfully predict future values.	Imposes significant computational load and therefore cannot be applied frequently.
Sequential Bayesian estimation	Allows for the knowledge about a particular hypothesis to be incorporated in the estimation.	Prior-probabilities are rather subjective. One can get very different posterior distributions by changing what parameters have uninformative priors.
Probabilities	Rather accurate results, if the problem is modelled correctly	Applicable only for few criteria, complex modelling is required. A large series of assumptions is required.

Πίνακας 1.2. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών συλλογής τιμών

Άλλη μια μορφή πρόγνωσης δεδομένων είναι η εκτίμηση πιθανοτήτων. Η διαδικασία αυτή σχετίζεται με τις αλυσίδες Markov και τις περισσότερες φορές αφορά ένα περιορισμένο αριθμό παραμέτρων, όπως ο σηματοπαρεμβολικός λόγος (Signal Interference Ratio - SIR), η πιθανότητα αποκοπής, η πιθανότητα τερματισμού, κτλ. Στην αναφορά [12] περιγράφεται ένα μοντέλο κίνησης όπου υπολογίζεται η πιθανότητα τερματισμού των κλήσεων από διαπομπή.

Τέλος, παρουσίας ανακριβούς πληροφορίας, η επιλογή δικτύου μπορεί να υλοποιηθεί χρησιμοποιώντας σειριακές Μπαεσιανές εκτιμήσεις (*sequential Bayesian estimations)*, οι οποίες βασίζονται σε δυναμικές παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας που εκτιμώνται μέσα από bootstrap approximation [13]. Τεχνικές από τη μηχανική μάθηση (machine learning) όπως η Μπαεσιανή μάθηση μπορούν να εφαρμοστούν για να παρέχουν αξιόπιστο συμπερασμό από ελλιπείς πληροφορίες της κατάστασης δικτύου. Η μέθοδος bootstrap είναι μια προσέγγιση χωρίς παραμέτρους όπου δεν γίνονται υποθέσεις για τον πληθυσμό από τον οποίο συλλέγονται τα δείγματα και επιτρέπει την εκτίμηση των κατανομών πιθανότητας διαφόρων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας με βάση τα αποκτηθέντα δεδομένα [14].

Οι προσεγγίσεις αυτές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2, μαζί με τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους. Γενικά, προκειμένου να συλλεχθούν πιο ακριβή αποτελέσματα, η πολυπλοκότητα των χρησιμοποιούμενων τεχνικών πρέπει να αυξηθεί. Από την άλλη πλευρά, εάν το δίκτυο παρουσιάζει σταθερή συμπεριφορά, τότε οι μέσες τιμές δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Συνοψίζοντας, η επιλογή της μεθόδου συλλογής τιμών εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη σταθερότητα του συστήματος.

1.1.5 Καθορισμός Βαρών

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το βάρος, δηλαδή η σημασία, του κάθε κριτηρίου απόφασης. Σημειώνεται ότι τα κριτήρια διαφοροποιούνται με βάση το context, αφού κάθε χρήστης ή εφαρμογή μπορεί να έχει διαφορετικές απαιτήσεις. Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται εν συντομία κάποιες τεχνικές που προσφέρουν ένα σχετικά ακριβή προσδιορισμό των βαρών. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους απεικονίζονται στον Πίνακα 1.3.

Method	Advantage	Disadvantage
Questionnaires / User preferences	Allows for values of subjective criteria to be collected. Easy to implement (e.g. settings on mobile device).	No objectivity guaranteed, therefore suitable only for subjective criteria.
FIS	System configured a priori. Weights are automatically defined through rules.	System not scalable, since a huge number of rules is required. Rules themselves are also subjective. Selection of suitable conversion scales is also an issue.
ANFIS	System is self-trained through data sets. Automatic extraction of weights and conversion scales.	High complexity, constant training is required to guarantee optimality.
AHP	Easy to use and scalable method, low complexity.	Initial input required from designer.
Fuzzy AHP	Improved version of AHP. Takes advantage of fuzzy numbers to express imprecision.	Initial input required from designer. Selection of suitable conversion scales is also an issue.
Genetic Algorithms	GAs can handle arbitrary kinds of constraints and objectives. Bad proposals do not affect the end solution negatively as they are simply discarded.	GAs are very slow. There is also the risk of them finding a suboptimal solution.

Πίνακας 1.3. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών προσδιορισμού βαρών

Σε ορισμένες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία τα βάρη των κριτηρίων επιλογής καθορίζονται από τη διεξαγωγή και ανάλυση *ερωτηματολογίων*, τα οποία εκφράζουν τη συνολική αντίληψη του χρήστη για μια υπηρεσία. Παρόλα αυτά οι προσεγγίσεις αυτές βασίζονται αποκλειστικά σε απαντήσεις χρηστών για τον προσδιορισμό των σχετικών βαρών και κατά συνέπεια δεν μπορούν να θεωρηθούν ακριβείς, αφού η γνώμη και η αντίληψη του χρήστη είναι υποκειμενική.

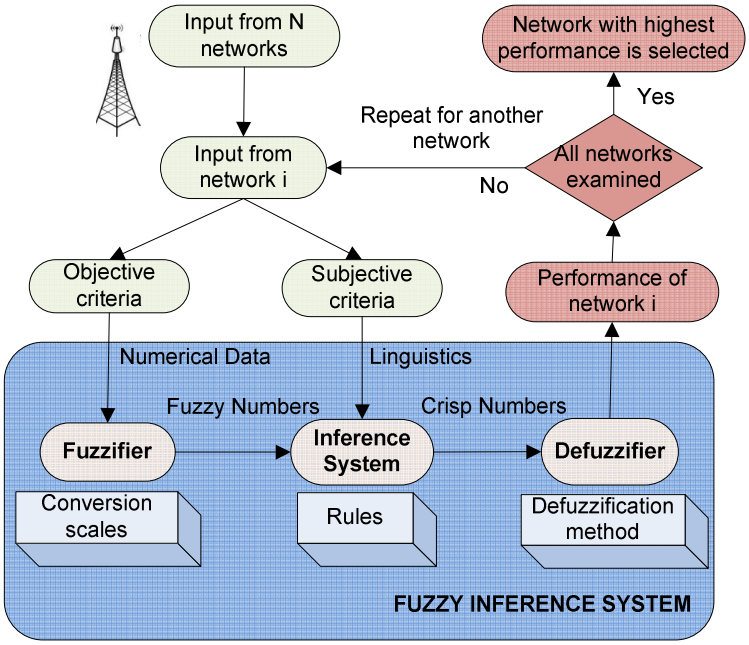
Προφανώς η μέθοδος αυτή είναι επαρκής μόνο όταν λαμβάνονται υπόψη υποκειμενικά κριτήρια, αφού για αντικειμενικά κριτήρια δεν μπορούν να εγγυηθούν ακριβή αποτελέσματα. Για παράδειγμα, οι μελλοντικές κινητές συσκευές θα μπορούν να καθορίσουν το βάρος ορισμένων παραμέτρων από τις ρυθμίσεις του χρήστη (π.χ. η επιφάνεια διεπαφής θα μπορεί να ρωτάει το χρήστη κατά τη διάρκεια της αρχικής παραμετροποίησης κατά πόσο επιθυμεί να επιλέγεται πάντα η φθηνότερη τεχνολογία πρόσβασης).

Άλλες προσεγγίσεις λαμβάνουν υπόψη χαρακτηριστικά του συστήματος και προσαρμόζουν τις τιμές των βαρών ανάλογα με την απόδοση κάθε κυψέλης, ώστε να προκύψουν περισσότερο αντικειμενικά και ορθά βάρη. Σε αρκετές περιπτώσεις έχει προταθεί η χρήση της μεθόδου *Analytical Hierarchy Process* (*AHP*). Στην αναφορά [15] προτείνεται η χρήση μετρήσεων από τα δίκτυα προκειμένου να καθοριστούν οι σχετικές προτιμήσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή της AHP. Σύμφωνα με την AHP το πρόβλημα δομείται ιεραρχικά και η σχετική σημασία των κριτηρίων απόφασης αντιμετωπίζεται έμμεσα από μια σειρά συγκριτικών κρίσεων, όπως θα περιγραφεί στην Ενότητα 1.2.3. Ο σχεδιαστής του προβλήματος παρέχει τις αρχικές του προτιμήσεις συγκρίνοντας όλα τα κριτήρια, τα υποκριτήρια και τις εναλλακτικές. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η ευκολία με την οποία χειρίζεται πολλαπλά κριτήρια. Επιπλέον, η AHP μπορεί να χειριστεί αποτελεσματικά τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά δεδομένα.

Παρά τη δημοτικότητά της βέβαια, η συμβατική AHP επικρίνεται συχνά για την ανικανότητά της να χειριστεί αποδοτικά την έμφυτη αβεβαιότητα και ανακρίβεια που σχετίζεται με την αντίληψη του σχεδιαστή. Ένας φυσικός τρόπος για να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα στις κρίσεις είναι να εκφραστούν τα ποσά σύγκρισης ως ασαφή σύνολα ή ασαφείς αριθμοί, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν την ασάφεια της ανθρώπινης σκέψης. Κατά συνέπεια αναπτύχθηκε μια ασαφής επέκταση της AHP, η *Fuzzy AHP (FAHP)*, για να αντιμετωπίσει ασαφή ιεραρχικά προβλήματα. Στην FAHP οι συγκρίσεις μεταξύ των στοιχείων του πίνακα απόφασης είναι ασαφείς αριθμοί που μεταβάλλονται ανάλογα με τους στόχους του σχεδιαστή και παρέχονται με τη μορφή λεκτικών όρων [16], οι οποίοι στη συνέχεια μετατρέπονται σε ασαφείς αριθμούς μέσα από κατάλληλες κλίμακες μετατροπής.

Από την άλλη πλευρά, οι ελεγκτές ασαφούς λογικής (Fuzzy Logic Controllers - FLC) έχουν αποδειχτεί ικανοί να παρέχουν με ακρίβεια συνεχείς συναρτήσεις. Η κατασκευή ασαφών συστημάτων συμπερασμού (*Fuzzy Inference System - FIS)* περιλαμβάνει την επιλογή διαφόρων παραμέτρων: θέση, σχήμα και κατανομή των συναρτήσεων σχετικότητας, κατασκευή κανόνων, επιλογή λογικών τελεστών, συνέπειες κανόνων, κτλ. Η διαδικασία επιλογής δικτύου με χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής απεικονίζεται στην Εικόνα 1.6. Τα βάρη προσδιορίζονται από το σύστημα συμπερασμού, μέσω της συλλογής μιας σειράς κανόνων, η έξοδος των οποίων υπολογίζεται από τη μέθοδο Mamdani [17]. Πιο

συγκεκριμένα, ο ασαφής ελεγκτής χρησιμοποιεί κανόνες της μορφής «ΕΑΝ»-«ΤΟΤΕ», οι οποίοι μπορεί να βασίζονται σε προηγούμενη εμπειρία, ερωτηματολόγια, μετρήσεις δικτύου κτλ. Μια λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας αυτών των συστημάτων περιέχεται στο τρίτο μέρος της παρούσας διδακτορικής διατριβής.



Εικόνα 1.6. Επιλογή δικτύου με χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής

Για παράδειγμα ας θεωρήσουμε ένα σύστημα ασαφούς λογικής με δύο εισόδους και μια έξοδο. Ας υποθέσουμε επιπλέον ότι ο στόχος του συστήματος είναι να προσδιορίσει το βαθμό ικανοποίησης του χρήστη με βάση τις τιμές της ποιότητας υπηρεσίας και του κόστους. Αρχικά το σύνολο τιμών κάθε μεταβλητής πρέπει να χωριστεί σε τμήματα. Η μεταβλητή συνεπώς συσχετίζεται με ένα σύνολο συναρτήσεων συμμετοχής (*Membership Functions - MFs*), οι οποίες αντιστοιχίζουν τιμές σε λεκτικούς όρους. Έπειτα κατασκευάζεται ένα σύνολο κανόνων που συσχετίζει όλες τις εισόδους με την έξοδο. Κάθε κανόνας δηλώνει έμμεσα κατά πόσο επηρεάζει κάθε είσοδος το αποτέλεσμα. Τα βάρη παράγονται τελικά από το συμπερασμό όλων των κανόνων. Ένα παράδειγμα τέτοιου κανόνα θα μπορούσε να είναι το εξής:

ΕΑΝ η προσφερόμενη ***QoS*** *είναι «Υψηλή» και το* ***κόστος*** *είναι «Πολύ χαμηλό» ΤΟΤΕ η* ***ικανοποίηση του χρήστη*** *είναι «Πολύ Υψηλή».*

Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι το μόνο προαπαιτούμενο είναι ορισμένες αρχικές εκτιμήσεις για την κατασκευή των κανόνων. Έπειτα οι κανόνες μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν ώστε να προκύπτουν βέλτιστα αποτελέσματα. Προφανώς η συμπεριφορά ενός ασαφούς συστήματος διαφοροποιείται σημαντικά αν τροποποιηθούν οι

κανόνες. Τεχνικές μάθησης μπορούν επίσης να εφαρμοστούν ώστε να βελτιστοποιηθούν οι κανόνες ή οι συναρτήσεις σχετικότητας.

Παρόλα αυτά, ο μεγάλος αριθμός των βαθμών ελευθερίας μπορεί ορισμένες φορές να καταστήσει δύσκολη την επιλογή τιμών για όλες αυτές τις παραμέτρους συγχρόνως. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα αυτό, μαζί με την ανάγκη για προσαρμοστικότητα, αναπτύχθηκε ένας διαφορετικός τύπος FIS, τα λεγόμενα προσαρμοστικά συστήματα ANFIS (*Adaptive Network based Fuzzy Inference Systems)*. Τα τελευταία είναι ασαφή συστήματα των οποίων οι συναρτήσεις συμμετοχής προσαρμόζονται με διάφορες μεθόδους, όπως η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Ένα ασαφές σύστημα του τύπου αυτού είναι ικανό να μαθαίνει από τα δεδομένα που μοντελοποιεί , αφού έχει δομή παρόμοια με αυτή ενός νευρωνικού δικτύου. Κατά συνέπεια, οι παράμετροι που σχετίζονται με τις συναρτήσεις σχετικότητας αλλάζουν κατά τη διαδικασία μάθησης. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι ο σχεδιαστής δεν υποχρεούται πλέον να καθορίσει κανόνες. Αντιθέτως, οι κανόνες παράγονται αυτόματα εισάγοντας μια σειρά από δοκιμαστικά σετ δεδομένων στο σύστημα. Στην αναφορά [17] μπορεί να βρεθεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της εφαρμογής των ANFIS στο πρόβλημα της επιλογής δικτύου.

Ωστόσο οι αλγόριθμοι αυτοί λαμβάνουν δεδομένα από διαφορετικά σημεία πρόσβασης ταυτόχρονα σε ένα στοιχείο ασαφούς λογικής, οπότε πάσχουν από προβλήματα επεκτασιμότητας και πολυπλοκότητας όταν πρέπει να προστεθεί μια εναλλακτική ή μια συνάρτηση συσχέτισης. Αυτό συμβαίνει λόγω της εκθετικής αύξησης του αριθμού των απαιτούμενων κανόνων συμπερασμού. Μια εναλλακτική προσέγγιση ακολουθείται στην αναφορά [18], όπου τα βάρη προσδιορίζονται μέσα από τη χρησιμοποίηση γενετικών αλγορίθμων (*Genetic algorithms - GA)*, οι οποίοι μπορούν να χειριστούν ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών.

1.1.6 Κατάταξη Εναλλακτικών

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των προσεγγίσεων για την κατάταξη των εναλλακτικών παρουσιάζονται εν συντομία στον Πίνακα 1.4. Η απλούστερη προσέγγιση για κατάταξη δικτύων είναι η επιλογή δικτύου από το χρήστη με βάση μια συνάρτηση ωφέλειας (utility function), η οποία βασίζεται σε μια παράμετρο ποιότητας υπηρεσίας (συνήθως διαθέσιμη ρυθμοαπόδοση ή απώλεια πακέτων) και στο κόστος ανά σύνδεση. Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο που προσφέρει την υψηλότερη τιμή σε αυτή τη συνάρτηση είναι το βέλτιστο. Στην αναφορά [19] οι συγγραφείς κατασκευάζουν μια τέτοια συνάρτηση με βάση το καταναλωτικό πλεόνασμα, που είναι η διαφορά μεταξύ της χρηματικής αξίας των δεδομένων που μεταφέρονται και του πραγματικού κόστους.

Παρόλο που οι συναρτήσεις ωφέλειας έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως, επί του παρόντος έχει αυξηθεί η ανάγκη για πιο ευφυή και δυναμικά σχήματα αφού περισσότερα κριτήρια πρέπει να ληφθούν υπόψη. Επιπλέον, οι αποφάσεις πρέπει να προσαρμόζονται ανάλογα με τις πληροφορίες που λαμβάνονται τόσο από το κινητό τερματικό όσο και από τα διαθέσιμα δίκτυα. Προσεγγίσεις όπως στο [12] θεωρούν μια σειρά παραμέτρων για τις οποίες εκτιμάται ένα σετ πιθανοτήτων. Επιλέγεται το δίκτυο που ικανοποιεί περισσότερο τις επιθυμητές πιθανότητες.

Method	Advantage	Disadvantage
Utility Function	Simple and does not impose computational load.	Only few parameters are considered, no adaptability.
Game Theory	Users behave as players, seeking their interest in an optimal manner.	Equilibrium is not always guaranteed. Protection against cheating is also needed.
FIS	System configured a priori. For a given set of values the ranking is provided automatically.	System not scalable, since a huge number of rules is required. The choice of conversion scales greatly impacts the decision.
ANFIS	System is self-trained through data sets.	Significant computational load.
Multi Attribute Decision Making	Variety of methods, easy to implement, accurate results, scalability.	Selection of the most suitable method is difficult. Normalization issues need to be addressed. Imprecise data cannot be handled.
Bayesian Learning	Exploitation of statistical data for accurate predictions.	Complexity, significant computational load.

Πίνακας 1.4. Κατηγοριοποίηση των τεχνικών κατάταξης

Οι συναρτήσεις ωφέλειας έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης σε προσεγγίσεις με χρήση θεωρίας παιγνίων. Η θεωρία παιγνίων έχει εφαρμοστεί συχνά σε προβλήματα επιλογής δικτύου ή κυψέλης, αφού αποτελεί ένα στιβαρό πλαίσιο λήψης αποφάσεων. Λειτουργώντας ως λογικοί παίκτες, οι χρήστες προσπαθούν στην περίπτωση αυτή να μεγιστοποιήσουν το όφελός τους επιλέγοντας την πιο κατάλληλη τεχνολογία πρόσβασης ή κυψέλη. Στην αναφορά [20] προτείνεται ένα παίγνιο ελέγχου αποδοχής κλήσεων, το οποίο βασίζεται στην ιδέα ότι δυσαρεστημένοι πελάτες μπορούν να αλλάξουν πάροχο. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, σχηματίζονται παίγνια δύο παικτών μεταξύ πελάτη και παρόχου. Επιλέγεται ο πάροχος που προσφέρει την υψηλότερη απόδοση.

Επιπλέον, ο στόχος των διαδικασιών επιλογής κυψέλης είναι να καθορίσουν ποιος σταθμός βάσης είναι η βέλτιστη επιλογή. Στην αναφορά [21] το πρόβλημα επιλογής κυψέλης παρουσιάζεται ως παίγνιο δύο επιπέδων. Στο πρώτο επίπεδο, δηλαδή το διακυψελικό παίγνιο, οι σταθμοί βάσης επιλέγουν την κυψέλη ανάλογα με τη στρατηγική που προκύπτει από την αναμενόμενη απόδοση. Στο δεύτερο επίπεδο, δηλαδή το ενδοκυψελικό παίγνιο, οι σταθμοί βάσης επιλέγουν τον κατάλληλο πόρο χρόνου και συχνότητας στην επιλεγμένη κυψέλη ώστε να μεγιστοποιηθεί η απόδοσή τους. Παρόμοια, ο ανταγωνισμός μεταξύ ομάδων χρηστών σε

διαφορετικές περιοχές εξυπηρέτησης για να μοιραστούν το περιορισμένο ποσό εύρους ζώνης στα διαθέσιμα ασύρματα δίκτυα μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί ως ένα δυναμικό εξελικτικό παίγνιο [22]. Η κατηγορία αυτή παιγνίων αναπτύχθηκε κυρίως για να μελετηθεί η συμπεριφορά βιολογικών πρακτόρων, αλλά τα εξελικτικά παίγνια μπορούν να χρησιμοποιηθούν επίσης για να αναλυθεί ο ανταγωνισμός μεταξύ λογικών παικτών.

Όπως ήδη εξηγήθηκε, η κατάταξη μπορεί να επιτευχθεί επίσης με τη χρήση συστημάτων ασαφούς λογικής. Με τη χρήση των FIS, η κατάταξη πραγματοποιείται αφού υπολογιστεί η απόδοση κάθε δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.5. Με τον όρο απόδοση εννοούμε τον καθαρό αριθμό που παράγεται από τον αποασαφοποιητή του FIS, ως αποτέλεσμα της υπέρθεσης όλων των κανόνων. Ο αριθμός αυτός βρίσκεται στο διάστημα [0,1] και όπως και προηγουμένως, το δίκτυο με τη μεγαλύτερη τιμή είναι το βέλτιστο. Παρόμοια, αφού η λειτουργικότητά τους είναι όμοια με τα FIS, τα ANFIS μπορούν να εφαρμοστούν για μη γραμμική πρόβλεψη του δείκτη κατάταξης ενός δικτύου με βάση καθορισμένες από το χρήστη προτεραιότητες [17]. Η κατάταξη πραγματοποιείται αυτόματα αφού το ANFIS παράγει μόνο του τους απαιτούμενους κανόνες και κλίμακες μετατροπής.

Επιπλέον, αρκετοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει στο πλαίσιο του προβλήματος επιλογής δικτύου πολυκριτηριακές μεθόδους αποφάσεων (Multi-attribute Decision Making – MADM) προκειμένου να κατατάξουν τα υποψήφια δίκτυα σε μια σειρά προτίμησης [12][15][16][23][24]. Πολλοί τύποι αλγορίθμων MADM μπορεί να είναι κατάλληλοι για την επίλυση ενός προβλήματος απόφασης, οπότε ο σχεδιαστής μπορεί να αντιμετωπίσει το καθήκον να επιλέξει ανάμεσα σε ένα σύνολο μεθόδων την πιο κατάλληλη. Οι μέθοδοι MADM όπως οι SAW (Simple Additive Weighting), ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité), GRA (Grey Relational Analysis) και TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [12][15][16][23][24] βασίζονται σε συγκεκριμένους δείκτες για να εκτιμήσουν την απόδοση των εναλλακτικών και τελικά να τις κατατάξουν. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών απαιτεί όλες οι τιμές των κριτηρίων να μετρώνται σε κοινή κλίμακα, συνεπώς προτού χρησιμοποιηθούν πρέπει να κατασκευαστεί ένας κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης [16].

Τέλος, η κατάταξη μπορεί να επιτευχθεί μέσω της Μπαεσιανής μάθησης, η οποία είναι μια βασική στατιστική προσέγγιση σε πολλά δύσκολα προβλήματα μοντελοποίησης δεδομένων, παρέχοντας ένα διαισθητικό τρόπο για λήψη αποφάσεων παρουσία αβεβαιοτήτων. Οι Μπαεσιανοί αλγόριθμοι κατηγοριοποίησης αποτελούν στατιστικούς αλγόριθμους μάθησης που βασίζονται στο θεώρημα του Bayes. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι εκτιμήσεις κατά Bayes σε όρους ποιότητας δικτύου, πρέπει να υπολογιστεί η πιθανότητα οι εκτιμώμενες μέσες τιμές να είναι μικρότερες ή ίσες από τα αντίστοιχα κατώφλια. Στη συνέχεια επιλέγεται το δίκτυο με τη μεγαλύτερη πιθανότητα [13].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.2: ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

1.2.1 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων

Την αρχή της ανάπτυξης της επιστήμης λήψεως αποφάσεων σηματοδότησε η συνειδητοποίηση ότι με κάποιο τρόπο θα πρέπει να ερμηνευτούν ο τρόπος με τον οποίο σκέφτονται οι άνθρωποι ώστε να λάβουν κάποια απόφαση. Επίσης, πολύ σημαντικός παράγοντας εξέλιξης της επιστήμης των αποφάσεων είναι η ανάγκη να δοθούν επαρκείς εξηγήσεις για την αποδοχή των συνεπειών μιας απόφασης. Οι επιστήμες της φιλοσοφίας και των μαθηματικών για αιώνες εντάσσουν τη λήψη απόφασης στο αντικείμενό τους και προσπαθούν να εμβαθύνουν στον τρόπο εκδήλωσης και οργάνωσης της ανθρώπινης σκέψης για τη λήψη απόφασης.

Ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα συνίσταται στην αποδοχή της ύπαρξης ενός συνόλου ανταγωνιστικών εναλλακτικών επιλογών ή δραστηριοτήτων και της ύπαρξης ενός συνόλου κριτηρίων τα οποία είναι αντικρουόμενα. Αντικρουόμενα είναι τα κριτήρια που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν συγχρόνως στον επιθυμητό βαθμό αλλά η αύξηση του βαθμού ικανοποίησης του ενός συνεπάγεται μείωση του βαθμού ικανοποίησης του αλλού. Στη βάση των αντικρουόμενων αυτών κριτηρίων θα αξιολογηθούν οι εναλλακτικές επιλογές ή δραστηριότητες.

Η φύση των πολυκριτηριακών προβλημάτων έγκειται στο ότι το κάθε τέτοιο πρόβλημα εμπεριέχει πολύπλοκη και αντικρουόμενη πληροφορία., η οποία συχνά αντικατοπτρίζει διαφορετικές απόψεις των αποφασιζόντων για το πρόβλημα αυτό καθαυτό ή/και την επίλυσή του. Η πολυκριτηριακή ανάλυση (Multi Attribute Decision Making – MADM) χρησιμεύει στη δόμηση και οργάνωση της πολύπλοκης πληροφορίας του προβλήματος ώστε να βοηθήσει τον αποφασίζοντα ή τους αποφασίζοντες να αισθανθούν πεπεισμένοι ότι έχουν λάβει υπόψη τους κάθε λεπτομέρεια του προβλήματος ώστε να πάρουν μια απόφαση και να ελαχιστοποιήσουν ή να εκμηδενίσουν τις ενστάσεις μετά τη λήψη της απόφασης.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση δημιουργεί σχέσεις προτίμησης μεταξύ των επιλογών μέσω αναφοράς σε ένα εκτεταμένο σύνολο στόχων τους οποίους έχει εντοπίσει ο λήπτης αποφάσεων και για τους οποίους έχει ορίσει μετρήσιμα κριτήρια για να αξιολογήσει το βαθμό στον οποίο οι στόχοι αυτοί έχουν επιτευχθεί. Σε απλές συνθήκες, η διαδικασία εντοπισμού των στόχων και των κριτηρίων μπορεί να παρέχει από μόνη της αρκετές πληροφορίες για τους λήπτες αποφάσεων. Ωστόσο, όταν απαιτείται ένα επίπεδο λεπτομέρειας αρκετά συναφές με την ανάλυση κόστους - κέρδους (CBA), η πολυκριτηριακή ανάλυση

προσφέρει μία πληθώρα τρόπων συγκέντρωσης των στοιχείων για κάθε κριτήριο ξεχωριστά ώστε να παρέχει δείκτες για τη συνολική απόδοση των επιλογών.

Ένα κύριο χαρακτηριστικό της πολυκριτηριακής ανάλυσης είναι η έμφαση που δίνεται στην κρίση της ομάδας των ληπτών απόφασης για τον καθορισμό των στόχων και των κριτηρίων, εκτιμώντας παράλληλα και τη σχετική σημαντικότητα των βαρών καθώς και για την κριτική της συνεισφοράς κάθε επιλογής σε κάθε κριτήριο απόδοσης. Η υποκειμενικότητα που χαρακτηρίζει τη διαδικασία αυτή μπορεί να προκαλέσει κάποια ανησυχία. Η βάση της κατά κύριο λόγο αποτελείται από τις προσωπικές επιλογές στόχων, κριτηρίων, βαρών και αξιολογήσεων εκπλήρωσης των στόχων των ληπτών αποφάσεων, παρόλο που «αντικειμενικά» στοιχεία, όπως οι τιμές που έχουν παρατηρηθεί, μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν. Η πολυκριτηριακή ανάλυση, ωστόσο, προσφέρει ένα βαθμό δομής, ανάλυσης και ανοίγματος σε κατηγορίες αποφάσεων οι οποίες εμπίπτουν πέραν της πρακτικής εφαρμογής της.

Η πολυκριτηριακή ανάλυση έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με την ανεπίσημη κρίση, η οποία δε στηρίζεται από κάποια ανάλυση:

- Είναι ανοιχτή και εκτεταμένη.
- Η επιλογή των στόχων και των κριτηρίων που μπορεί να πάρει η οποιαδήποτε ομάδα ληπτών αποφάσεων είναι ανοιχτή στην ανάλυση και την αλλαγή εάν κριθούν ακατάλληλα.
- Τα σκορ και τα βάρη, όταν χρησιμοποιούνται, είναι επίσης αναλυτικά και διαμορφώνονται με βάση καθορισμένες τεχνικές. Μπορούν επίσης να διασταυρωθούν με άλλες πηγές πληροφορίας για τις σχετικές τιμές και να αλλαχθούν εάν κριθεί απαραίτητο.
- Η μέτρηση της αποδοτικότητας μπορεί να γίνει και από ειδικούς ώστε να μην αφήνεται απαραίτητα στους λήπτες αποφάσεων.
- Μπορεί να παρέχει ένα σημαντικό μέσο επικοινωνίας μεταξύ των ληπτών αποφάσεων και ορισμένες φορές μεταξύ των ληπτών και της κοινότητας.

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές από τις βασικότερες μεθόδους πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων. Στα επόμενα κεφάλαια του πρώτου μέρους της διδακτορικής διατριβής θα επεξηγηθεί το πώς αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο της επιλογής δικτύου.

1.2.2 Η Μέθοδος SAW (Simple Additive Weighting)

Η μέθοδος SAW [10][23] είναι μία από τις πιο απλές αλλά ωστόσο καλή μέθοδος λήψης αποφάσεων, καθώς τα αποτελέσματά της πλησιάζουν τα αποτελέσματα πιο αναλυτικών

μεθόδων. Η μέθοδος αυτή αποτελείται από τρία βασικά στάδια: α) Δημιουργία κλίμακας για τα σκορ, ώστε να είναι συγκρίσιμα, β) εφαρμογή βαρών και γ) πρόσθεση των τιμών τους για κάθε πηγή κριτηρίων.

Εφόσον επιτρέπονται μηδενικές τιμές για τα σκορ εφαρμόζονται οι ακόλουθοι παράγοντες κλίμακας, όπου *d* είναι οι αποφάσεις:

$$v_{ij} = \frac{d_{ij} - d_j^{min}}{d_j^{max} - d_j^{min}}, \text{ για ποιοτικά κριτήρια} \quad (1.1)$$

$$v_{ij} = \frac{d_j^{max} - d_{ij}}{d_j^{max} - d_j^{min}}, \text{ για κριτήρια κόστους} \quad (1.2)$$

Με βάση αυτή την κλίμακα, όλα τα σκορ βρίσκονται στο διάστημα [0,1], ενώ το καλύτερο σκορ παίρνει την τιμή 1 και το χειρότερο σκορ παίρνει την τιμή 0. Αυτή η ιδιότητα βεβαιώνει τη συγκρισιμότητα των σκορ. Το τελικό προτιμητέο σκορ για κάθε πηγή δίνεται από τη σχέση

$$S_i = \sum_j w_j v_{ij} \quad (1.3)$$

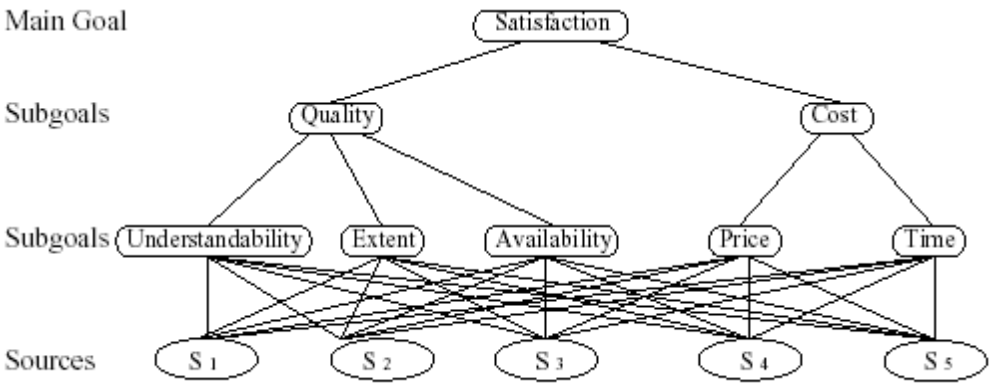
όπου w_j είναι το βάρος του κριτηρίου *j*.

1.2.3 Η Μέθοδος AHP (Analytic Hierarchy Process)

Η μέθοδος AHP αναπτύχθηκε από τον Thomas Saaty (1980) ως απάντηση στην έλλειψη κοινών και εύκολα κατανοητών καθώς και εφαρμόσιμων μεθόδων στη διαδικασία λήψης σύνθετων αποφάσεων. Από τότε, η μέθοδος αυτή έχει βρει εφαρμογή σε πολλούς τομείς ανά τον κόσμο, όπως στις επιχειρήσεις, την κυβέρνηση, τις κοινωνικές μελέτες, την έρευνα και ανάπτυξη, την άμυνα και άλλους τομείς όπου απαιτείται η λήψη αποφάσεων, στις οποίες βασικό ρόλο παίζει η επιλογή, η προτεραιότητα και η πρόβλεψη. Η μέθοδος αυτή προτιμάται λόγω της απλότητας και ευκολίας στη χρήση της. Συμβάλλει στην οργάνωση του προβλήματος και στη δόμηση της πολυπλοκότητας, μέτρησης και σύνθεσης των κατατάξεων, γεγονός που την κάνει κατάλληλη για μια πληθώρα εφαρμογών.

Η μέθοδος της ιεραρχικής ανάλυσης αποφάσεων (Analytic Hierarchy Process - AHP) αναλύεται σε τέσσερα στάδια [25]:

1. την ιεραρχική ανάλυση του προβλήματος απόφασης σε στοιχεία απόφασης (decision elements)
2. τη συλλογή προτιμήσεων από τον αποφασίζοντα σχετικά με τα στοιχεία απόφασης
3. τον υπολογισμό επιμέρους προτεραιοτήτων (βαρών) για τα στοιχεία απόφασης
4. τη σύνθεση των επιμέρους προτεραιοτήτων σε γενικές προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων.



Εικόνα 1.7. Παράδειγμα ιεραρχικής δομής της AHP

Τα δύο πρώτα στάδια πραγματοποιούνται με τη συμμετοχή του αποφασίζοντα (στάδια απόφασης), ενώ τα δύο τελευταία είναι καθαρά υπολογιστικά. Στο πρώτο στάδιο της μεθόδου AHP ο απώτερος και γενικότερος στόχος του υπό μελέτη προβλήματος απόφασης αναλύεται (εξειδικεύεται) σε έναν αριθμό πιο συγκεκριμένων υπο-στόχων (στοιχείων απόφασης), οι οποίοι στη συνέχεια αναλύονται όλο και περισσότερο στα πλαίσια μιας ιεραρχικής δομής κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η ικανοποίηση των επιμέρους στόχων να επιφέρει τελικά και την εξυπηρέτηση του γενικότερου στόχου. Το πρόβλημα απόφασης αποκτά έτσι μια δενδρική δομή (Εικόνα 1.7), στην οποία η κορυφή είναι ο απώτερος στόχος, τα ανώτερα επίπεδα αντιστοιχούν σε γενικούς στόχους-κριτήρια και όσο προχωρούμε προς τα κάτω τα κριτήρια εξειδικεύονται όλο και περισσότερο, μέχρι του σημείου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη σύγκριση των εναλλακτικών λύσεων του προβλήματος, οι οποίες και βρίσκονται στο κατώτερο επίπεδο της ιεραρχίας ως φύλλα του δένδρου.

Τα στοιχεία κάθε επιπέδου της ιεραρχικής δομής συγκρίνονται ανά δύο ως προς το βαθμό προτίμησης του ενός έναντι του άλλου με βάση το κριτήριο του αμέσως ανώτερου επιπέδου (γονικό στοιχείο απόφασης). Η σύγκριση αυτή γίνεται μέσω πινάκων (ίσων στον αριθμό με το πλήθος των κόμβων, εξαιρουμένων των φύλλων), στους οποίους ο αποφασίζων δηλώνει τις προτιμήσεις του για κάθε συγκρινόμενο ζεύγος στοιχείων απόφασης *X* και *Y*, συμπληρώνοντας με τιμές από το σύνολο αριθμητικών διαβαθμίσεων κατά Saaty: P={1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9}. Εναλλακτικά, η μέθοδος Direct Weighting επιτρέπει τη συμπλήρωση των πινάκων χωρίς τη χρήση κάποιας κλίμακας, δηλαδή με όποιες τιμές επιθυμεί ο αποφασίζων.

Απώτερος Στόχος	**Σ.Α. 1**	**Σ.Α. 2**	**Σ.Α. 3**	**Βάρη**
Σ.Α. 1	α_{11}	α_{12}	α_{13}	w_1
Σ.Α. 2	α_{21}	α_{22}	α_{23}	w_2
Σ.Α. 3	α_{31}	α_{32}	α_{33}	w_3

Πίνακας 1.5. Πίνακας AHP

Πρακτικά κάθε μία από τις τιμές του πίνακα εκφράζει πόσες φορές είναι πιο σημαντικό ένα στοιχείο από ένα άλλο. Αναλυτικότερα για τις τιμές α_{ij} ισχύει:

- α_{ij}=1, αφού αναφέρονται σε συγκρίσεις στοιχείων με τον εαυτό τους
- α_{ij}>1 όταν το στοιχείο *i* προτιμάται έναντι του *j*
- α_{ij}<1 όταν το στοιχείο *j* προτιμάται έναντι του *i*
- α_{ij}=1/ α_{ji} για κάθε *i,j*

Στο επόμενο στάδιο υπολογίζονται τα σχετικά βάρη με τα οποία τα στοιχεία απόφασης (Σ.Α.) συμμετέχουν στη διαμόρφωση του απώτερου στόχου. Αν τα βάρη ήταν γνωστά, κάθε πίνακας *A* θα ήταν συνεπής, δηλαδή τα στοιχεία του θα ικανοποιούσαν τη σχέση $a_{ik} = a_{ij} \times a_{jk} \forall i, j, k$. Επιπλέον θα ίσχυε $Aw = nw$, όπου w το διάνυσμα των πραγματικών βαρών και n το πλήθος των συγκρινόμενων στοιχείων. Ωστόσο, ο πίνακας *A* δεν είναι συνεπής και δεν μπορεί να γίνει παρά εκτίμηση των βαρών από τη σχέση $\hat{A}\hat{w} = \lambda_{max}\hat{w}$, όπου Â ο πίνακας των κατά ζεύγη συγκρίσεων, λ_{max} η μέγιστη ιδιοτιμή αυτού ($\lambda_{max} \geq n$) και $\hat{w}$, το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα.

Το ιδιοδιάνυσμα $\hat{w}$, που αποτελεί και τη ζητούμενη προσέγγιση του διανύσματος των πραγματικών σχετικών βαρών, υπολογίζεται με την ακόλουθη επαναληπτική διαδικασία:

1. Αθροίζονται τα στοιχεία του πίνακα (αρχικά του πίνακα *A*) κατά γραμμή: $s_i = \sum_j a_{ij}$ για κάθε *i*.
2. Για κάθε γραμμή του πίνακα γίνεται προσέγγιση του βάρους του αντίστοιχου στοιχείου με το πηλίκο του s_i δια του αθροίσματος των στοιχείων όλου του πίνακα $w_i = s_i / \sum_i \sum_j a_{ij}$. Λαμβάνεται έτσι το $\hat{w}$, του οποίου οι συνιστώσες είναι κανονικοποιημένες, δηλαδή έχουν άθροισμα τη μονάδα.
3. Ο πίνακας υψώνεται στο τετράγωνο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα 1, έως ότου δύο διαδοχικές προσεγγίσεις του δεν διαφέρουν σημαντικά στα πλαίσια μιας επιθυμητής ακρίβειας.

Η σύνθεση των βαρών των στοιχείων, όπως αυτά προκύπτουν από τους επιμέρους πίνακες συγκρίσεων κάθε επιπέδου, πραγματοποιείται με πράξεις πολλαπλασιασμού μεταξύ πινάκων βαρών από κάτω προς τα πάνω, δηλαδή από το κατώτερο προς το ανώτερο ιεραρχικό επίπεδο.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε ένας από τους πίνακες του κατώτερου επιπέδου που περιλαμβάνει τα σχετικά βάρη των εναλλακτικών λύσεων ως προς τα στοιχεία απόφασης του ίδιου επιπέδου πολλαπλασιάζεται με τον πίνακα του προηγούμενου επιπέδου που περιλαμβάνει τα σχετικά βάρη των κριτηρίων του νέου αυτού επιπέδου ως προς τα στοιχεία

απόφασης του αμέσως επόμενου επιπέδου. Ο προκύπτων πίνακας περιέχει πλέον τα βάρη των εναλλακτικών λύσεων ως προς τα στοιχεία απόφασης του ανώτερου μέχρι τώρα υπό εξέταση επιπέδου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται, έως ότου προκύψει ο πίνακας $\widehat{w}$, ο οποίος θα περιέχει τα βάρη των εναλλακτικών λύσεων ως προς το ανώτερο ιεραρχικό επίπεδο, δηλαδή, έως ότου εκφράσουμε τις γενικές προτεραιότητες των εναλλακτικών λύσεων ως προς τον απώτερο στόχο.

1.2.4 Η Μέθοδος GRA (Grey Relational Analysis)

Η μέθοδος GRA χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σχέσεων και την πραγματοποίηση συγκρίσεων μεταξύ των στοιχείων δύο σειρών μετρήσεων [15]. Από αυτές τις σειρές μετρήσεων η μία περιέχει τις ευνοϊκότερες οντότητες, ενώ κάθε άλλη σειρά συγκρίνεται με την πρώτη και τελικά από ένα σύνολο μετρήσεων επιλέγεται η σειρά εκείνη που διαφέρει λιγότερο από την ευνοϊκή. Η σύγκριση αυτή επιτυγχάνεται μέσω του δείκτη GRC (Grey Relational Coefficient). Η μέθοδος GRA συνίσταται στα ακόλουθα έξι βήματα:

1. κατηγοριοποίηση των στοιχείων κάθε σειράς, ανάλογα με το αν είναι επιθυμητό να πλησιάζουν τη μέση (nominal-the-best), ελάχιστη (smaller-the-best) ή μέγιστη τιμή (larger-the-best)
2. καθορισμό της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης τιμής
3. κανονικοποίηση των οντοτήτων
4. προσδιορισμό της ιδανικής σειράς
5. υπολογισμό των συντελεστών GRC
6. επιλογή της λύσης που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή GRC

Υποθέτουμε ότι έχουμε να συγκρίνουμε n σειρές ($S_1,S_2,...,S_n$), κάθε μία εκ των οποίων έχει k στοιχεία και συμβολίζουμε με m_j τη μέση, με $u_j=max\{s_1(j), s_2(j),\dots , s_n(j)\}$ τη μέγιστη και με $l_j = max\{s_1(j), s_2(j),\dots , s_n(j)\}$ την ελάχιστη τιμή. Πριν από τον υπολογισμό των συντελεστών GRC, οι σειρές πρέπει να κανονικοποιηθούν. Η κανονικοποίηση γίνεται ανάλογα με την περίπτωση ως εξής:

- Normal-the-best: $s^*_0(j) = 1 - \dfrac{|s_i(j) - m_j|}{\max\{u_j - m_j, m_j - l_j\}}$
- Larger-the-better: $s^*_0(j) = 1 - \dfrac{|s_i(j) - u_j|}{u_j - l_j}$
- Smaller-the-better: $s^*_0(j) = 1 - \dfrac{|s_i(j) - l_j|}{u_j - l_j}$

Τέλος ο συντελεστής GRC υπολογίζεται από τη σχέση

$$\Gamma(s_0, s_i) = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{\Delta_{\min} + \Delta_{\max}}{\Delta_i + \Delta_{\max}} \tag{1.4}$$

όπου $\Delta_i = \left|s^*_o(j) - s_i(j)\right|$, $\Delta_{\max} = \max_{(i,j)}(\Delta_i)$ και $\Delta_{\min} = \min_{(i,j)}(\Delta_i)$. Επιλέγεται η σειρά με τη μεγαλύτερη τιμή GRC.

1.2.5 Η Μέθοδος TOPSIS

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) [10][23][25] αναπτύχθηκε ως μία εναλλακτική των μεθόδων ELECTRE. Όπως στη μέθοδο SAW, ο πίνακας των αποφάσεων είναι κλιμακωτός και σταθμισμένος. Για τη συνάρτηση κλίμακας, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$\mathrm{r_{ij}} = \frac{\mathrm{v_{ij}}}{\sqrt{\sum_{\mathrm{i=1}} \mathrm{v_{ij}}^2}} \tag{1.5}$$

ώστε κάθε συντελεστής κριτηρίου να είναι κανονικοποιημένος. Αντίθετα με τη μέθοδο SAW, οι συγγραφείς δεν αθροίζουν στο σημείο αυτό τις τιμές, αλλά υπολογίζουν τη σχετική Ευκλείδεια απόσταση των λύσεων από μία φανταστική ιδανική λύση. Η λύση που πλησιάζει περισσότερο την ιδανική λύση και απομακρύνεται περισσότερο από την αρνητική-ιδανική λύση, επιλέγεται ως η βέλτιστη. Συμβολίζοντας τις σταθμισμένες τιμές με *rw*, οι ιδανικές και οι αρνητικά-ιδανικές λύσεις είναι:

$$\mathrm{A^+ = \max_j \left\lfloor rw_{ij} \right\rfloor = \left\lfloor rw_1^+, rw_2^+, ..., rw_m^+ \right\rfloor}$$

$$\mathrm{A^- = \min_j \left\lfloor rw_{ij} \right\rfloor = \left\lfloor rw_1^-, rw_2^-, ..., rw_m^- \right\rfloor}$$

Η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ κάθε λύσης και της ιδανικής και αρνητικά-ιδανικής λύσης ορίζεται αντίστοιχα ως:

$$\mathrm{S_i^+} = \sqrt{\sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{m}} (\mathrm{rw_{ij} - rw_i^+})^2} \tag{1.6}$$

$$\mathrm{S_i^-} = \sqrt{\sum_{\mathrm{j=1}}^{\mathrm{m}} (\mathrm{rw_{ij} - rw_i^-})^2} \tag{1.7}$$

και το μέγεθος που δείχνει πόσο πλησιάζει η λύση την ιδανική λύση δίνεται από τη σχέση:

$$\mathrm{C_i} = \frac{\mathrm{S_i^-}}{\mathrm{S_i^- + S_i^+}} \tag{1.8}$$

1.2.6 Η Μέθοδος ELECTRE

Μία βασική μέθοδος στο χώρο των σχέσεων υπεροχής είναι η ELECTRE (σε όλες τις μορφές της), η οποία αναπτύχθηκε από τον Bernard Roy ως απάντηση στις ελλείψεις των μεθόδων

λήψης αποφάσεων που υπήρχαν ως τότε. Η ιδέα της υπεροχής σχηματίστηκε από τον Roy (1968) [26]. Η μεθοδολογία του, ELECTRE, της οποίας το ακρωνύμιο είναι ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELimination and Choice Expressing REality), εφαρμόστηκε ευρέως σε διάφορα προβλήματα και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν ένας μεγάλος αριθμός εναλλακτικών πρέπει να περιοριστεί ώστε να διευκολυνθεί η περαιτέρω λεπτομερής θεώρησή τους. Υπάρχουν τέσσερις βασικές μορφές της ELECTRE- I, II, III και IV- η καθεμία λίγο διαφορετική από την άλλη σε όρους απαιτούμενων στοιχείων και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Το 1968 αναπτύχθηκε η ELECTRE III από τον Roy για να την ακολουθήσουν αργότερα, το 1991 και 1996, μία σειρά παραλλαγών (II, III, IV, TRI, IS-Roy). Όλες οι μέθοδοι βασίζονται στις ίδιες βασικές ιδέες αλλά διαφέρουν στη λειτουργία και ανάλογα με τον τύπο του προβλήματος.

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η μέθοδος ELECTRE III, η οποία πραγματοποιεί συγκρίσεις ζευγαριών ανάμεσα στις εναλλακτικές προκειμένου να διατυπώσει σχέσεις μεταξύ τους. Ας θεωρήσουμε τις εναλλακτικές X και Y, για τις οποίες οι τιμές όλων των μετρικών περιέχονται κανονικοποιημένες στον πίνακα *NW*. Το κύριο μέρος της ELECTRE έγκειται στην κατασκευή των πινάκων συμφωνίας και ασυμφωνίας, οι οποίοι παρέχουν μέτρο ικανοποίησης και δυσαρέσκειας του σχεδιαστή όταν μια εναλλακτική συγκρίνεται με κάποια άλλη. Οι τιμές των προαναφερθέντων πινάκων υπολογίζονται με σύνολα συμφωνίας και ασυμφωνίας. Ένα σύνολο συμφωνίας αποτελεί ένα σύνολο μετρικών για τις οποίες η εναλλακτική *X* είναι ανώτερη από την εναλλακτική *Y*, ενώ ένα σύνολο ασυμφωνίας είναι το συμπληρωματικό του σύνολο, δηλαδή το σύνολο των μετρικών για τις οποίες η εναλλακτική *Y* είναι χειρότερη από την εναλλακτική *Y*. Πιο συγκεκριμένα, τα στοιχεία των πινάκων συμφωνίας και ασυμφωνίας υπολογίζονται από τις εξισώσεις (1.9) και (1.10) αντίστοιχα.

$$c_{XY} = \sum_{j \in CS_{XY}} W_j,\ Concordance\,Set = \{ j : NW_{w_{X,j}} \geq NW_{w_{Y,j}} \} \tag{1.9}$$

$$d_{XY} = \frac{\sum_{j \in DS_{XY}} |(NW_{w_{X,j}}) - (NW_{w_{Y,j}})|}{\sum_{j} |(NW_{w_{X,j}}) - (NW_{w_{Y,j}})|},\ Discordance\,Set = \{ j : NW_{w_{X,j}} < NW_{w_{Y,j}} \} \tag{1.10}$$

Οι πίνακες συμφωνίας και ασυμφωνίας σχηματίζονται ως

$$C = \begin{bmatrix} - & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & - & \cdots & c_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & - \end{bmatrix},\quad D = \begin{bmatrix} - & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & - & \cdots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & - \end{bmatrix}$$

Τα στοιχεία των διαγωνίων και στους δύο πίνακες δεν ορίζονται. Επόμενο βήμα της μεθόδου αποτελεί ο υπολογισμός των δεικτών συμφωνίας και ασυμφωνίας, όπου ο πρώτος συνιστά ένα μέτρο της σχετικής υπεροχής μιας εναλλακτικής *i* έναντι των υπολοίπων όταν συγκρίνεται αντίστοιχα με ένα δείκτη υπεροχής των υπολοίπων εναλλακτικών έναντι της

εναλλακτικής *i* και ο δεύτερος, δηλαδή ο δείκτης ασυμφωνίας, παρέχει ένα μέτρο της σχετικής μειονεξίας της εναλλακτικής *i* έναντι των υπολοίπων ομοίως όταν συγκρίνεται με τον αντίστοιχο δείκτη μειονεξίας των υπολοίπων εναλλακτικών έναντι της εναλλακτικής *i*. Οι δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας υπολογίζονται τελικά από τις εξισώσεις (1.11) και (1.12). Οι δε εναλλακτικές ιεραρχούνται με βάση τις τιμές των παραπάνω δεικτών αλλά και λαμβάνοντας το μέσο όρο των δύο αυτών κατατάξεων. Το δίκτυο με την υψηλότερη μέση κατάταξη αποτελεί τελικά και την καλύτερη εναλλακτική επιλογή.

$$C_i = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} c_{ij} - \sum_{j=1, j\neq i}^{N} c_{ji} \tag{1.11}$$

$$D_i = \sum_{j=1, j\neq i}^{N} d_{ij} - \sum_{j=1, j\neq i}^{N} d_{ji} \tag{1.12}$$

1.2.7 Η Μέθοδος FAHP (Fuzzy AHP)

Παρά το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα δημοφιλής, η συμβατική μέθοδος AHP δέχεται συχνά κριτική εξαιτίας της ανικανότητάς της να χειριστεί την έμφυτη αβεβαιότητα και ανακρίβεια που εμφανίζεται κατά την αντιστοίχιση των κρίσεων, προτιμήσεων και εκτιμήσεων του αποφασίζοντα σε ακριβείς αριθμούς, καθώς η εν λόγω διαδικασία δεν είναι συμβατή με τον τρόπο σκέψης των ανθρώπων. Ένας φυσικός τρόπος για την αντιμετώπιση αυτής της αβεβαιότητας που ενυπάρχει σε υποκειμενικές κρίσεις είναι να εκφραστούν οι λόγοι που προκύπτουν από τις συγκρίσεις ως ασαφή σύνολα ή ασαφείς αριθμοί, που σε αντίθεση με τους πραγματικούς αριθμούς ανταποκρίνονται περισσότερο στον ασαφή τρόπο σκέψης του εκάστοτε αποφασίζοντα. Υπό αυτές τις συνθήκες μια ασαφής αξιολογική κρίση προερχόμενη από τη σύγκριση δύο οποιωνδήποτε στοιχείων στο ίδιο επίπεδο της ιεραρχίας του προβλήματος μπορεί να αναπαρασταθεί ως ασαφής αριθμός. Ως εκ τούτου, έχει επινοηθεί η μέθοδος Fuzzy AHP (FAHP), η οποία αποτελεί μια επέκταση της κλασικής AHP μεθόδου, και είναι ικανή να υποστηρίξει τη χρήση ασαφών αριθμών. Στη μέθοδο Fuzzy AHP οι συγκρίσεις ανά ζεύγη στον πίνακα απόφασης αντιστοιχούν σε ασαφείς αριθμούς, που μεταβάλλονται ανάλογα με τα σημεία στα οποία επιθυμεί να εστιάσει ο αποφασίζων.

Η αρχική εκτίμηση για τα βάρη των κριτηρίων δίνεται με τη βοήθεια κατάλληλων ερωτηματολογίων υπό τη μορφή προτυποποιημένων απαντήσεων, εκφρασμένων σε γλωσσολογικούς όρους (linguistic variables), και οι αντίστοιχοι ασαφείς αριθμοί συγκεντρώνονται στον πίνακα απόφασης Ã, ο οποίος παίρνει τη μορφή

$$\widetilde{A} = \left(\widetilde{a_{ij}}\right)_{n\times n} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & (l_{12}, m_{12}, u_{12}) & \cdots & (l_{1n}, m_{1n}, u_{1n}) \\ (l_{21}, m_{21}, u_{21}) & (1,1,1) & \cdots & (l_{2n}, m_{2n}, u_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ (l_{n1}, m_{n1}, u_{n1}) & (l_{n2}, m_{n2}, u_{n2}) & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix}$$

όπου κάθε στοιχείο $\tilde{a}_{ij}$ απεικονίζει έναν τριγωνικό ασαφή αριθμό που με τη σειρά του αναπαριστά τη σχετική βαρύτητα δύο στοιχείων. Περισσότερες πληροφορίες για τους τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς μπορούν να βρεθούν στο τρίτο μέρος της παρούσης διδακτορικής διατριβής. Σημειώνεται επίσης ότι ο πίνακας απόφασης είναι συμμετρικός, γεγονός το οποίο μεταφράζεται παραστατικά ως εξής:

$$\tilde{a}_{ji} = \left[\tilde{a}_{ij}\right]^{-1} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})^{-1} = (\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}})$$

Για τον υπολογισμό των τελικών βαρών μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία. Μια από τις πιο δημοφιλείς είναι η μέθοδος Fuzzy Extent Analysis, που έχει προταθεί από τον Chang το 1996 [25]. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει καταρχάς τον υπολογισμό για κάθε κριτήριο απόφασης *i*, μέσω πράξεων ασαφούς λογικής της τιμής

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{n} \tilde{a}_{ij} \otimes \left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \tilde{a}_{kj}\right]^{-1} \tag{1.13}$$

που φέρει την ονομασία fuzzy synthetic extent. Η πρόσθεση εν λόγω τιμών για *n* κριτήρια καθώς και το ανάστροφο διάνυσμα δίνονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις (1.14) και (1.15).

$$\sum_{j=1}^{n} \tilde{a}_{ij} = (\sum_{j=1}^{n} l_{ij}, \sum_{j=1}^{n} m_{ij}, \sum_{j=1}^{n} u_{ij}) \tag{1.14}$$

$$\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \tilde{a}_{ij}\right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} u_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} m_{ij}}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} l_{ij}}\right) \tag{1.15}$$

Η πιθανότητα $\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2$ ορίζεται ως $V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = SUP_{x \geq y}[\min(\tilde{S}_1(x), \tilde{S}_2(y))]$, όπου *x* και *y* είναι οι τιμές των αξόνων της συνάρτησης $\mu_A(x)$ (membership function). Η έκφραση αυτή μπορεί να γραφεί ισοδύναμα ως εξής:

$$V(\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2) = \begin{cases} 1, & m_1 \geq m_2 \\ 0, & l_2 \geq u_1 \\ \dfrac{l_2 - u_1}{(m_1 - u_1) - (m_2 - l_2)}, & otherwise \end{cases} \tag{1.16}$$

Για τη σύγκριση των $\tilde{S}_1$ και $\tilde{S}_2$, απαιτούνται οι τιμές V ($\tilde{S}_1 \geq \tilde{S}_2$) και V ($\tilde{S}_2 \geq \tilde{S}_1$). Η πιθανότητα για έναν ασαφή αριθμό να είναι μεγαλύτερος από *k* άλλους $\tilde{S}_i$ (*i* = 1,2,...,*k*) ορίζεται ως εξής:

$$V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_1, \tilde{S}_2, ..., \tilde{S}_k) = V\left[(\tilde{S} \geq \tilde{S}_1) and (\tilde{S} \geq \tilde{S}_2) and ... and (\tilde{S} \geq \tilde{S}_k)\right] = \min V(\tilde{S} \geq \tilde{S}_i), i = 1,2,3,...,k \quad (1.17)$$

Υποθέτοντας ότι $d'_i = \min V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_k)$, τα τελικά βάρη δίνονται από το διάνυσμα $W' = \left(d_1', d_2', ..., d_n'\right)^T$. Τέλος, εφαρμόζοντας κανονικοποίηση, το διάνυσμα με τα πραγματικά πλέον βάρη είναι:

$$W = \left(d_1, d_2, ..., d_n\right)^T \quad (1.18)$$

1.2.8 Η Μέθοδος Fuzzy TOPSIS

Η μέθοδος Fuzzy TOPSIS προτάθηκε από τον Chen [26] σε μια προσπάθεια να συνυπολογιστεί η ασάφεια που επικρατεί σε ένα πραγματικό περιβάλλον απόφασης. Υποθέτοντας ότι υπάρχουν *m* εναλλακτικές και *n* κριτήρια απόφασης, ένα ασαφές πρόβλημα αποφάσεων μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή πίνακα ως

$$\tilde{D} = \left(\tilde{d}_{ij}\right)_{m \times n} = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11} & \tilde{d}_{12} & \cdots & \tilde{d}_{1n} \\ \tilde{d}_{21} & \tilde{d}_{22} & \cdots & \tilde{d}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{d}_{m1} & \tilde{d}_{m1} & \cdots & \tilde{d}_{mn} \end{bmatrix}, \tilde{d}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$$

$$\tilde{W} = \left(\tilde{w}_j\right)_{1 \times n}, \tilde{w}_j = (l_j, m_j, u_j)$$

όπου *i*=1,…,*n* and *j*=1,…,*m*. Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο κανονικοποιημένος ασαφής πίνακας απόφασης, όπου χρησιμοποιείται ο γραμμικός μετασχηματισμός προκειμένου να μετατραπούν τα διάφορα κριτήρια σε μια συγκρίσιμη κλίμακα. Κάθε στοιχείο του πίνακα $\tilde{D}$ κανονικοποιείται ως

$$\tilde{d}_{ij}^{\,n} = \begin{Bmatrix} (\frac{l_{ij}}{u_j^+}, \frac{m_{ij}}{u_j^+}, \frac{u_{ij}}{u_j^+}), \; for positive criteria \\ (\frac{l_j^-}{u_{ij}}, \frac{l_j^-}{m_{ij}}, \frac{l_j^-}{l_{ij}}), \; for negative criteria \end{Bmatrix}$$

όπου $u_j^+ = \max_i u_{ij}, l_j^- = \min_i l_{ij}$. Η μέθοδος αυτή για κανονικοποίηση εξυπηρετεί στο να εξασφαλιστεί ότι όλοι οι ασαφείς αριθμοί του πίνακα θα βρίσκονται στο διάστημα [0,1]. Λαμβάνοντας υπόψη τη σπουδαιότητα κάθε κριτηρίου μπορούμε στη συνέχεια να κατασκευάσουμε το σταθμισμένο κανονικοποιημένο ασαφή πίνακα απόφασης ως

$$\widetilde{DW} = \left(\widetilde{dw}_{ij}\right)_{m \times n} = \tilde{d}_{ij}^{\,n} \odot \tilde{w}_j \quad (1.19)$$

Εξαιτίας της κανονικοποίησης που πραγματοποιήθηκε τα στοιχεία $\widetilde{dw_{ij}}$ είναι θετικοί τριγωνικοί ασαφείς αριθμοί. Μπορούμε επομένως να ορίσουμε την ασαφή ιδανική λύση και την ασαφή αρνητικά-ιδανική λύση αντίστοιχα ως

$$A^{+} = (\widetilde{dw_j^{+}})_{1\times n}, \widetilde{dw_j^{+}} = (1,1,1)\forall j$$

$$A^{-} = (\widetilde{dw_j^{-}})_{1\times n}, \widetilde{dw_j^{-}} = (0,0,0)\forall j$$

Οι αποστάσεις μεταξύ κάθε εναλλακτικής και της ιδανικής/αρνητικά-ιδανικής λύσης δίνονται αντίστοιχα από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\mathrm{d}_{\mathrm{i}}^{+} = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{d}(\mathrm{dw}_{\mathrm{ij}}, \mathrm{v}_{\mathrm{j}}^{+}) \tag{1.20}$$

$$\mathrm{d}_{\mathrm{i}}^{-} = \sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{d}(\mathrm{dw}_{\mathrm{ij}}, \mathrm{v}_{\mathrm{j}}^{-}) \tag{1.21}$$

όπου *d(a,b)* είναι η απόσταση μεταξύ δύο ασαφών αριθμών, $\mathrm{v}_{\mathrm{j}}^{+} = (1,1,1)$ and $\mathrm{v}_{\mathrm{j}}^{-} = (0,0,0)$. Γενικά για δύο τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς $\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$, $\widetilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$ η απόσταση ορίζεται ως $d(\widetilde{A}, \widetilde{B}) = \sqrt{\frac{1}{3}[(a_1 - b_1)^2 + (a_2 - b_2)^2 + (a_3 - b_3)^2]}$.

Τελικά υπολογίζεται ο συντελεστής εγγύτητας στην ιδανική λύση από τη σχέση (1.22). Η τιμή του δείκτη αυτού βρίσκεται μεταξύ 0 και 1 και όσο μεγαλύτερη είναι τόσο καλύτερη είναι η εναλλακτική.

$$\mathrm{CC}_{\mathrm{i}} = \frac{\mathrm{d}_{\mathrm{i}}^{-}}{\mathrm{d}_{\mathrm{i}}^{+} + \mathrm{d}_{\mathrm{i}}^{-}} \tag{1.22}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.3: ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕΘΟΔΩΝ

1.3.1 Επιλογή Δικτύου με Συνδυασμό των Μεθόδων AHP και GRA

1.3.1.1 Περιγραφή Αλγορίθμου

Προκειμένου να επιλεγεί εκείνο το δίκτυο που προσφέρει την καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, αρχικά χρησιμοποιείται η μέθοδος AHP, για να υπολογιστεί το βάρος κάθε παραμέτρου. Στη συνέχεια, και αφού πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση των μετρήσεων, εφαρμόζεται η μέθοδος GRA. Η προσέγγιση αυτή περιγράφεται στις αναφορές [15] και [28]. Σημειώνεται ότι για μετρήσεις παραμέτρων όπως delay, jitter, packet loss, οι ευνοϊκότερες τιμές είναι οι μικρότερες δυνατές, με αποτέλεσμα να έχουμε κανονικοποίηση Smaller-the-better, ενώ για μετρήσεις παραμέτρων απόδοσης (π.χ. throughput) οι ευνοϊκότερες τιμές είναι οι μεγαλύτερες δυνατές, οπότε και έχουμε κανονικοποίηση Larger -the-better. Ο συντελεστής GRC υπολογίζεται από τη σχέση

$$\Gamma(s_0, s_i) = \frac{1}{\sum_{q=1}^{n} w_q \left| s^*{}_o(q) - s_o \right| + 1} \tag{1.23}$$

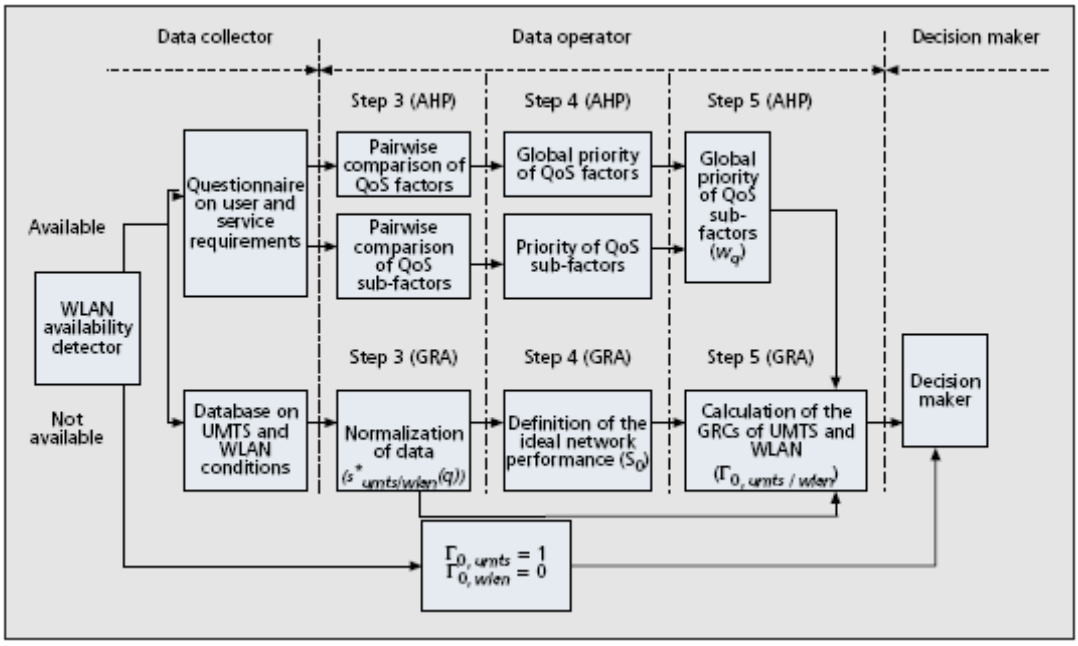
όπου w_q είναι το βάρος κάθε παραμέτρου.

1.3.1.2 Εύρεση Βαρών

Δεδομένης της ύπαρξης μετρήσεων για μια κυψέλη, αναζητείται μια ποιοτική σχέση μεταξύ των παραπάνω παραμέτρων. Η σχέση αυτή εκφράζει τις απαιτήσεις του χρήστη και είναι συνεπώς υποκειμενική. Σε αρκετές περιπτώσεις στη βιβλιογραφία οι ποιοτικές σχέσεις προκύπτουν από ερωτηματολόγια που συμπληρώνονται από τους χρήστες. Για τη μελέτη μας εμείς, ωστόσο, θα επιχειρήσουμε να προσδιορίσουμε τις σχέσεις αυτές βασιζόμενοι στην επιτυχία ή αποτυχία της κάθε παραμέτρου να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές.

Συγκεκριμένα, βρίσκουμε τις μέσες τιμές των παραμέτρων για το σύνολο των μετρήσεων και ακολούθως υπολογίζουμε το λόγο $\Delta x / x$ (όπου x μια ενδεικτική τιμή που θεωρείται ικανοποιητική με βάση τη βιβλιογραφία και τα χαρακτηριστικά του δικτύου), οπότε και έχουμε για κάθε παράμετρο μια εκτίμηση για το πόσο χειρότερη είναι η τιμή της σε σχέση με την αναμενόμενη τιμή x. Με τον τρόπο αυτό η βαρύτητα κάθε παραμέτρου είναι ανάλογη του βαθμού στον οποίο αποτυγχάνει να ικανοποιήσει τις προδιαγραφές. Έχοντας υπολογίσει τη

σχετική βαρύτητα των παραμέτρων, δηλαδή έχοντας πλέον μια ποιοτική σχέση μεταξύ αυτών, κατασκευάζουμε τον πίνακα AHP και εφαρμόζουμε την ομώνυμη μέθοδο.



Εικόνα 1.8. Επιλογή δικτύου με AHP και GRA

1.3.1.3 Αριθμητικό Παράδειγμα

Υποθέτουμε το ακόλουθο παράδειγμα: ένας χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία κατεβάσματος αρχείων μέσω HTTP. Το μέγεθος του αρχείου θεωρείται ίσο με 0.6 MB, ενώ υπάρχουν 2 διαθέσιμα δίκτυα, GPRS και WLAN. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη, καθώς και τα αντίστοιχα βάρη φαίνονται στους Πίνακες 1.6 και 1.7. Η εξαγωγή των βαρών πραγματοποιείται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην ενότητα 1.3.2.

Τελικά εφαρμόζεται η μέθοδος GRA και επιλέγεται το βέλτιστο δίκτυο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 1.8. Σημειώνεται ότι οι παράμετροι Delay, Jitter, Inf. Loss, Errors και Delivery Time κανονικοποιούνται ως Smaller-the-better, ενώ η παράμετρος Throughput ως Larger-the-better. Οι τιμές GRC που υπολογίζονται από την εξίσωση (1.23) είναι 0.773 για το GPRS και 0.564 για το WLAN, γεγονός που καθιστά το GPRS ως τη βέλτιστη επιλογή.

Parameter	Mean value	Satisfactory value	Δx / x	Weights
Delay	155.5 msec	100 msec	0.555	0.029
Jitter	4.036 msec	1 msec	3.036	0.158
Inf. Loss ($\cdot 10^{-5}$)	0.085	0.01	7.500	0.389
Errors ($\cdot 10^{-5}$)	0.715	0.1	6.15	0.319
Throughput	18.8 bps	2000 bps	0.991	0.103
Delivery Time	31.62	30	0.054	0.003

Πίνακας 1.6. Σχετικά βάρη για GPRS

Parameter	Mean value	Satisfactory value	Δx / x	Weights
Delay	151.9 msec	100 msec	0.519	0.028
Jitter	2.54 msec	1 msec	1.54	0.084
Inf. Loss ($\cdot 10^{-5}$)	0.09	0.01	8	0.436
Errors ($\cdot 10^{-5}$)	0.719	0.1	6.19	0.337
Throughput	21.5 bps	2000 bps	0.989	0.112
Delivery Time	31.67	30	0.056	0.003

Πίνακας 1.7. Σχετικά βάση για WLAN

	Delay	Jitter	Inf. Loss	Errors	Throughput	Delivery Time
GPRS	0	0	1	1	0	0
WLAN	1	1	0	0	1	1

Πίνακας 1.8. Κανονικοποιημένες τιμές της GRA

1.3.2 Επιλογή Δικτύου με Συνδυασμό των Μεθόδων FAHP και ELECTRE

1.3.2.1 Εισαγωγή

Η συγκεκριμένη ενότητα έχει ως αντικείμενο την εφαρμογή των μεθόδων Fuzzy AHP και ELECTRE που παρουσιάστηκαν προηγουμένως με σκοπό τη μοντελοποίηση του προβλήματος της επιλογής δικτύου. Η προσέγγιση αυτή προτείνεται στην αναφορά [16]. Πιο συγκεκριμένα για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιείται το ακόλουθο σενάριο: θεωρούμε ότι ένας χρήστης επιθυμεί να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία φωνής (Voice service) σε μια κυψέλη, όπου είναι διαθέσιμα τέσσερα δίκτυα. Θεωρείται ότι όλα τα δίκτυα μπορούν να εξυπηρετήσουν το χρήστη, πρέπει ωστόσο να επιλεγεί το πιο αποδοτικό από αυτά προκειμένου να επιτευχθεί μεγιστοποίηση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service). Τα κριτήρια που πρόκειται να ληφθούν υπόψη είναι τα μεγέθη Delay, Jitter, BER, Throughput και Cost.

Αξίζει να παρατηρηθεί στο σημείο αυτό ότι τα μεγέθη Delay και Jitter φέρουν μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με τις υπόλοιπες παραμέτρους, σε αντίθεση με το Throughput που ουσιαστικά δεν έχει ιδιαίτερη επίδραση στην ποιότητα της συγκεκριμένης υπηρεσίας. Από την άλλη πλευρά η βαρύτητα που αποδίδεται στο κόστος ποικίλει ανάλογα με το αν ο χρήστης είναι δεκτικός, ουδέτερος ή αποστρέφεται τον κίνδυνο.

Βέβαια, αν και υπάρχουν ενδείξεις για τη βαρύτητα που φέρει κάθε παράμετρος, η τελευταία δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια. Στο σημείο αυτό λοιπόν υπεισέρχεται το εργαλείο της ασαφούς λογικής, το οποίο επιτρέπει να μοντελοποιηθεί η ασάφεια και αβεβαιότητα που ενυπάρχει στις συγκρίσεις μεταξύ των παραμέτρων με τη βοήθεια ασαφών αριθμών (fuzzy numbers). Έτσι, η εκτίμηση για τη βαρύτητα που φέρει κάθε παράμετρος εκφράζεται από ένα σύνολο πιθανών τιμών αντί μίας και μοναδικής τιμής. Οι ζητούμενοι ασαφείς αριθμοί είναι δυνατόν να προκύψουν είτε από ερωτηματολόγια είτε

από μετρήσεις [15][28], ενώ και στις δύο αυτές περιπτώσεις η χαμηλότερη και υψηλότερη βαθμολογία-μέτρηση μπορούν να δώσουν αντίστοιχα το κάτω και άνω όριο των ασαφών αριθμών.

1.3.2.2 Κατάταξη Δικτύων με την ELECTRE

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί το πώς μπορεί να εφαρμοστεί η ELECTRE στο πλαίσιο της επιλογής δικτύου. Θεωρούμε ότι τα κριτήρια επιλογή είναι η καθυστέρηση (D), το τρεμούλιασμα (J), ο ρυθμός λαθών (B), η ρυθμοαπόδοση (T) και το κόστος (C). Με βάση τη βαθμολογία που λαμβάνει για κάθε ένα από τα επιλεγμένα κριτήρια, κάθε υποψήφιο δίκτυο μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα διάνυσμα ως

$$\mathrm{NW_i} = \begin{bmatrix} \mathrm{D_i} & \mathrm{J_i} & \mathrm{B_i} & \mathrm{T_i} & \mathrm{C_i} \end{bmatrix}$$

Για N εναλλακτικά δίκτυα υπό εξέταση ο πίνακας απόφασης NW σχηματίζεται ως εξής

$$NW = \begin{bmatrix} D_1 & J_1 & B_1 & T_1 & C_1 \\ D_2 & J_2 & B_2 & T_2 & C_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_N & J_N & B_N & T_N & C_N \end{bmatrix}$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο γεγονός ότι η χρησιμότητα που σχετίζεται με κάθε εναλλακτική είναι φθίνουσα συνάρτηση των μεγεθών Delay, Jitter, BER και Cost και ταυτόχρονα αύξουσα συνάρτηση του Throughput. Η χρήση της μεθόδου ELECTRE προϋποθέτει ωστόσο ότι η χρησιμότητα πρέπει να είναι είτε αύξουσα είτε φθίνουσα συνάρτηση για όλα τα κριτήρια που λαμβάνονται υπ όψιν, οπότε και υιοθετείται η τροποποίηση της μεθόδου κατά τον τρόπο που περιγράφεται στην αναφορά [29], προκειμένου να καταστεί δυνατή η πλήρης κατάταξη των εναλλακτικών. Κεντρική ιδέα στην εν λόγω τροποποίηση αποτελεί η έννοια του δικτύου αναφοράς (reference network), το οποίο λογίζεται ως ένα δίκτυο που επιδεικνύει την επιθυμητή επίδοση σε σχέση με όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια, όπως αυτή γίνεται αντιληπτή από το χρήστη. Το εν λόγω δίκτυο αναφοράς παριστάνεται ως

$$\mathrm{NW_{ref}} = \begin{bmatrix} \mathrm{D_{ref}} & \mathrm{J_{ref}} & \mathrm{B_{ref}} & \mathrm{T_{ref}} & \mathrm{C_{ref}} \end{bmatrix}$$

και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόλυτης διαφοράς μεταξύ της τιμής κάθε στοιχείου του πίνακα NW και της αντίστοιχης τιμής αναφοράς, επιτρέποντας να γίνει η υπόθεση ότι η χρησιμότητα που σχετίζεται με κάθε εναλλακτική είναι φθίνουσα συνάρτηση όλων των κριτηρίων. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή που έχει αποδοθεί σε κάποιο κριτήριο στον τροποποιημένο πίνακα, τόσο πιο μακριά βρίσκεται σε σχέση με την επιθυμητή τιμή ή τιμή αναφοράς.

Η εφαρμογή της μεθόδου ELECTRE προϋποθέτει επιπλέον ότι οι τιμές που έχουν αποδοθεί σε όλα τα κριτήρια μετρούνται σε μια κοινή κλίμακα. Ως εκ τούτου, προκειμένου να αφαιρεθεί η επίδραση της χρήσης διαφορετικών μονάδων μέτρησης, κάθε στοιχείο που βρίσκεται στη γραμμή *i* και τη στήλη *j* του προσαρμοσμένου πίνακα *NW* κανονικοποιείται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\overline{V}_i = \text{value}_{i,norm} = \frac{\max_{j=1,\dots,N}\{V_{j,adj}\} - V_{i,adj}}{\max_{j=1,\dots,N}\{V_{j,adj}\} - \min_{j=1,\dots,N}\{V_{j,adj}\}} \tag{1.24}$$

όπου $V_{i,adj} = V_i - V_{i,ref}$ και $\max_{j=1,\dots,N}\{V_{j,adj}\}, \min_{j=1,\dots,N}\{V_{j,adj}\}$ υποδεικνύουν την υψηλότερη και χαμηλότερη μέτρηση αντίστοιχα που έχει επιτευχθεί για το συγκεκριμένο κριτήριο. Ο κανονικοποιημένος πίνακας παριστάνεται τελικά ως εξής:

$$NW_{norm} = \begin{bmatrix} \overline{D_1} & \overline{J_1} & \overline{B_1} & \overline{T_1} & \overline{C_1} \\ \overline{D_2} & \overline{J_2} & \overline{B_2} & \overline{T_2} & \overline{C_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \overline{D_N} & \overline{J_N} & \overline{B_N} & \overline{T_N} & \overline{C_N} \end{bmatrix}$$

Το επόμενο βήμα της μεθόδου αφορά στη χρησιμοποίηση της σχετικής βαρύτητας καθενός από τα κριτήρια που επηρεάζουν την επιλογή δικτύου, η οποία οφείλει να ληφθεί υπόψη πριν από τη σύγκριση των εναλλακτικών ανά ζεύγη. Η επίδραση λοιπόν της σχετικής βαρύτητας των κριτηρίων ενσωματώνεται στη διαδικασία της απόφασης μέσω του υπολογισμού ενός νέου πίνακα NW_w ως εξής:

$$NW_{norm} = \begin{bmatrix} w_D \cdot \overline{D_1} & w_J \cdot \overline{J_1} & w_B \cdot \overline{B_1} & w_T \cdot \overline{T_1} & w_C \cdot \overline{C_1} \\ w_D \cdot \overline{D_2} & w_J \cdot \overline{J_2} & w_B \cdot \overline{B_2} & w_T \cdot \overline{T_2} & w_C \cdot \overline{C_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_D \cdot \overline{D_N} & w_J \cdot \overline{J_N} & w_B \cdot \overline{B_N} & w_T \cdot \overline{T_N} & w_C \cdot \overline{C_N} \end{bmatrix}$$

1.3.2.3 Αριθμητικό Παράδειγμα

Το πρώτο βήμα για την επιλογή δικτύου είναι ο προσδιορισμός της σχετικής βαρύτητας των εξεταζόμενων κριτηρίων. Καθώς το θέμα αυτό υπερβαίνει τους σκοπούς αυτής της εργασίας, θεωρούμε ότι η σχετική βαρύτητα των κριτηρίων είναι ήδη γνωστή και τα αντίστοιχα δεδομένα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1.9, που ταυτόχρονα αποτελεί και τον πίνακα απόφασης. Ο τελευταίος είναι συμμετρικός, γεγονός που εκφράζεται και από τη σχέση $a_{ij}=1/a_{ji}$. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη συμπλήρωση των στοιχείων εκείνων μόνο για τα οποία το κριτήριο *i* είναι πιο σημαντικό από το κριτήριο *j*. Τα υπόλοιπα στοιχεία συμπληρώνονται αντιστρέφοντας απλώς τους αντίστοιχους ασαφείς αριθμούς. Εφαρμόζοντας τελικά τη μέθοδο

FAHP υπολογίζονται τα βάρη για όλες τις παραμέτρους. Χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.13) παίρνουμε τα ενδιάμεσα αποτελέσματα

$$S_d=(0.1551,0.2486,0.38669)$$

$$S_j=(0.1674,0.2557,0.42141)$$

$$S_b=(0.0818,0.1243,0.18757)$$

$$S_t=(0.0756,0.1227,0.17559)$$

$$S_c=(0.1658,0.2486,0.37755)$$

Τα κανονικοποιημένα βάρη (Πίνακας 1.10) που προκύπτουν με εφαρμογή της σχέσης (1.18) χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για τη μέθοδο ELECTRE.

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Throughput**	**Cost**
Delay	(1,1,1)	(0.667,1,1.429)	(1.5,2,2.4)	(1.6,2,2.8)	(0.8,1,1.333)
Jitter	(0.7,1,1.5)	(1,1,1)	(1.6,2,2.6)	(1.8,2.2,3)	(0.909,1,1.667)
BER	(0.417,0.5,0.667)	(0.385,0.5,0.625)	(1,1,1)	(0.75,1,1.5)	(0.385,0.5,0.556)
T/put	(0.357,0.5,0.625)	(0.333,0.455,0.556)	(0.667,1,1.333)	(1,1,1)	(0.357,0.5,0.556)
Cost	(0.75,1,1.25)	(0.6,1,1.1)	(1.8,2,2.6)	(1.8,2,2.8)	(1,1,1)

Πίνακας 1.9. Σχετική Βαρύτητα των κριτηρίων σε ασαφείς αριθμούς

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Throughput**	**Cost**
Normalized weights	0.3148	0.3249	0.036302	0.009555	0.3144

Πίνακας 1.10. Κανονικοποιημένα Βάρη

	Delay(msec)	**Jitter(msec)**	**BER($\cdot 10^6$)**	**Throughput(kbps)**	**Cost(units)**
Network 1	155.5	4	0.085	18.8	25
Network 2	151.9	2.54	0.09	21.5	31
Network 3	121.3	2.79	0.06	19.6	31
Network 4	117.4	3.58	0.08	16.4	35
Reference	100	1	0.01	25	22

Πίνακας 1.11. Τιμές των παραμέτρων για όλα τα εναλλακτικά δίκτυα

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Throughput**	**Cost**
Network 1	0	0	0.167	0.471	1
Network 2	0.095	1	0	1	0.4
Network 3	0.898	0.833	1	0.628	0.4
Network 4	1	0.305	0.333	0	0

Πίνακας 1.12. Κανονικοποιημένες τιμές

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Throughput**	**Cost**
Network 1	0	0	0.001	0.004	0.314
Network 2	0.03	0.325	0	0.01	0.126
Network 3	0.283	0.271	0.036	0.006	0.126
Network 4	0.315	0.099	0.012	0	0

Πίνακας 1.13. Κανονικοποιημένες και σταθμισμένες τιμές

Ο Πίνακας 1.11 παρουσιάζει τις τιμές κάθε παραμέτρου για όλες τις εναλλακτικές καθώς και τις αντίστοιχες τιμές αναφοράς που χρησιμοποιούνται για κανονικοποίηση, ενώ οι Πίνακες 1.12 και 1.13 συγκεντρώνουν αντίστοιχα τα κανονικοποιημένες και σταθμισμένες

τιμές. Ακολουθεί η κατασκευή των πινάκων συμφωνίας και ασυμφωνίας με βάση τις εξισώσεις (1.9) και (1.10), ενώ οι αντίστοιχοι δείκτες υπολογίζονται τελικά με τη βοήθεια των σχέσεων (1.11) και (1.12).

$$C = \begin{bmatrix} - & 0.351 & 0.314 & 0.323 \\ 0.649 & - & 0.649 & 0.649 \\ 0.686 & 0.665 & - & 0.685 \\ 0.676 & 0.351 & 0.315 & - \end{bmatrix} \qquad D = \begin{bmatrix} - & 0.649 & 0.756 & 0.568 \\ 0.351 & - & 0.833 & 0.451 \\ 0.243 & 0.167 & - & 0.089 \\ 0.432 & 0.549 & 0.910 & - \end{bmatrix}$$

Η τελική κατάταξη των δικτύων απεικονίζεται στον Πίνακα 1.14, από τον οποίο και προκύπτει ότι το δίκτυο #3 (Network 3) είναι η καλύτερη επιλογή.

	Rank C	**Rank D**
Network 1	4	4
Network 2	2	2
Network 3	1	1
Network 4	3	3

Πίνακας 1.14. Κατάταξη υποψηφίων δικτύων σύμφωνα με τους δείκτες συμφωνίας και ασυμφωνίας

1.3.3 Συγκριτική Μελέτη Μεθόδων Κατάταξης

1.3.3.1 Σενάριο Μελέτης

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε την απόδοση διαφόρων μεθόδων κατάταξης εναλλακτικών. Μια ενδιαφέρουσα συγκριτική μελέτη των μεθόδων MADM μπορεί να βρεθεί στην αναφορά [23]. Θεωρούμε ένα απλό σενάριο, σύμφωνα με το οποίο ένας χρήστης επιθυμεί να κάνει χρήση της υπηρεσίας Τηλεφωνίας σε μία κυψέλη όπου υπάρχουν διαθέσιμα πέντε δίκτυα με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη είναι τα Delay, Jitter, BER, Utilization, Throughput and Cost. Ο Πίνακας 1.15 συγκεντρώνει τις μέσες τιμές των κριτηρίων για όλα τα διαθέσιμα δίκτυα, ενώ ο Πίνακας 1.16 παρουσιάζει τις κανονικοποιημένες τιμές.

	Delay (msec)	**Jitter (msec)**	**BER ($\cdot 10^6$)**	**Utilization (%)**	**Throughput (kbps)**	**Cost/byte (cost units)**
Network 1	185	8	0,085	20	18,8	8
Network 2	210	5	0,09	40	21,5	10
Network 3	140	11	0,06	10	19,6	9
Network 4	180	6	0,08	60	16,4	10
Network 5	250	4	0,06	50	22,3	6
Reference	120	3	0,01	10	25	3

Πίνακας 1.15. Τιμές των παραμέτρων για όλα τα εναλλακτικά δίκτυα

Όσον αφορά τα βάρη των κριτηρίων, υποθέτουμε ότι αυτά καθορίζονται από την AHP, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες ενότητες. Για το συγκεκριμένο σενάριο θεωρούμε τα βάρη του Πίνακα 1.17.

	Delay	Jitter	BER	Utilization	Throughput	Cost/byte
Network 1	0.591	0.429	0.167	0.8	0.471	0.5
Network 2	0.363	0.857	0	0.4	1	0
Network 3	1	0	1	1	0.627	0.25
Network 4	0.636	0.714	0.333	0	0	0
Network 5	0	1	1	0.2	1.157	1

Πίνακας 1.16. Κανονικοποιημένες τιμές

	Delay	Jitter	BER	Utilization	Throughput	Cost
Normalized weights	0.034	0.111	0.083	0.301	0.071	0.4

Πίνακας 1.17. Κανονικοποιημένα Βάρη Σεναρίου Σύγκρισης

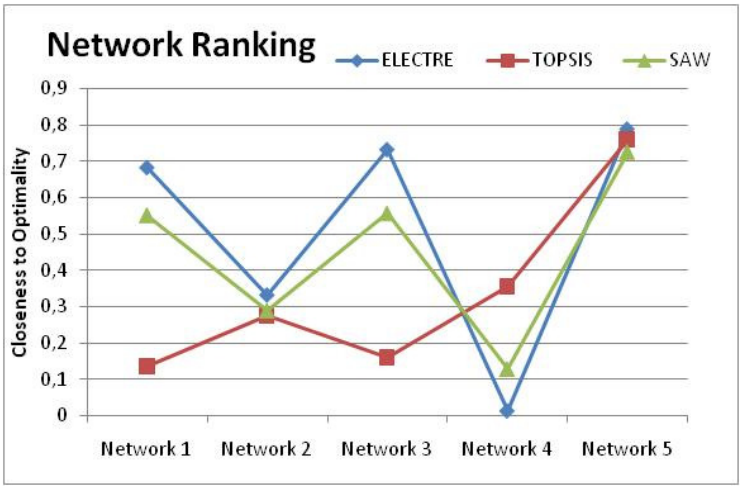
1.3.3.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των μεθόδων SAW, TOPSIS και ELECTRE. Από τον Πίνακα 1.18 παρατηρούμε ότι οι SAW και ELECTRE δίνουν ακριβώς την ίδια κατάταξη, ενώ η TOPSIS δίνει μια διαφορετική κατάταξη. Ωστόσο, και οι τρεις μέθοδοι υποδεικνύουν το δίκτυο #5 ως τη βέλτιστη επιλογή. Η διαφοροποίηση οφείλεται εν μέρει στη διαφορετική διαδικασία κανονικοποίησης που ακολουθείται στην TOPSIS. Η Εικόνα 1.9 απεικονίζει την κατάταξη κάθε δικτύου (στο διάστημα [0, 1]), από όπου μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι η TOPSIS παρουσιάζει τις μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Παρόλο που όλες οι μέθοδοι δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα, πρέπει να εξεταστεί και η απόδοσή τους από την πλευρά της πολυπλοκότητας. Δεδομένου του αριθμού των βημάτων που απαιτούνται για την εκτέλεση της κάθε μίας, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι η ELECTRE είναι αρκετά πιο πολύπλοκη από τις SAW και TOPSIS. Παρόλα αυτά, στη συγκεκριμένη εφαρμογή, ο αριθμός των κριτηρίων και εναλλακτικών δικτύων είναι αρκετά μικρός, συνεπώς μια ελαφρώς αυξημένη πολυπλοκότητα δεν αυξάνει σημαντικά το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Σε άλλες εφαρμογές, για παράδειγμα με δεκαπέντε κριτήρια ή είκοσι εναλλακτικές, το θέμα της πολυπλοκότητας θα παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου.

1.3.3.3 Ευαισθησία Κατατάξεων στο Προφίλ Χρήστη

Ολοκληρώνουμε την παρούσα ανάλυση εξετάζοντας την επίδραση που έχει το βάρος της παραμέτρου Κόστος στην τελική κατάταξη των δικτύων. Η παράμετρος αυτή ουσιαστικά περιγράφει το προφίλ του χρήστη, αφού δηλώνει το κατά πόσο ο χρήστης προτιμάει να εξοικονομήσει χρήματα ή να αναζητήσει υψηλή Ποιότητα Υπηρεσίας. Για το λόγο αυτό επαναλαμβάνουμε το προηγούμενο σενάριο για επτά διαφορετικές τιμές του βάρους που φέρει η παράμετρος Cost (w_c). Ο Πίνακας 1.18 συγκεντρώνει την κατάταξη που προκύπτει από τις τρεις μεθόδους, ενώ η Εικόνα 1.10 παρέχει μια οπτική αναπαράσταση των

αποτελεσμάτων. Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι η TOPSIS είναι η μοναδική μέθοδος που επιλέγει πάντα το δίκτυο #5 ως τη βέλτιστη επιλογή, ανεξάρτητα από την τιμή του w_c. Ως γενικό σχόλιο θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η σειρά της κατάταξης δε διαφοροποιείται σημαντικά για τις χαμηλές και υψηλές τιμές του w_c. Αντίθετα, και οι τρεις μέθοδοι φαίνεται να παρουσιάζουν διαφοροποιημένη κατάταξη για τιμές του w_c ανάμεσα σε 0.3 και 0.5. Πιο συγκεκριμένα, οι ELECTRE και SAW παρουσιάζουν την ίδια κατάταξη εκτός από την περίπτωση w_c = 0.3. Όταν w_c = 0.1 ή 0.2, οι μέθοδοι αυτές υποδεικνύουν το δίκτυο #2 ως βέλτιστη επιλογή. Κατά συνέπεια, η σειρά της κατάταξης είναι στενά συνδεδεμένη με την επιλογή των βαρών.



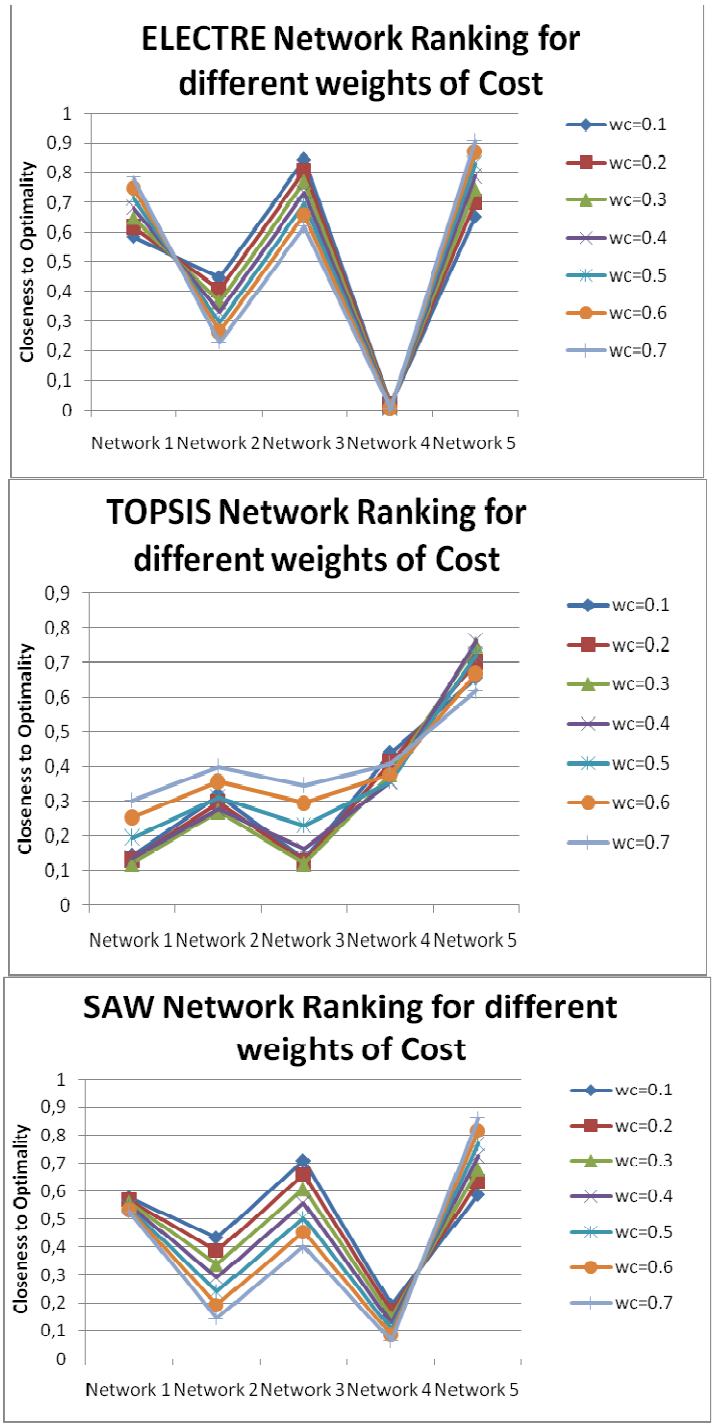
Εικόνα 1.9. Κανονικοποιημένα Βάρη Σεναρίου Σύγκρισης

ELECTRE	w_c=0.1	w_c=0.2	w_c=0.3	w_c=0.4	w_c=0.5	w_c=0.6	w_c=0.7
Network 1	0.585	0.618	0.65	0.682	0.716	0.749	0.783
Network 2	0.446	0.405	0.367	0.331	0.297	0.264	0.23
Network 3	0.844	0.807	0.77	0.733	0.695	0.657	0.619
Network 4	0.021	0.018	0.015	0.012	0.01	0.008	0.007
Network 5	0.652	0.701	0.746	0.789	0.83	0.87	0.908

TOPSIS	w_c=0.1	w_c=0.2	w_c=0.3	w_c=0.4	w_c=0.5	w_c=0.6	w_c=0.7
Network 1	0.143	0.133	0.119	0.136	0.194	0.253	0.303
Network 2	0.319	0.298	0.271	0.277	0.312	0.356	0.398
Network 3	0.134	0.127	0.119	0.162	0.23	0.295	0.346
Network 4	0.44	0.412	0.377	0.356	0.357	0.377	0.407
Network 5	0.657	0.703	0.751	0.762	0.724	0.67	0.619

SAW	w_c=0.1	w_c=0.2	w_c=0.3	w_c=0.4	w_c=0.5	w_c=0.6	w_c=0.7
Network 1	0.577	0.568	0.56	0.551	0.543	0.534	0.526
Network 2	0.434	0.386	0.338	0.289	0.241	0.193	0.145
Network 3	0.709	0.658	0.607	0.556	0.505	0.454	0.403
Network 4	0.194	0.172	0.15	0.129	0.108	0.086	0.065
Network 5	0.587	0.633	0.679	0.725	0.77	0.817	0.862

Πίνακας 1.18. Κατάταξη δικτύων για διαφορετικά βάρη της παραμέτρου Cost



Εικόνα 1.10. Επίδραση προφίλ χρήστη στην κατάταξη των δικτύων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.4: ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ

1.4.1 Περιγραφή του Πλαισίου Επιλογής Δικτύου

Σε αυτό το κεφάλαιο της διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται ένα ενοποιημένο πλαίσιο επιλογής δικτύου (Unified Network Selection Framework – UNSF) που εμπεριέχει και το μηχανισμό καθορισμού βαρών και το μηχανισμό κατάταξης. Ενώ οι περισσότερες προσεγγίσεις στη διεθνή βιβλιογραφία προτείνουν τη χρήση μεθόδων MADM για κατάταξη δικτύων, εδώ εισάγεται η χρήση της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA) για την εκμετάλλευση της σχέσης ανάμεσα στη διασπορά δύο σετ δεδομένων και την εξαγωγή των βαρών. Το πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι αξιοποιεί πραγματικά δεδομένα αντί να βασίζεται μόνο σε ασαφείς συγκρίσεις ή κρίσεις. Η PCA έχει χρησιμοποιεί ευρέως σε προβλήματα ασύρματων επικοινωνιών, ειδικά για εντοπισμό ανωμαλιών [30] ή συγκέντρωση δεδομένων [31], ωστόσο ποτέ στα πλαίσια της επιλογής δικτύου.

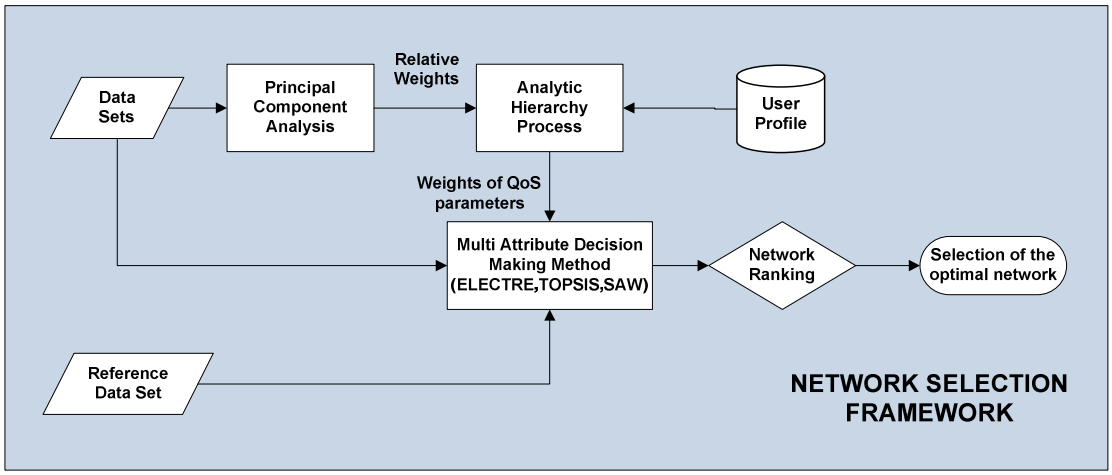
Η προτεινόμενη στρατηγική επιλογής δικτύων απεικονίζεται στην Εικόνα 1.11 και αποτελείται από τρία βασικά βήματα:

1) Το πρώτο βήμα της διαδικασίας περιλαμβάνει τον καθορισμό των κριτηρίων απόφασης και των σχετικών προτεραιοτήτων μέσω της PCA.
2) Στη συνέχεια εξάγονται οι σχετικές προτεραιότητες και χρησιμοποιούνται ως είσοδος στην AHP, ώστε να εξαχθούν τελικά βάρη.
3) Τελικά χρησιμοποιείται μια μέθοδος MADM για την κατάταξη όλων των διαθέσιμων δικτύων σε σύγκριση με ένα δίκτυο αναφοράς (βέλτιστο δίκτυο).

Η κατάταξη πραγματοποιείται μέσα από μια σειρά από σετ μετρήσεων των δικτύων για όλα τα κριτήρια που συμμετέχουν στη διαδικασία απόφασης. Κάθε δίκτυο υποτίθεται ότι συλλέγει περιοδικά αυτή την πληροφορία, η οποία συγκρίνεται με το σετ αναφοράς, το οποίο συγκεντρώνει τις βέλτιστες τιμές όλων των κριτηρίων που μπορούν να επιτευχθούν. Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης θεωρούμε ως κριτήρια απόφασης τις παραμέτρους *Delay*, *Jitter*, *Bit Error Rate (BER)*, *Utilization*, *Throughput* και *Cost*. Όλες εκτός από το Throughput κανονικοποιούνται ως Smaller-the-better, που σημαίνει ότι οι μικρές τιμές είναι επιθυμητές. Λαμβάνοντας υπόψη το φόρτο του δικτύου ως δυναμικό κριτήριο, επιτυγχάνεται έμμεσα ένας μηχανισμός ελέγχου φορτίου.

Αφότου καθοριστούν τα κριτήρια απόφασης, το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το βάρος κάθε κριτηρίου. Προκειμένου να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα της

υποκειμενικότητας και ανακρίβειας όσον αφορά τη σχετική σημασία, προτείνουμε τη χρήση της PCA. Με τον τρόπο αυτό εκμεταλλευόμαστε τις μετρήσεις από τα υποψήφια δίκτυα αντί να στηριζόμαστε σε υποκειμενικές κρίσεις.



Εικόνα 1.11. Πλαίσιο επιλογής δικτύου

Η PCA αποκαλύπτει την εσωτερική δομή των δεδομένων και εξηγεί τη διασπορά τους [32], η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο σύγκρισης. Ανακατασκευάζοντας τα δεδομένα με βάση επιλεγμένα ιδιοδιανύσματα, αποκαλύπτονται μοτίβα στα δεδομένα. Ένα μοτίβο δηλώνει σαφώς πόσο διασκορπισμένο είναι ένα σετ δεδομένων σε σχέση με κάποιο άλλο. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι αφαιρεί τον αντίκτυπο των διαφορετικών μονάδων μέτρησης από την όλη διαδικασία. Συγκρίνοντας τα σετ δεδομένων δύο διαφορετικών κριτηρίων μπορεί να εντοπιστεί η υπεροχή του ενός έναντι του άλλου [33]. Αυτό σημαίνει ότι το κριτήριο που παρουσιάζει διασκορπισμένα σετ δεδομένων δε θα πρέπει να χαρακτηριστεί ως πολύ σημαντικό. Η PCA χρησιμοποιείται για συγκρίσεις ανά ζεύγη και τα κύρια πλεονεκτήματα από τη χρήση της συνοψίζονται ως εξής:

- Η PCA επιτρέπει την εκμετάλλευση των μετρήσεων από τα ίδια τα δίκτυα, συνεπώς τα βάρη δε βασίζονται αποκλειστικά σε προσωπικές κρίσεις ούτε προσδιορίζονται τυχαία.
- Η PCA πραγματοποιεί συγκρίσεις ανά ζεύγη και αφαιρεί τις μονάδες μέτρησης.
- Τα σετ δεδομένων μπορούν να ενημερώνονται περιοδικά και συνεπώς τα βάρη να αλλάζουν δυναμικά, σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις (όπως για παράδειγμα με απλή χρήση της AHP).
- Αφού τα βάρη εξάγονται δυναμικά από τα σετ δεδομένων, δεν απαιτούνται επιπλέον ενέργειες από το σχεδιαστή.
- Η χρήση της PCA επιτρέπει επεκτασιμότητα, αφού μπορούν να προστεθούν ή να αφαιρεθούν κριτήρια χωρίς να πρέπει ο σχεδιαστής να επαναπροσδιορίσει τα δεδομένα εισόδου της AHP.

Τα βάρη των παραμέτρων QoS μπορούν να προσδιοριστούν μέσω της PCA, ενώ το βάρος της παραμέτρου Cost δεν μπορεί να καθοριστεί μέσω αυτής της μεθόδου. Οι λόγοι για αυτή την εξαίρεση είναι αφενός ότι οι τιμές του κόστους δε διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια μιας συνόδου και αφετέρου ότι η βαρύτητα της παραμέτρου αυτής εξαρτάται από τις προτιμήσεις του χρήστη και όχι από μαθηματικές σχέσεις που εξάγονται από σετ δεδομένων. Κάθε δίκτυο χρεώνει με βάση ένα σταθερό σύστημα χρέωσης ανά byte. Φυσικά κάθε χρήστης επιθυμεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος της υπηρεσίας που λαμβάνει, ορισμένες φοράς εις βάρος της ποιότητας.

Το δεύτερο μέρος του προτεινόμενου πλαισίου αφορά την εφαρμογή της AHP για την εξαγωγή βαρών. Δεδομένου ότι η μέθοδος αυτή απαιτεί προκαθορισμένες σχέσεις μεταξύ των κριτηρίων επιλογής , τα αποτελέσματα της PCA μπορούν να εισαχθούν κατευθείαν στην AHP. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από τη χρήση μόνο της AHP, αφού ειδάλλως η σχετική σημασία που απαιτείται από την AHP καθορίζεται υποκειμενικά.

Στο τελευταίο βήμα χρησιμοποιείται μια MADM μέθοδος, όπως έχει ήδη περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης χρησιμοποιείται η ELECTRE.

1.4.2 Καθορισμός Βαρών Παραμέτρων

1.4.2.1 Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών

Η Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis – PCA) αποτελεί μια μέθοδο για τον εντοπισμό μοτίβων στα δεδομένα και την έκφραση των δεδομένων με τέτοιο τρόπο ώστε να διαφαίνονται οι ομοιότητες και διαφορές μεταξύ τους [32]. Η PCA είναι η απλούστερη από τις μεθόδους ανάλυσης που βασίζονται σε ιδιοδιανύσματα και περιλαμβάνει μια μαθηματική διαδικασία που μετατρέπει έναν αριθμό από πιθανώς συσχετισμένες μεταβλητές σε ένα μικρότερο αριθμό μη συσχετισμένων κυρίαρχων συνιστωσών. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα βασικά βήματα της PCA υποθέτοντας ότι επιθυμούμε να συγκρίνουμε δύο σετ δεδομένων X και Y. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, τα X και Y αντιπροσωπεύουν σετ δεδομένων από δύο διαφορετικά κριτήρια, οι τιμές των οποίων καταγράφηκαν κατά την ίδια δειγματοληψία.

Υποθέτοντας ότι το σετ δεδομένων X αποτελείται από *n* τιμές, το πρώτο βήμα της PCA είναι η αφαίρεση της μέσης τιμής $\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} x_j$ από όλες τις τιμές του X. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει ένα σετ δεδομένο με μέση τιμή ίση με το μηδέν. Ο πίνακας συνδιακύμανσης C υπολογίζεται ως

$$C = \begin{vmatrix} \mathrm{cov}(X,X) & \mathrm{cov}(X,Y) \\ \mathrm{cov}(Y,X) & \mathrm{cov}(Y,Y) \end{vmatrix} \text{ όπου } \mathrm{cov}(X,Y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{X})(y_i - \overline{Y})}{n-1} \qquad (1.25)$$

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των ιδιοδιανυσμάτων και των ιδιοτιμών για αυτό τον πίνακα. Πρέπει να σημειωθεί ότι και τα δύο ιδιοδιανύσματα θα έχουν μέγεθος 1. Αφού βρεθούν τα ιδιοδιανύσματα, ταξινομούνται με βάση τις ιδιοτιμές τους, από την υψηλότερη στη χαμηλότερη. Η διαδικασία αυτή δίνει τις συνιστώσες με σειρά σημασίας. Το ιδιοδιάνυσμα με την υψηλότερη ιδιοτιμή είναι η κύρια συνιστώσα του σετ δεδομένων.

Αυτό που ακολουθεί είναι ο σχηματισμός ενός διανύσματος χαρακτηριστικών (feature vector), το οποίο κατασκευάζεται από ένα πίνακα που περιλαμβάνει όλα τα ιδιοδιανύσματα ως στήλες. Στην περίπτωση που οι ιδιοτιμές είναι μικρές, τότε η απώλεια σημαντικής πληροφορίας θα είναι μικρή εάν εξαιρεθεί το αντίστοιχο ιδιοδιάνυσμα. Όταν επιλεγούν οι συνιστώσες (δηλαδή τα ιδιοδιανύσματα) που θα συμμετάσχουν στη διαδικασία και σχηματιστεί το διάνυσμα χαρακτηριστικών, τα τελικά δεδομένα προκύπτουν ως

$$\mathrm{FinalData} = \mathrm{RowFeatureVector} * \mathrm{RowDataAdjust} \qquad (1.26)$$

όπου *RowFeatureVector* είναι ο πίνακας με τα ιδιοδιανύσματα στις στήλες που έχει αντιμετατεθεί ώστε τα ιδιοδιανύσματα να είναι πλέον στις στήλες, με το πιο σημαντικό στην κορυφή, και *RowDataAdjust* είναι ο πίνακας με τα τροποποιημένα δεδομένα που έχει κι αυτός αντιμετατεθεί. *FinalData* είναι το τελικό σετ δεδομένων με αντικείμενα δεδομένων στις στήλες και διαστάσεις στις σειρές. Τα αρχικά δεδομένα μπορούν να ανακατασκευαστούν μέσω των ακόλουθων σχέσεων:

$$\mathrm{RowDataAdjust} = (\mathrm{RowFeatureVector})^T * \mathrm{FinalData} \qquad (1.27)$$

$$\mathrm{RowOriginalData} = [(\mathrm{RowFeatureVector})^T * \mathrm{FinalData}] + \mathrm{OriginalMean} \qquad (1.28)$$

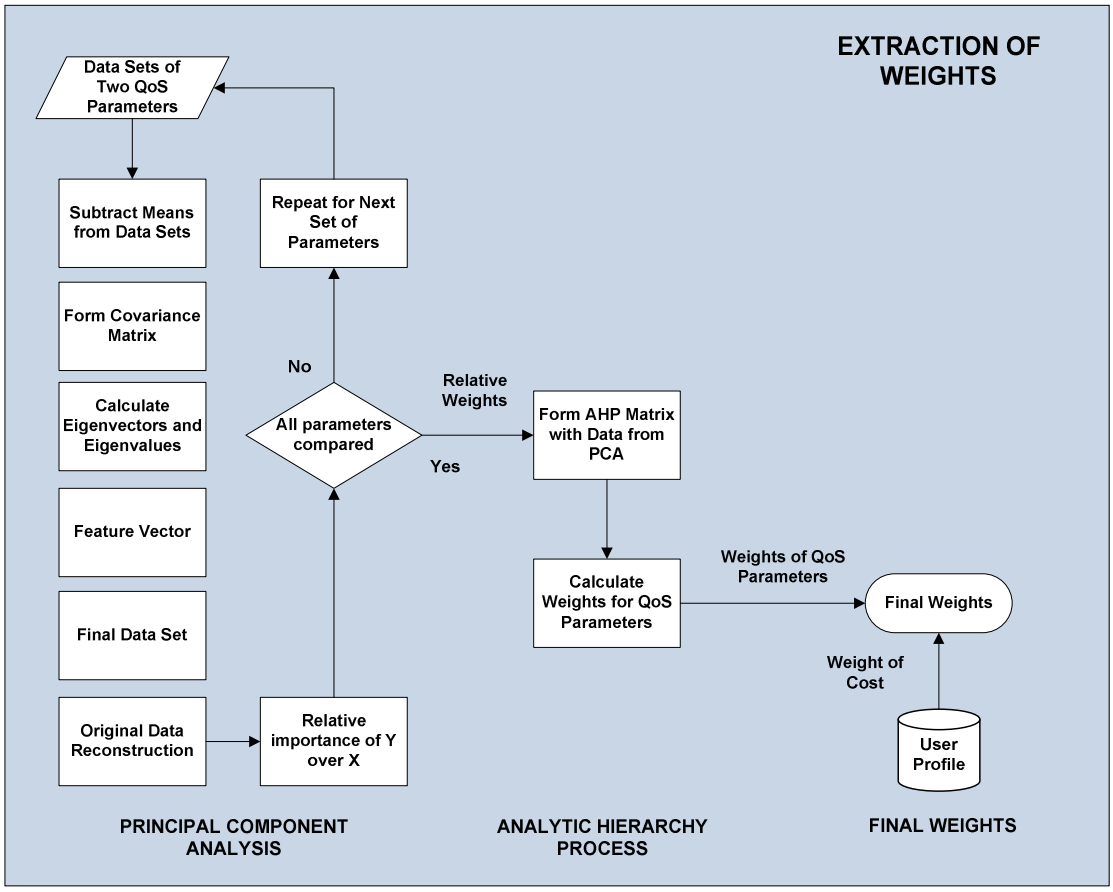
Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι αν κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού παραλήφθηκαν ορισμένα ιδιοδιανύσματα τότε τα ανακατασκευασμένα δεδομένα θα έχουν χάσει κάποια πληροφορία. Μια δισδιάστατη γραφική αναπαράσταση των ανακατασκευασμένων δεδομένων μας παρέχει μια εκτίμηση της διασπορά του Y σε σχέση με τη διασπορά του X, στη μορφή Y=aX+b. Η τιμή a μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως η σχετική σημασία του Y πάνω στο X. Στο προτεινόμενο πλαίσιο η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου για τη σύγκριση των κριτηρίων Y και X στην AHP. Η εφαρμογή αυτή ωστόσο της PCA προϋποθέτει την ορθογωνιότητα των κυρίων συνιστωσών για τις QoS παραμέτρους που εξετάζονται.

Ανακατασκευάζοντας τα δεδομένα κάποιος μπορεί να εκτιμήσει την κυριαρχία ενός σετ έναντι κάποιου άλλου. Με τον τρόπο αυτό ένα σετ θεωρείται ως πιο σημαντικό όταν είναι λιγότερο «διασκορπισμένο» (και συνεπώς πιο σταθερό) σε σχέση με κάποιο άλλο. Ένα «διασκορπισμένο» σετ δεδομένων υποδεικνύει ότι το δίκτυο παρουσιάζει μεγάλες

διακυμάνσεις και για το λόγο αυτό αδυνατεί να παρέχει σταθερή απόδοση, άρα και να αντικατοπτρίσει αποτελεσματικά την ποιότητα του δικτύου. Τα σετ δεδομένων με μεγάλες διακυμάνσεις λοιπόν δε θα πρέπει να επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας επιλογής δικτύου.

1.4.2.2 Εφαρμογή PCA και AHP στην Επιλογή Δικτύου

Τα απαιτούμενα βήματα για το συνδυασμό των δύο αυτών μεθόδων απεικονίζονται στην Εικόνα 1.12. Η μέθοδος AHP έχει ήδη επεξηγηθεί στην Ενότητα 1.2.3 της παρούσης διατριβής. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι μετά την εφαρμογή της τα βάρη που προκύπτουν πρέπει να κανονικοποιηθούν, λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο Cost, η οποία φέρει το δικό της ανεξάρτητο και προκαθορισμένο βάρος.



Εικόνα 1.12. Εξαγωγή βαρών

1.4.3 Παράδειγμα Εφαρμογής και Προσομοίωση

1.4.3.1 Μοντελοποίηση Προβλήματος και Αριθμητικό Παράδειγμα

Στην παράγραφο αυτή εξετάζεται το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το προτεινόμενο πλαίσιο για την επίλυση του προβλήματος επιλογής δικτύου σε ένα σενάριο εφαρμογής. Αρχικά η διαδικασία απόφασης θα παρουσιαστεί μέσω ενός αριθμητικού παραδείγματος. Πιο

συγκεκριμένα, θεωρούμε ένα χρήστη που χρησιμοποιεί την υπηρεσία Video Telephony σε μια κυψέλη όπου συνυπάρχουν πέντε δίκτυα πρόσβασης. Τα κριτήρια που εξετάζονται είναι τα Delay, Jitter, BER, Utilization, Throughput και Cost. Ο Πίνακας 1.19 συγκεντρώνει τις μέσες τιμές όλων των δεικτών απόδοσης για όλες τις εναλλακτικές, καθώς και τις τιμές αναφοράς που χρησιμοποιούνται για την κανονικοποίηση, ενώ ο Πίνακας 1.20 δείχνει τις κανονικοποιημένες τιμές.

	Delay (msec)	**Jitter (msec)**	**BER ($\cdot 10^6$)**	**Utilization (%)**	**Throughput (kbps)**	**Cost/byte (cost units)**
Network 1	185	8	0.085	20	18.8	8
Network 2	210	5	0.09	40	21.5	10
Network 3	140	11	0.06	10	19.6	9
Network 4	180	6	0.08	60	16.4	10
Network 5	250	4	0.06	50	22.3	6
Reference	120	3	0.01	10	25	3

Πίνακας 1.19. Πίνακας Απόφασης

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Utilization**	**Throughput**	**Cost/byte**
Network 1	0.591	0.429	0.167	0.8	0.471	0.5
Network 2	0.363	0.857	0	0.4	1	0
Network 3	1	0	1	1	0.627	0.25
Network 4	0.636	0.714	0.333	0	0	0
Network 5	0	1	1	0.2	1.157	1

Πίνακας 1.20. Κανονικοποιημένος Πίνακας Απόφασης

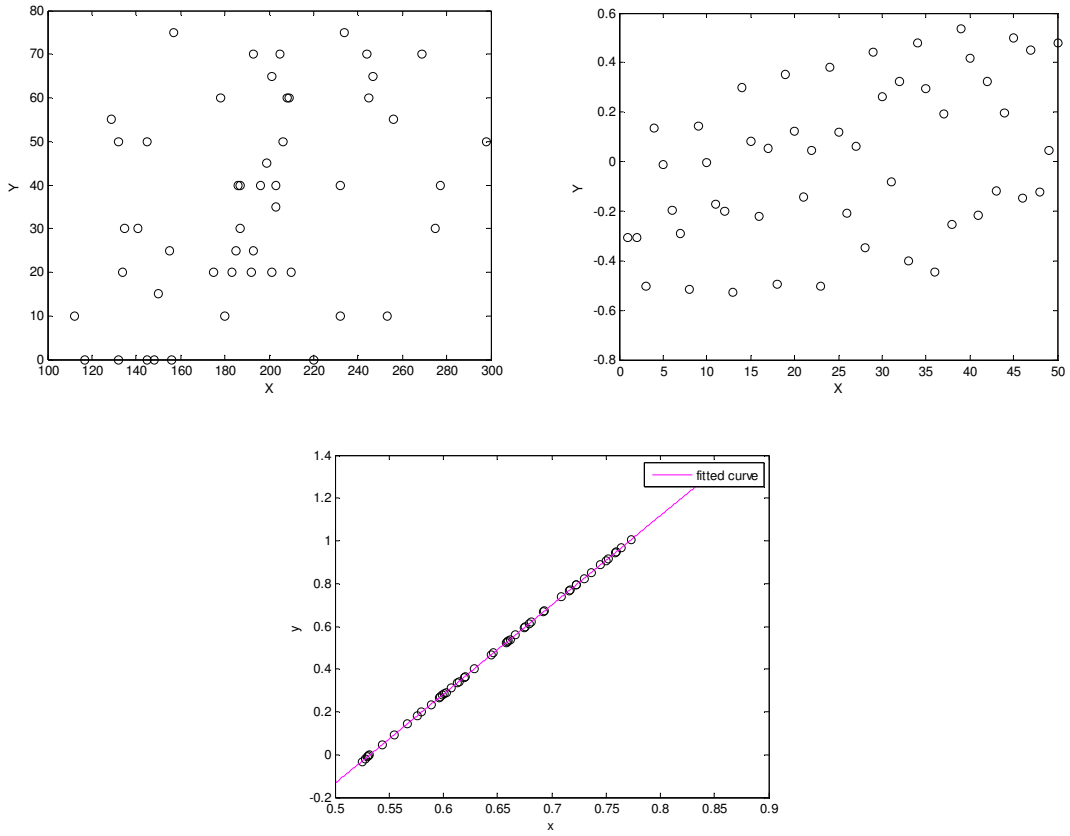
Τα βάρη υπολογίζονται με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.4.2 και είναι κοινά για όλες τις εναλλακτικές. Ένα παράδειγμα αυτής της διαδικασίας απεικονίζεται στην Εικόνα 1.13 για μικρά σετ δεδομένων των παραμέτρων Delay και Utilization. Τα ανακατασκευασμένα δεδομένα μας παρέχουν τη σχετική σπουδαιότητα της μιας συνιστώσας συγκρινόμενη με την άλλη, η οποία στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι 4.178. Τελικά πραγματοποιείται η κατάταξη χρησιμοποιώντας μια μέθοδο MADM, στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ELECTRE. Η κατάταξη επιτυγχάνεται θέτοντας σε κάθε εναλλακτική μια τιμή η οποία ανήκει στο διάστημα [0, 1]. Αυτό σημαίνει ότι όσο κοντύτερα στο 1 είναι η τιμή αυτή τόσο πιο κοντά βρίσκεται ένα δίκτυο στο δίκτυο αναφοράς. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η ELECTRE υποδεικνύει το δίκτυο #5 ως τη βέλτιστη λύση.

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Utilization**	**Throughput**
Delay	1	0.567	0.522	4.178	0.612
Jitter		1	12.6	0.537	6.244
BER			1	13.33	0.089
Utilization				1	56.55
Throughput					1

Πίνακας 1.21. Πίνακας AHP

	Delay	**Jitter**	**BER**	**Utilization**	**Throughput**	**Cost**
Normalized weights	0.034	0.111	0.083	0.301	0.071	0.4

Πίνακας 1.22. Κανονικοποιημένα Βάρη

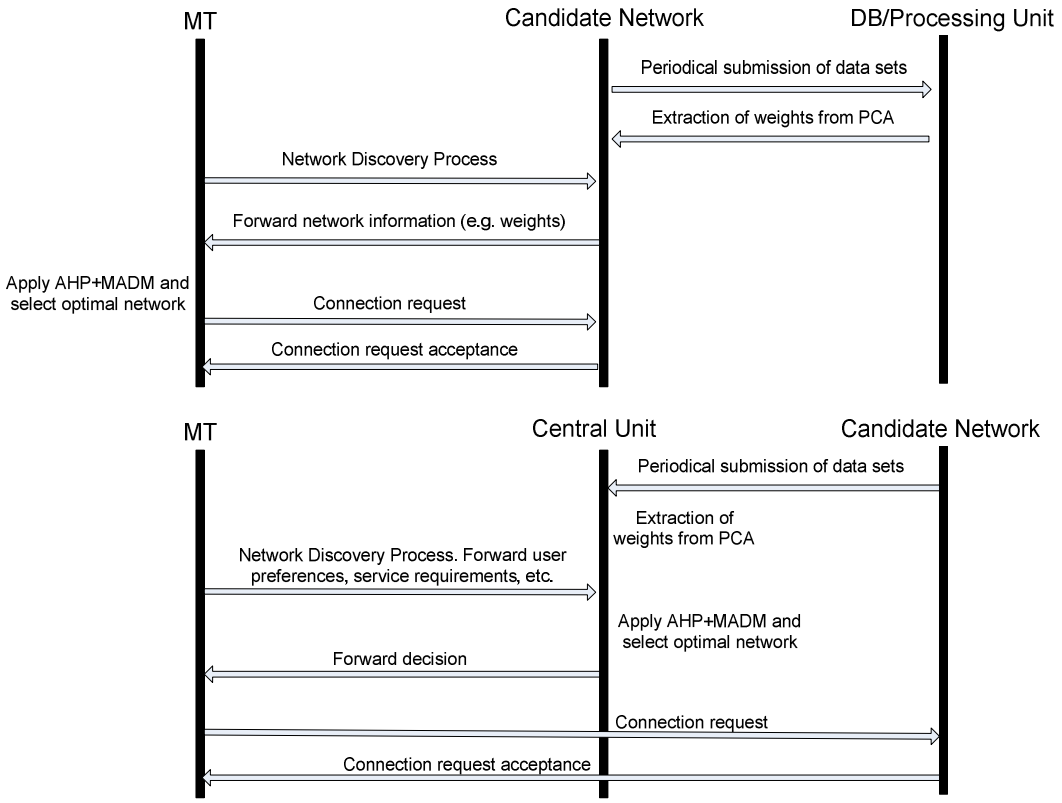


Εικόνα 1.13. Ανακατασκευή δεδομένων μέσω της PCA για Delay (X) και Utilization (Y) a. Αρχικά δεδομένα b. Τελικά δεδομένα c. Ανακατασκευασμένα δεδομένα με κυρίαρχη συνιστώσα

1.4.3.2 Αξιολόγηση της Απόδοσης του Πλαισίου

Προκειμένου να αξιολογηθεί ο προτεινόμενος αλγόριθμος πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων όπου η διαδικασία απόφασης επαναλήφθηκε για κάθε αίτηση υπηρεσίας στο δίκτυο. Τα βήματα της διαδικασίας, καθώς και η επικοινωνία μεταξύ όλων των οντοτήτων του σεναρίου προσομοίωσης απεικονίζονται στις Εικόνες 1.14α και 1.14β. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 1.14α απεικονίζει την *απο-κεντροποιημένη* αρχιτεκτονική, όπου κάθε υποψήφιο δίκτυο πρέπει να αποστείλει στο κινητό τερματικό (MT) την απαραίτητη πληροφορία ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία απόφασης. Υποθέτουμε ότι όλα τα δίκτυα καταγράφουν και αποθηκεύουν περιοδικά στατιστικές πληροφορίες για όλες τις τρέχουσες συνόδους. Μέσω της εφαρμογής της PCA κάθε δίκτυο εξάγει μια σειρά βαρών τα οποία γνωστοποιούνται στο κινητό τερματικό. Με άλλα λόγια, το πρώτο μέρος του πλαισίου εφαρμόζεται σε κάθε υποψήφιο δίκτυο, ενώ τα δύο επόμενα μέρη πραγματοποιούνται στο κινητό τερματικό. Εναλλακτικά μπορεί να υιοθετηθεί μια *κεντροποιημένη* αρχιτεκτονική (Εικόνα 1.14β) όπου και τα δίκτυα και το τερματικό υποβάλλουν πληροφορίες σε μια κεντρική οντότητα που δρα

ως διαμεσολαβητής. Στην οντότητα αυτή εκτελούνται και τα τρία μέρη του πλαισίου και το αποτέλεσμα της απόφασης προωθείται στο τερματικό.



Εικόνα 1.14. α) Απο-κεντροποιημένη αρχιτεκτονική για επιλογή δικτύου β) Κεντροποιημένη αρχιτεκτονική για επιλογή δικτύου

Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν πέντε δίκτυα 802.11b σε ns2, στα οποία πρέπει να διαμοιραστούν με βέλτιστο τρόπο εξήντα αιτήσεις υπηρεσιών, με μία τυχαία αναλογία υπηρεσιών Video Telephony και FTP. Η υπηρεσία Video Telephony μοντελοποιήθηκε ως CBR κίνηση με πακέτα των 500 bytes, ενώ η υπηρεσία FTP υλοποιήθηκε ως υπηρεσία best effort σε TCP με πακέτα μεγέθους 1500 bytes. Πρέπει να σημειωθεί ότι εκτός από τις νέες αιτήσεις το σύστημα στην αρχική του κατάσταση εξυπηρετούσε ήδη έναν αριθμό συνόδων.

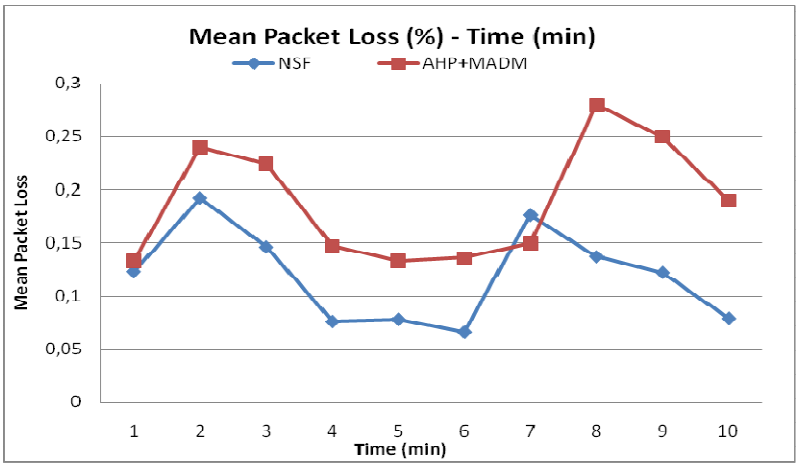
Η επιλογή δικτύου αποτελείται από τρία βήματα, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, και πραγματοποιείται με ένα script του Matlab. Με βάση την ένδειξη του αλγορίθμου οι κόμβοι συνδέονται στο καταλληλότερο δίκτυο και καταγράφονται περιοδικά οι παράμετροι QoS. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε για κάθε αίτηση υπηρεσίας, η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν 10 λεπτά και η περίοδος καταγραφής στατιστικών 60 δευτερόλεπτα. Η δυναμική φύση του αλγορίθμου αντικατοπτρίζεται από τις δύο ακόλουθες απόψεις:

- Ο πίνακας απόφασης ενημερώνεται περιοδικά ώστε να απεικονίζει αποτελεσματικά την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Η περίοδος αυτή είναι 60 δευτερόλεπτα.
- Τα σετ δεδομένων που εισάγονται στην PCA ενημερώνονται περιοδικά, γεγονός που προκαλεί τη διαφοροποίηση των βαρών και άρα τον πιο ορθό υπολογισμό τους.

Αντίθετα η χρήση μόνο της AHP και άρα των υποκειμενικών προτιμήσεων δεν είναι δυναμική, αφού δεν μπορεί να προσαρμοστεί στην τρέχουσα κατάσταση του δικτύου. Η ενημέρωση πραγματοποιείται κάθε 150 δευτερόλεπτα.

Πρέπει να διευκρινιστεί ότι οι παραπάνω περίοδοι καθορίστηκαν με βάση τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης. Σε πραγματικές εφαρμογές οι περίοδοι θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες, αλλιώς το σύστημα θα επιβαρυνθεί με υπερβολικό επιπλέον φόρτο.

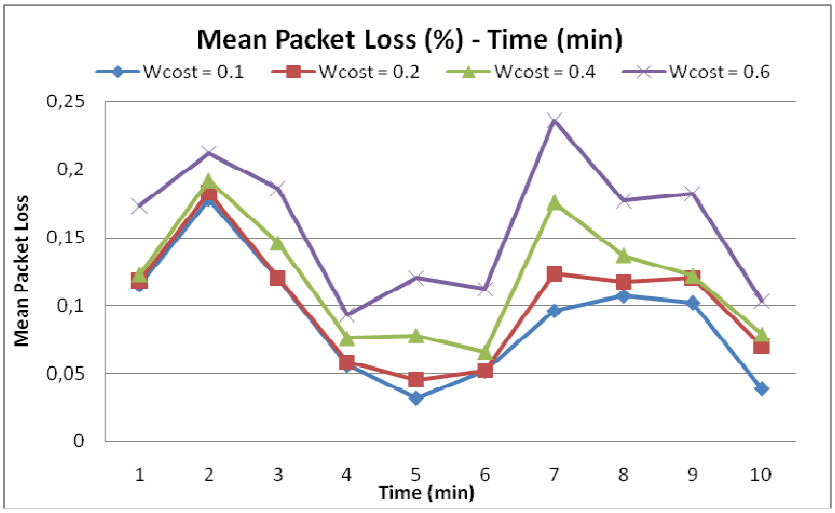
Ο στόχος της προσομοίωσης είναι να αποδείξει ότι το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί αποτελεσματικά να εξισορροπήσει την κατανομή μιας σειρά αιτήσεων υπηρεσιών σε ένα σύνολο δικτύων πρόσβασης. Η λήψη ορθής απόφασης εγγυάται τη βέλτιστη χρησιμοποίηση των πόρων του συστήματος καθώς και την αποφυγή συμφορήσεων. Η βελτίωση αντικατοπτρίζεται μέσα από την απόδοση του συστήματος ως προς το ποσοστό απολεσθέντων πακέτων. Η Εικόνα 1.15 συγκεντρώνει τα ποσοστά απωλειών πακέτων για όλες τις συνόδους που εξυπηρετούνται από κάθε δίκτυο. Η Εικόνα 1.15 επίσης καταγράφει την ίδια μετρική και για ένα εναλλακτικό σενάριο όπου εφαρμόζονται μόνο οι AHP και ELECTRE. Στην περίπτωση αυτή η σχετική βαρύτητα στην AHP είναι στατική και καθορίζεται από το σχεδιαστή του προβλήματος. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρατηρούμε ότι το UNSF επιτυγχάνει βελτιωμένη απόδοση, εξαιτίας της χρήσης της PCA και άρα των δυναμικών βαρών.



Εικόνα 1.15. Μέση Απώλεια Πακέτων για όλες τις συνόδους

Επιπλέον, μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να συζητηθεί είναι ότι το UNSF δε στοχεύει μόνο στη βελτιστοποίηση της QoS, αλλά και στη μείωση του συνολικού κόστους, αφού στο συγκεκριμένο παράδειγμα η παράμετρος Cost φέρει βαρύτητα 40%. Στην προσομοίωση το UNSF επιτυγχάνει περίπου 9% μείωση στο συνολικό κόστος από την πλευρά του χρήστη. Στη συνέχεια εξετάζουμε την απόδοση του αλγορίθμου για διαφορετικά

βάρη της παραμέτρου Cost. Η Εικόνα 1.16 δείχνει ότι όσο λιγότερο σημαντικό είναι το κόστος για τον χρήστη, τόσο υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών επιτυγχάνεται.



Εικόνα 1.16. Μέση Απώλεια Πακέτων για διαφορετικά βάρη του κόστους

1.4.3.3 Συζήτηση για την Απόδοση του Πλαισίου

Το πιο χρονοβόρο τμήμα του πλαισίου είναι αναμφισβήτητα ο υπολογισμός των βαρών: ανάλογα με τον αριθμό των βαρών και το μέγεθος των σετ δεδομένων, η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκέσει περίπου λίγα δευτερόλεπτα. Ωστόσο, δεν είναι υποχρεωτικό η διαδικασία να επαναλαμβάνεται συχνά και κατά συνέπεια δεν επηρεάζεται η απόδοση του συστήματος. Το δεύτερο βήμα της μεθόδου, δηλαδή ο συνδυασμός των PCA και AHP απαιτεί λιγότερο από 3 δευτερόλεπτα για να εκτελεστεί για τα σετ δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και τα οποία περιλαμβάνουν 500 μετρήσεις. Ο χρόνος που απαιτείται την κατάταξη, από την άλλη πλευρά, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τον αριθμό των εναλλακτικών και τη μέθοδο MADM που χρησιμοποιείται. Η ELECTRE θεωρείται ως πολύπλοκος αλγόριθμος, απαιτώντας περίπου 450ms μέχρι να επιτευχθεί η τελική κατάταξη. Αν είχαν χρησιμοποιηθεί στη θέση της η SAW ή η TOPSIS, ο χρόνος αυτός θα μειωνόταν σημαντικά (η SAW είναι η ταχύτερη μέθοδος, παρέχοντας αποτελέσματα σε λίγες εκατοντάδες milliseconds). Ωστόσο για αυτή τη μελέτη δόθηκε έμφαση στην ακρίβεια και όχι στην ταχύτητα.

Ένα μειονέκτημα του προτεινόμενου πλαισίου είναι ότι αυξάνοντας τον αριθμό των κριτηρίων ή των εναλλακτικών η διαδικασία απόφασης καταναλώνει σημαντικά περισσότερο χρόνο. Ωστόσο, ο αριθμός και των κριτηρίων και των εναλλακτικών που χρησιμοποιήσαμε σε αυτό το παράδειγμα είναι ρεαλιστικός και σε ένα σενάριο εφαρμογής σε πραγματικά δίκτυα δε θα πρέπει να διαφέρει σημαντικά. Ως μια τελευταία αξιολόγηση του πλαισίου εξετάσαμε την απόδοσή του ως προς το χρόνο εκτέλεσης για διαφορετικούς αριθμούς των κριτηρίων απόφασης. Δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή εξαρτάται και από το μέγεθος των

σετ δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην PCA, χρησιμοποιήσαμε σε όλες τις περιπτώσεις τα ίδια σετ δεδομένων, που περιλαμβάνουν 500 μετρήσεις. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνονται στον Πίνακα 1.23, δείχνοντας ότι μια αύξηση στον αριθμό των κριτηρίων, καθώς και ένα υπερβολικά μεγάλο μέγεθος των σετ δεδομένων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη διαδικασία εξαγωγής βαρών, εξαιτίας της καθυστέρησης κατά την επεξεργασία δεδομένων από την PCA.

Number of criteria	**Time required for weight extraction (PCA+AHP)**	**Time required for ranking (ELECTRE)**
3 + cost	~ 2 seconds	~ 405 ms
5 + cost	~ 3 seconds	~ 450 ms
8 + cost	~ 4.5 seconds	~ 520 ms

Πίνακας 1.23. Εξάρτηση του χρόνου απόκρισης από των αριθμό των κριτηρίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.5: ΑΠΟΦΑΣΗ ΔΙΑΠΟΜΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΚΡΙΒΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ

1.5.1 Στρατηγικές Απόφασης για Κάθετες Διαπομπές

Σε ένα περιβάλλον 4G οι κόμβοι θα μπορούν να συνδέονται συγχρόνως σε πολλαπλές τεχνολογίες πρόσβασης. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, τα συνεργαζόμενα δίκτυα θα είναι σε θέση να πραγματοποιούν κάθετες διαπομπές (vertical handovers) στις συνδέσεις χρηστών [6], με χρήση αποδοτικών και μη σύνθετων αλγορίθμων. Η απόφαση για διαπομπή αποτελεί στην ουσία ένα πρόβλημα επιλογής δικτύου, καθώς πρέπει να επιλεχθεί η πιο κατάλληλη διεπαφή για διαπομπή.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε μερικές από τις πιο διαδεδομένες στρατηγικές για απόφαση κάθετων διαπομπών. Μια αναλυτική περιγραφή των πιο σημαντικών στρατηγικών βρίσκεται στην αναφορά [34]. Γενικά διακρίνονται τα παρακάτω είδη διαπομπών:

- Στη *διαπομπή ελεγχόμενη από το δίκτυο (network controlled handover, NCHO)* η οντότητα δικτύου έχει τον πλήρη έλεγχο πάνω στην διαπομπή.
- Στη *διαπομπή ελεγχόμενη από το κινητό (mobile controlled handover, MCHO)* το κινητό τερματικό έχει τον πλήρη έλεγχο πάνω στην διαπομπή.
- Στη *διαπομπή υποβοηθούμενη από το δίκτυο (network assisted handover, NAHO)* το κινητό τερματικό λαμβάνει την απόφαση, αφού όμως συλλέξει πληροφορίες από το δίκτυο.
- Στη *διαπομπή υποβοηθούμενη από το κινητό (mobile assisted handover, MAHO)* το δίκτυο λαμβάνει την απόφαση, λαμβάνοντας όμως υπόψη πληροφορίες από το κινητό τερματικό .

Στο Κεφάλαιο αυτό προτείνεται ένα νέο σχήμα επιλογής διαπομπής υποβοηθούμενης από το δίκτυο που συνδυάζει χαρακτηριστικά επιλογής δικτύου που περιγράφηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια [35]. Ωστόσο εδώ δεν εστιάζουμε μόνο στη διαδικασία της επιλογής, αλλά εισάγουμε μια νέα λειτουργικότητα που μπορεί να υλοποιηθεί από τα υποψήφια δίκτυα προκειμένου να μεγιστοποιήσουν το συμφέρον τους και παράλληλα να επιτευχθεί διαφοροποίηση των υπηρεσιών. Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε τα δίκτυα ως λογικές οντότητες χρησιμοποιούμε τη θεωρία παιγνίων και πιο συγκεκριμένα την έννοια των δημοπρασιών. Τα παραπάνω περιγράφονται πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2.1 της παρούσης διατριβής. Στην πλευρά του τερματικού αντικαθιστούμε ωστόσο τη λειτουργία της δημοπρασίας μέσω συναρτήσεων ωφέλειας με μια ασαφή πολυκριτηριακή μέθοδο αποφάσεων που λαμβάνει ως είσοδο τις προσφορές των δικτύων. Στη συνέχεια

κατηγοριοποιούμε τους υπάρχοντες αλγόριθμους ανάλογα με τις μεθόδους που χρησιμοποιούν και αναφέρουμε ενδεικτικές προσεγγίσεις από τη διεθνή βιβλιογραφία:

- *Στρατηγικές που Βασίζονται σε Συναρτήσεις Ωφέλειας:*

  Η συνάρτηση ωφέλειας για απόφαση κάθετης διαπομπής είναι μια εκτίμηση του οφέλους που θα προκύψει από τη μετάβαση σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Είναι βασικά το άθροισμα σταθμισμένων συναρτήσεων ορισμένων παραμέτρων, οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την υλοποίηση. Ο Chen [36] χρησιμοποιεί μια συνάρτηση ωφέλειας για αξιολόγηση των διαθέσιμων δικτύων με παραμέτρους το εύρος ζώνης και την ταχύτητα κίνησης. Προτείνονται δύο μέθοδοι απόφασης διαπομπής, προσαρμόζοντας την περίοδο ευστάθειας ανάλογα με τους πόρους του δικτύου και τις τρέχουσες εφαρμογές στο τερματικό. Άλλες εφαρμογές χρησιμοποιούν συναρτήσεις κόστους, οι οποίες μετρούν το κόστος της διαπομπής. Σε αυτές τις προσεγγίσεις επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους.

- *Στρατηγικές που Βασίζονται σε MADM:*

  Όπως έχει ήδη περιγραφεί, οι μέθοδοι MADM μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την εξαγωγή βαρών είτε για την κατάταξη των διαθέσιμων δικτύων. Μια αναλυτική περιγραφή των πιο διαδεδομένων από αυτές βρίσκεται στο Κεφάλαιο 1.2, ενώ μερικά παραδείγματα εφαρμογής τους βρίσκονται στις αναφορές [10][16][37]. Παραδείγματα προσαρμοστικών σχημάτων που υιοθετούν ασαφείς μεθόδους MADM, όπως οι Fuzzy AHP και Fuzzy TOPSIS μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [10][16][27][38].

- *Στρατηγικές που Βασίζονται σε Ασαφή Λογική:*

  Η χρησιμότητα της ασαφούς λογικής στα πλαίσια της επιλογής δικτύου αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1.1 και πηγάζει από την αδυναμία μέτρησης των προβλημάτων μετάδοσης (όπως καθυστέρηση και απώλεια πακέτων) πριν πραγματοποιηθεί μια διαπομπή. Αντίθετα, μόνο περιορισμένες πληροφορίες, όπως ο σηματοθορυβικός λόγος SNR ή το διαθέσιμο εύρος ζώνης μπορεί να είναι γνωστές εκ των προτέρων [10]. Στην αναφορά [39] προτείνεται μια λύση που βασίζεται σε ασαφή λογική και θεωρεί ως κριτήρια το χαμηλό κόστος, το καλό RSS, το βέλτιστο εύρος ζώνης, την χαμηλή καθυστέρηση, την υψηλή αξιοπιστία και τη μπαταρία διαρκείας.

- *Στρατηγικές που Βασίζονται σε Νευρωνικά Δίκτυα:*

  Στην αναφορά [40] περιγράφεται ένας αλγόριθμος κάθετης διαπομπής βασιζόμενος σε Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks, NN). Τα τελευταία μπορούν να συνδυαστούν με την ασαφή λογική, για παράδειγμα υιοθετώντας Συστήματα Ασαφούς Λογικής. Τα συστήματα αυτά επεξηγούνται στο Κεφάλαιο 3.2 της παρούσης διατριβής.

- *Στρατηγικές που Βασίζονται σε Θεωρία Παιγνίων:*

Η θεωρία παιγνίων έχει ευρεία εφαρμογή σε προβλήματα επιλογής δικτύων. Στο Κεφάλαιο 2.5 παρουσιάζεται μια υλοποίηση της εφαρμογής παιγνίων στο πρόβλημα επιλογής δικτύου για πραγματοποίηση διαπομπής. Στην αναφορά [41] προτείνεται ένας μηχανισμός επιλογής δικτύου που ενσωματώνει θεωρία παιγνίων και συστήματα φήμης.

1.5.2 Προτεινόμενη Στρατηγική για Απόφαση Διαπομπής

1.5.2.1 Κριτήρια Απόφασης

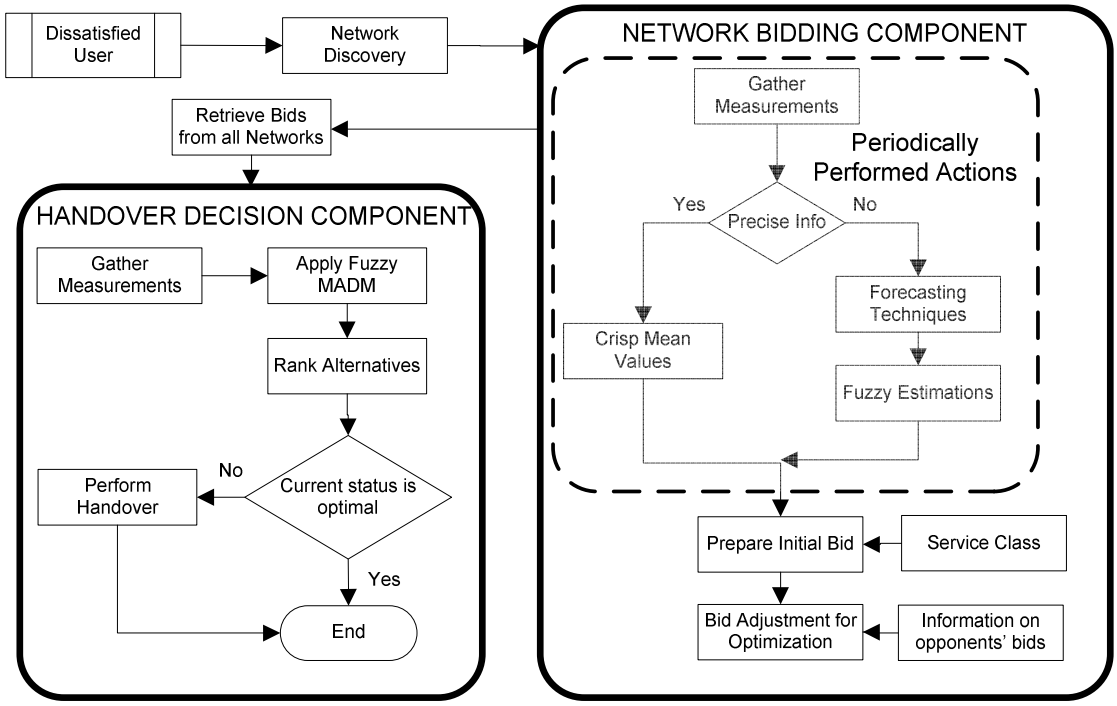
Στο Κεφάλαιο 1.1 της διατριβής εξετάστηκαν τα πιο διαδεδομένα κριτήρια απόφασης και έγινε μια κατηγοριοποίησή τους. Για αυτή τη μελέτη επιλέχθηκαν μετρικές που αφορούν τα δίκτυα, με την προϋπόθεση ότι ο χρήστης του τερματικού μπορεί μέσω κατάλληλης διεπαφής να προσαρμόσει τα βάρη τους. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπουμε στο χρήστη να επηρεάσει τη διαδικασία της απόφασης. Πιο συγκεκριμένα τα τέσσερα κριτήρια που εξετάζουμε είναι τα Received Signal Strength (RSS), Available Rate (AR), Packet Loss Rate (PLR) και Price per Bandwidth Unit (PBU). Όσον αφορά την κανονικοποίηση, τα RSS και AR κανονικοποιούνται ως larger-the-better, ενώ τα PLR και PBU ως smaller-the-better. Υποθέτουμε επιπλέον ότι τα δίκτυα μπορούν να εγγυηθούν μια τιμή του AR, συνεπώς το θεωρούμε, μαζί με το PBU, ως αντικειμενικά κριτήρια. Από την άλλη πλευρά, τα δίκτυα μπορούν να παρέχουν μόνο εκτιμήσεις για τα RSS και PLR, συνεπώς αυτά θα αναπαρίστανται με ασαφείς αριθμούς.

1.5.2.2 Αλγόριθμος Απόφασης Διαπομπής

Θεωρούμε μια περιοχή R που καλύπτεται από διάφορες τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης, υποθέτοντας ότι οι χρήστες μπορούν να συνδεθούν με οποιαδήποτε από αυτές. Όταν ένας χρήστης είναι δυσαρεστημένος με το επίπεδο QoS που λαμβάνει, τότε είναι ελεύθερος να αναζητήσει εναλλακτικά σημεία πρόσβασης και να πραγματοποιήσει διαπομπή. Για τη μελέτη αυτή υποθέτουμε ότι ο χρήστης είναι δυσαρεστημένος, χωρίς να εξετάζουμε τα αίτια της δυσαρέσκειας.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.17, το προτεινόμενο σχήμα αποτελείται από δύο στοιχεία: το *Στοιχείο Πλειοδοσίας Δικτύων (Network Bidding Component - NBC)* και το *Στοιχείο Απόφασης Διαπομπής (Handover Decision Component - HDC).* Το πρώτο περιγράφει τις λειτουργίες που πραγματοποιούνται από κάθε οντότητα δικτύου αφότου εκκινείται η διαδικασία ανακάλυψης δικτύων. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία, τα δίκτυα πρέπει αρχικά να συγκεντρώσουν τιμές για όλα τα κριτήρια απόφασης, οι οποίες μπορεί να είναι είτε καθαροί είτε ασαφείς αριθμοί, ανάλογα με το αν το κριτήριο είναι υποκειμενικό ή αντικειμενικό. Οι ασαφείς αριθμοί προκύπτουν από την εφαρμογή τεχνικών προβλέψεων

(forecasting techniques), οι οποίες παρέχουν ρεαλιστικές εκτιμήσεις. Τέλος, τα δίκτυα πλειοδοτούν σύμφωνα με τις αρχές της θεωρίας δημοπρασιών. Οι πλειοδοσίες επηρεάζονται επιπλέον από τα χαρακτηριστικά της αίτησης υπηρεσίας. Μέσα από τη διαδικασία των δημοπρασιών επιτρέπουμε στα δίκτυα να δρουν ως λογικές οντότητες που ανταγωνίζονται για αιτήσεις υπηρεσιών κατά τα δικά τους συμφέροντα.



Εικόνα 1.17. Προτεινόμενη στρατηγική για απόφαση διαπομπής

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.17, ορισμένες από τις λειτουργίες του NBC μπορούν να υλοποιούνται περιοδικά αντί για κάθε φορά που εκκινείται η διαδικασία ανακάλυψης δικτύων, ώστε να μειωθεί ο χρόνος απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, συλλέγονται μετρήσεις και υπολογίζονται εκτιμήσεις περιοδικά, αφού αυτές οι λειτουργίες είναι και οι πιο χρονοβόρες. Με τον τρόπο αυτό, κατά την αναζήτηση διαθέσιμων δικτύων, τα δίκτυα διαθέτουν ήδη την απαιτούμενη πληροφορία προκειμένου να πλειοδοτήσουν. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι τα δίκτυα είναι πλήρως ενήμερα για την κατάστασή τους και συνεπώς μπορούν να ετοιμάσουν αξιόπιστες προσφορές, με την προϋπόθεση φυσικά ότι η περίοδος είναι αρκετά μικρή.

Το δεύτερο στοιχείο περιλαμβάνει τις λειτουργίες που πραγματοποιούνται από το κινητό τερματικό μέχρι να λάβει μια απόφαση. Όλα τα υποψήφια δίκτυα, συμπεριλαμβανομένου του ήδη επιλεγμένου, αξιολογούνται μέσα από μια ασαφή μέθοδο πολυκριτηριακής απόφασης, στην περίπτωσή μας την Fuzzy TOPSIS (Fuzzy Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Συμπεριλαμβάνοντας το ήδη χρησιμοποιούμενο δίκτυο στη διαδικασία αξιολόγησης ως υποψήφια λύση, μπορούμε εύκολα να συγκρίνουμε την

ανωτερότητά (ή κατωτερότητά) του σε σχέση με τις υπόλοιπες εναλλακτικές. Η διαπομπή πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση που βρεθεί δίκτυο με καλύτερη κατάταξη από αυτή του τωρινού δικτύου.

Στην Ενότητα 1.5.3 επεξηγείται η λειτουργία του NBC. Όσον αφορά το HDC, η εφαρμογή της Fuzzy TOPSIS έχει ήδη περιγραφεί στην Ενότητα 1.2.8.

1.5.2.3 Καινοτομία και Πλεονεκτήματα

Οι κυριότερες καινοτομίες του προτεινόμενου αλγορίθμου συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Η αβεβαιότητα που είναι έμφυτη στα προβλήματα αποφάσεων εξαιτίας της υποκειμενικότητας του λήπτη αποφάσεων αντιμετωπίζεται μέσα από τη χρήση των μεθόδων Fuzzy MADM.
- Οι τεχνικές προβλέψεων παρέχουν πιο ακριβείς εκτιμήσεις σε σχέση με τη χρησιμοποίηση μέσων τιμών. Οι εκτιμήσεις εκφράζονται στη μορφή ασαφών αριθμών για να αντικατοπτρίζουν την έλλειψη ακρίβειας, αφού το δίκτυο δεν μπορεί να εγγυηθεί συγκεκριμένες απαιτήσεις μετάδοσης, πριν πραγματοποιηθεί η διαπομπή.
- Η προσέγγιση αυτή βελτιώνεται περαιτέρω με τη χρήση δημοπρασιών, που χρησιμοποιούνται σε αρκετά προβλήματα θεωρίας παιγνίων, εξαιτίας της ανάγκης των δικτύων να παράσχουν το ακριβές ποσό των πόρων που χρειάζεται ώστε να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους.
- Χρησιμοποιώντας ασαφή λογική αντί για καθαρούς αριθμούς αποφεύγουμε το φαινόμενο *ping pong*. Στα ασύρματα δίκτυα το φαινόμενο αυτό αναφέρεται στη διαρκή επανάληψη διαπομπών ανάμεσα στα ίδια σημεία πρόσβασης, που οδηγεί σε απώλεια πόρων. Μικρές βελτιώσεις στις τιμές των κριτηρίων απόφασης δεν μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την κατάταξη των δικτύων και κατά συνέπεια διαπομπές πραγματοποιούνται μόνο αν παρατηρηθεί αξιοσημείωτη διαφορά στις πλειοδοσίες.
- Η απόφαση μπορεί να επηρεαστεί από τις προτιμήσεις του χρήστη. Υποθέτουμε ότι ο χρήστης θα μπορεί να επιλέξει μέσα από ένα κατάλληλο μενού στη συσκευή του επιλογές όπως «Προτίμησε πάντα το φθηνότερο δίκτυο» ή «Προτίμησε το πιο αξιόπιστο δίκτυο», κτλ. Οι προτιμήσεις αυτές μεταφράζονται σε βάρη παραμέτρων. Η δυνατότητα αυτή είναι κρίσιμη για τα δίκτυα 4G, αφού κάθε χρήστης έχει τις δικές του μοναδικές απαιτήσεις [42].

1.5.3 Στοιχείο Πλειοδοσίας Δικτύων

1.5.3.1 Προβλέψεις και Ασαφείς Εκτιμήσεις

Όπως επεξηγήθηκε προηγουμένως, τα δίκτυα μπορεί γενικά να δύνανται να ποσοτικοποιήσουν ορισμένες μετρικές απόδοσης. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις η ακρίβεια των εκτιμήσεων δεν είναι εγγυημένη. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούμε τεχνικές προβλέψεων, οι οποίες μπορούν να εντοπίσουν μοτίβα στα δεδομένα και να παράσχουν εκτιμήσεις με βάση αυτά τα μοτίβα. Η πρόβλεψη δεδομένων μπορεί να εφαρμοστεί για να εκτιμήσει μελλοντικές τιμές με βάση την ιστορία των δεδομένων. Για παράδειγμα, ανάλογα με την ώρα της ημέρας και το μοτίβο χρησιμοποίησης, πολλές μετρικές QoS, όπως το ποσοστό χρησιμοποίησης ενός hotspot, μπορούν να προβλεφτούν μέχρις ενός βαθμού. Τυπικά οι προβλεπόμενες τιμές απεικονίζονται με τη μορφή χρονοσειρών, δηλαδή παρατηρημένων δεδομένων διατεταγμένα στο χρόνο.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι χρονοσειρών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως οι Moving Averages (MA), Weighted Moving Averages (WMA), Exponential smoothing (ES), Regression, κτλ. Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου έγκειται στο σχεδιαστή της λύσης και εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη σταθερότητα του υπό εξέταση συστήματος. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιούμε τη μέθοδο WMA, αφού προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς σημαντικό υπολογιστικό φόρτο. Ο σταθμισμένος κινούμενος μέσος όρος δίνεται ως [11]

$$\mathrm{WMA}_{n+1} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (w_{n-i} \cdot V_{n-i})}{n}, \sum_{i=0}^{n-1} w_i = 1 \tag{1.29}$$

όπου n είναι η ακολουθία της τελευταίας ανακτηθείσας τιμής, V_i είναι η μετρούμενη τιμή με ακολουθία i και w_i είναι το βάρος που ανατίθεται στην τιμή αυτή. Εξαιτίας της τεχνικής πρόβλεψης που χρησιμοποιείται, προκύπτουν μη καθαροί αριθμοί που απεικονίζονται ως τριγωνικοί ασαφείς αριθμοί με τη μορφή (l, m, u). Περισσότερες πληροφορίες για τους ασαφείς αριθμούς βρίσκονται στο Κεφάλαιο 3.1 της παρούσης διατριβής.

1.5.3.2 Πολυκριτηριακές Δημοπρασίες

Οι δημοπρασίες είναι ένας οικονομικός μηχανισμός για τον καθορισμό της τιμής ενός αντικειμένου. Σε μια τυπική δημοπρασία ο πωλητής λαμβάνει διαφορετικές προσφορές (bids) από τους αγοραστές και η καλύτερη κερδίζει το αντικείμενο προς πώληση. Οι πολυκριτηριακές δημοπρασίες επιτρέπουν διαπραγμάτευση πάνω σε κριτήρια και χαρακτηριστικά διάφορα της τιμής [43]. Σε τέτοιες δημοπρασίες ο πωλητής πρέπει να ικανοποιήσει μια σειρά απαιτήσεων του πωλητή, οι οποίες μπορεί να αφορούν διάφορα κριτήρια του αντικειμένου. Το διάνυσμα κριτηρίων που περιγράφει ένα αντικείμενο που

δημοπρατείται είναι *n*-διάστατο, όπου κάθε διάσταση $\theta_k \in \theta$ αναπαριστά τις προτιμήσεις του χρήστη για διάφορα κριτήρια. Η προσφορά τότε συμβολίζεται ως *b = (θ, π),* όπου *π* συμβολίζει την τιμή.

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται συνοπτικά ο μηχανισμός πλειοδοσίας. Στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση παιγνίων με δημοπρασίες οι αγοραστές αντιστοιχούν στα κινητά τερματικά, ενώ οι πωλητές/πλειοδότες στα υποψήφια δίκτυα μέσα σε μια περιοχή κάλυψης. Ως αντικείμενο πλειοδοσίας θεωρούνται τα ζητούμενα κριτήρια (RSS, AR, PLR, PBU), ενώ ως στρατηγική θεωρείται η προσφορά που καταβάλλει ο πωλητής.

Τα υποψήφια δίκτυα υπολογίζουν τις προσφορές αφού λάβουν την αίτηση υπηρεσίας από ένα κινητό τερματικό. Για ένα συγκεκριμένο διάνυσμα κριτηρίων θ η προσφορά του δικτύου cn_i δίνεται από την πλειάδα $b_{cn_i}(\theta) = (\theta, \pi_{cn_i})$,όπου π_{cn_i} είναι η τιμή ανά μονάδα εύρους ζώνης. Υποθέτοντας ότι με $a_i(\theta_k)$ συμβολίζουμε την τιμή που προσφέρεται στο κριτήριο θ_κ για το δίκτυο *i*, οι προσφορές από *n* υποψήφια δίκτυα αναπαρίστανται σε έναν πίνακα της ακόλουθης μορφής

$$b_{cn}(\theta) = \begin{bmatrix} a_1(\theta_1) & a_1(\theta_2) & \cdots & a_1(\theta_k) & \pi_{cn_1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_n(\theta_1) & a_n(\theta_2) & \cdots & a_n(\theta_k) & \pi_{cn_n} \end{bmatrix}$$

Ανάλογα με τα εκάστοτε κριτήρια που εξετάζονται διαμορφώνεται αντίστοιχα ο παραπάνω πίνακας. Για το συγκεκριμένο σύστημα αποκτά τη μορφή

$$b_{cn} = \begin{bmatrix} RSS_1 & AR_1 & PLR_1 & PBU_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ RSS_n & AR_n & PLR_n & PBU_n \end{bmatrix}$$

1.5.3.3 Κλάσεις Υπηρεσιών και Προσφορές

Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, η προσφορά του δικτύου cn_i είναι της μορφής $b_{cn_i}(\theta) = (\theta, \pi_{cn_i})$. Η τιμή είναι ανά μονάδα εύρους ζώνης και υποτίθεται ότι είναι σταθερή ανά δίκτυο και κλάση υπηρεσιών. Κάθε δίκτυο επομένως πρέπει να πλειοδοτήσει για τις απαιτήσεις του χρήστη όσον αφορά το κριτήριο θ_k και η προσφορά αυτή συμβολίζεται ως $r(\theta_k)$. Οι προσφορές βασίζονται στις τιμές που είτε έχουν μετρηθεί είτε προβλεφτεί. Συμβολίζουμε με $m(\theta_k)$ την τιμή που μπορεί να προσφερθεί από το δίκτυο cn_i. Επιπλέον, εισάγουμε ένα κατώφλι τιμών $m_o(\theta_k)$ για κάθε κριτήριο που αποτελεί μια ελάχιστη κατάλληλη προσφορά που είναι πάντα χειρότερη από το $r(\theta_k)$ (μεγαλύτερη τιμή για αρνητικά κριτήρια, χαμηλότερη για θετικά). Ο λόγος για την ύπαρξη αυτού του κατωφλίου είναι η εξασφάλιση ότι οι bronze class χρήστες θα λαμβάνουν πάντα λιγότερους πόρους από

τους silver class. Η τιμή του κατωφλίου μπορεί να καθοριστεί για κάθε δίκτυο από στατιστικά δεδομένα παρελθοντικών συνόδων, προηγούμενων δημοπρασιών, κτλ.

Service Class	**Attribute Bid** ($b_{cn}(\theta_k)$)	**Price**
Bronze	$\min(m(\theta_k), m_o(\theta_k))$ for positive $\max(m(\theta_k), m_o(\theta_k))$ for negative	$\pi_{cn_i,bronze}$
Silver	$\min(m(\theta_k), r(\theta_k))$ for positive $\max(m(\theta_k), r(\theta_k))$ for negative	$\pi_{cn_i,silver}$
Gold	$\max(m(\theta_k), r(\theta_k))$ for positive $\min(m(\theta_k), r(\theta_k))$ for negative	$\pi_{cn_i,gold}$
Primary	$\max(m(\theta_k), r(\theta_k))$ for positive $\min(m(\theta_k), r(\theta_k))$ for negative	0

Πίνακας 1.24. Κλάσεις Υπηρεσιών και Προσφορές

Τα δίκτυα ετοιμάζουν τις αρχικές προσφορές τους σύμφωνα με την κλάση της ζητούμενης υπηρεσίας, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 1.24. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές $m(\theta)$ αναφέρονται μόνο στο συγκεκριμένο τύπο υπηρεσίας και εξάγονται όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 1.1. Η δεύτερη στήλη του Πίνακα 1.24 δείχνει πώς υπολογίζεται η αρχική προσφορά $b_{cn}(\theta_k)$. Οι προσφορές εξαρτώνται από το αν το εξεταζόμενο κριτήριο είναι θετικό (στην περίπτωσή μας τα RSS και AR) ή αρνητικό (PLR and PU).

Ένα από τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι ότι τα υποψήφια δίκτυα δεν υποχρεούνται να προσφέρουν το σύνολο των διαθέσιμων πόρων τους, αλλά μόνο εκείνο το ποσό που μεγιστοποιεί το εισόδημά τους. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί διαφοροποίηση υπηρεσιών, αφού τα δίκτυα προσφέρουν περισσότερους πόρους σε αιτήσεις υψηλών κλάσεων. Επιπλέον, οι κλήσεις ανάγκης θεωρούνται υψίστης προτεραιότητας (Primary class) και για το λόγο αυτό λαμβάνουν πάντα τις καλύτερες προσφορές με μηδενική χρέωση.

1.5.3.4 Βελτιστοποίηση και Προσαρμογή Προσφορών

Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης θεωρούμε τα υποψήφια δίκτυα ως λογικές οντότητες που μπορούν να προσαρμόσουν τις προσφορές τους ώστε να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους. Για το σκοπό αυτό πρέπει αρχικά να διατυπωθεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση ωφέλειας που προτείνεται στην αναφορά [44] για να υπολογίσουμε την ωφέλεια ενός δικτύου ως

$$U_{cn_i}(\theta, b_{cn_i}(\theta)) = \begin{cases} \theta\pi_{cn_i} - \sum_{k\in\theta} c_{cn_i}(\theta_k) & ,\text{if } N_i < b_{cn_i}(\theta) \\ 0 & ,\text{if } N_i > b_{cn_i}(\theta) \\ \lambda\theta\pi_{cn_i} - \sum_{k\in\theta} c_{cn_i}(\theta_k) & ,\text{if } N_i = b_{cn_i}(\theta) \end{cases} \tag{1.30}$$

όπου $c_{cn_i}(\theta_k)$ είναι το κόστος που επιβάλλεται στον πάροχο του δικτύου για την τιμή ενός κριτηρίου, $\sum_{k\in\theta} c_{cn_i}(\theta_k)$ είναι η τιμή κράτησης για κάθε υπηρεσία, $\lambda \in [0,1]$ είναι ένας συντελεστής μετατροπής και N_i είναι η καλύτερη κατάλληλη προσφορά αν το υποψήφιο δίκτυο cn_i δεν συμμετάσχει στο παίγνιο δημοπρασιών

$$N_i = \max_{\{cn_j \neq cn_i\}} b_{cn_j}(\theta, \pi_{cn_j}) \tag{1.31}$$

Ένα πρωτόκολλο δημοπρασιών είναι αποδοτικό κατά Pareto όταν το σύνολο των ωφελειών όλων των συμμετεχόντων (συμπεριλαμβανομένης αυτής του αγοραστή) μεγιστοποιείται σε μια ισορροπία κυρίαρχης στρατηγικής. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η συγκεκριμένη δημοπρασία μπορεί να λυθεί πάντα μέσω στρατηγικών κατά τις οποίες ο πλειοδότης μεγιστοποιεί την ωφέλειά του (εξίσωση (1.32)) πλειοδοτώντας ειλικρινά [44][45]. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην προτεινόμενη προσέγγιση η απόδοση του αγοραστή, δηλαδή του κινητού τερματικού, δεν υπολογίζεται από συνάρτηση χρησιμότητας αλλά με τη χρήση μεθόδων MADM για κατάταξη.

Προκειμένου να υπολογιστεί η ωφέλεια κάθε δίκτυο πρέπει πρώτα να αποφασίσει μια αρχική προσφορά $b_{cn_i}(\theta)$ για όλα τα κριτήρια. Η προσφορά αυτή μπορεί στη συνέχεια να προσαρμοστεί ανάλογα με τις προσφορές των υπόλοιπων παικτών, ώστε να μεγιστοποιηθεί η εκτιμώμενη απόδοση του δικτύου. Αυτό προϋποθέτει ότι είναι διαθέσιμη η πληροφορία σχετικά με τις προσφορές όλων των παικτών, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί με την παραδοχή ότι το τερματικό εκπέμπει σε όλα τα υποψήφια δίκτυα όλες τις ληφθείσες προσφορές. Εναλλακτικά θα μπορούσε να θεωρηθεί μια κεντροποιημένη αρχιτεκτονική όπου μια κεντρική οντότητα αναλαμβάνει το ρόλο να συγκεντρώνει και εκπέμπει τις προσφορές ώστε να προσαρμοστούν και τελικά να αποσταλούν στο κινητό τερματικό. Με άλλα λόγια, το πρόβλημα βελτιστοποίησης εκφράζεται ως

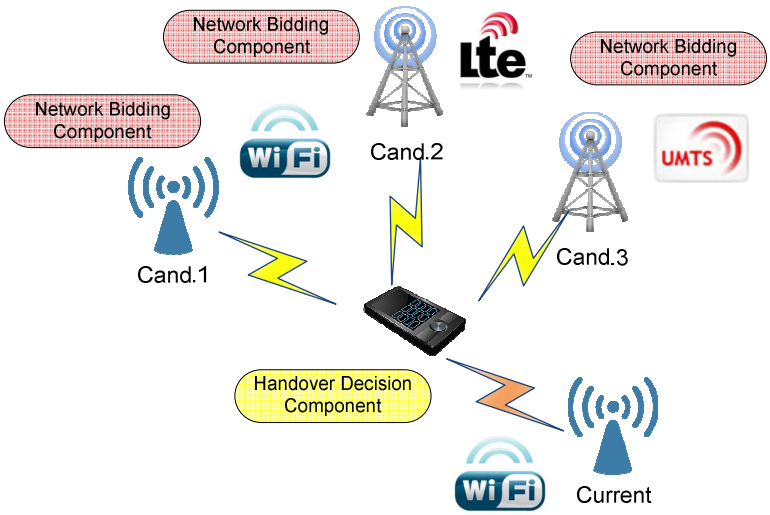
$$b^{adj}_{cn_i}(\theta) : \max U_{cn_i}(\theta, b^{adj}_{cn_i}(\theta)) \tag{1.32}$$

Το παίγνιο αυτό εγγυάται λύση, αφού τα τερματικά θα μπορούν πάντα να επιλέξουν ένα δίκτυο, ακόμη κι αν είναι αυτό που χρησιμοποιείται εκείνη τη στιγμή. Επιπλέον, ακόμη κι αν όλα τα υποψήφια δίκτυα δώσουν μη ικανοποιητικές προσφορές, τότε το τερματικό μπορεί να επαναλάβει τη διαδικασία διαπραγμάτευσης με χαμηλότερες απαιτήσεις σε πόρους.

1.5.4 Αξιολόγηση Προτεινόμενης Στρατηγικής

1.5.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης

Στο σενάριο προσομοίωσης θεωρούμε τέσσερα δίκτυα πρόσβασης που συνυπάρχουν στην ίδια περιοχή: LTE, UMTS, WiFi A και WiFi B. Το σενάριο απεικονίζεται στην Εικόνα 1.18.



Εικόνα 1.18. Σενάριο προσομοίωσης ετερογενών δικτύων

1.5.4.2 Αριθμητικό Παράδειγμα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ένα μικρό αριθμητικό παράδειγμα προκειμένου να επεξηγηθεί το πώς εφαρμόζεται η προτεινόμενη στρατηγική κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Υποτίθεται ότι το κινητό τερματικό είναι αρχικά συνδεδεμένο με το δίκτυο WiFi A, το οποίο συνεπώς θεωρείται ως το ενεργό δίκτυο. Για τους σκοπούς αυτού του παραδείγματος θεωρούμε έναν χρήστη κλάσης Silver που αιτείται την υπηρεσία Τηλεφωνίας. Οι απαιτούμενες τιμές για αυτήν την υπηρεσία υποθέτουμε ότι είναι RSS = -80dBm, AR = 384kbps και PLR $1.5 \cdot 10^{-5}$.

Ο Πίνακας 1.25 συγκεντρώνει τις μετρήσεις / προβλέψεις για τα τρία υποψήφια δίκτυα. Οι τιμές αυτές έχουν εξαχθεί σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.5.3.1. Τα δίκτυα (συμπεριλαμβανομένου του ενεργού), προετοιμάζουν τις προσφορές τους σύμφωνα με τον Πίνακα 1.24 και την εξίσωση (1.30). Οι προσφορές απεικονίζονται στον Πίνακα 1.26, που αποτελεί τον πίνακα απόφασης που κατασκευάζεται στο Στοιχείο Απόφασης Διαπομπής.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται ο κανονικοποιημένος και σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης, όπως περιγράφεται στην Ενότητα 1.2.8. Τα βάρη για όλα τα κριτήρια θεωρούνται γνωστά εκ των προτέρων ως w_{RSS} = (0.2, 0.35, 0.45), w_{AR} = (0.5, 0.55, 0.6), w_{PLR} = (0.1, 0.15, 0.2) και w_{PBU} = (0.2, 0.3, 0.4). Τέλος, υπολογίζεται ο δείκτης εγγύτητας (εξίσωση (1.22)) και πραγματοποιείται η κατάταξη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.29. Στον πίνακα αυτό φαίνονται επίσης οι ιδανικά θετική και αρνητική λύση.

Σύμφωνα με τον πίνακα, το LTE έχει την υψηλότερη κατάταξη ενώ το ενεργό δίκτυο (WiFi A) έχει τη χαμηλότερη. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος απόφασης διαπομπής υποδεικνύει αρχικά ότι μια διαπομπή θα ωφελήσει το χρήστη και επιπλέον ότι η

καταλληλότερη επιλογή είναι το δίκτυο LTE. Δεδομένου ότι στο συγκεκριμένο παράδειγμα η παράμετρος PBU έχει ιδιαίτερα υψηλό βάρος και ότι το LTE έχει το χαμηλότερο κόστος, η επιλογή του ως βέλτιστο δίκτυο είναι δικαιολογημένη, παρόλο που η απόδοσή του στα υπόλοιπα κριτήρια δεν είναι η βέλτιστη.

	RSS (dBm)	**AR (kbps)**	**PLR($\cdot 10^{-5}$)**	**PBU (mon.unit)**
LTE	(-88.1,-85,-82.7)	380	(0.97,1.3,2)	0.02
UMTS	(-80.2,-78.6,-77.4)	390	(1,2,2.6)	0.022
WiFi B	(-79.4,-78.3,-77.9)	383	(1,1.2,1.6)	0.025

Πίνακας 1.25. Μετρήσεις των υποψήφιων δικτύων

	RSS (dBm)	**AR (kbps)**	**PLR($\cdot 10^{-5}$)**	**PBU (mon.unit)**
WiFi A	(-81.9,-80.8,-80.2)	367	(1.6,1.65,1.72)	0,028
LTE	(-88.1,-85,-82.7)	380	(1.5,1.5,2)	0.02
UMTS	(-80.2,-80,-80)	384	(1.5,2,2.6)	0.022
WiFi B	(-80,-80,-80)	383	(1,5.1.5,1.6)	0.025

Πίνακας 1.26. Πλειοδοσίες δικτύων (πίνακας απόφασης)

	RSS	**AR**	**PLR**	**PBU**
WiFi A	(1.024,1.01,1.003)	0.956	(1.872,0.909,0.938)	0.714
LTE	(1.101,1.063,1.034)	0.99	(0.75,1,1)	1
UMTS	(1.003,1,1)	1	(0.567,0.75,1)	0.909
WiFi B	(1,1,1)	0.997	(0.936,1,1)	0.8

Πίνακας 1.27. Κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης

	RSS	**AR**	**PLR**	**PBU**
WiFi A	(0.21,0.350.45)	(0.47,0.53,0.57)	(0.09,0.14,0.19)	(0.14,0.21,0.29)
LTE	(0.22,0.37,0.47)	(0.5,0.54,0.59)	(0.08,0.15,0.2)	(0.2,0.3,0.4)
UMTS	(0.2,0.35,0.45)	(0.5,0.55,0.6)	(0.06,0.11,0.2)	(0.18,0.27,0.36)
WiFi B	(0.2,0.35,.0.45)	(0.5,0.55,0.6)	(0.09,0.15,0.2)	(0.16,0.24,0.32)

Πίνακας 1.28. Σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας απόφασης

	d_i^+	d_i^-	CC_i	**Ranking**
WiFi A	2.8	1.24	0.31	4
LTE	2.68	1.37	0.34	1
UMTS	2.74	1.32	0.33	2
WiFi B	2.74	1.3	0.32	3

Πίνακας 1.29. Δείκτες εγγύτητας και κατάταξη

1.5.4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

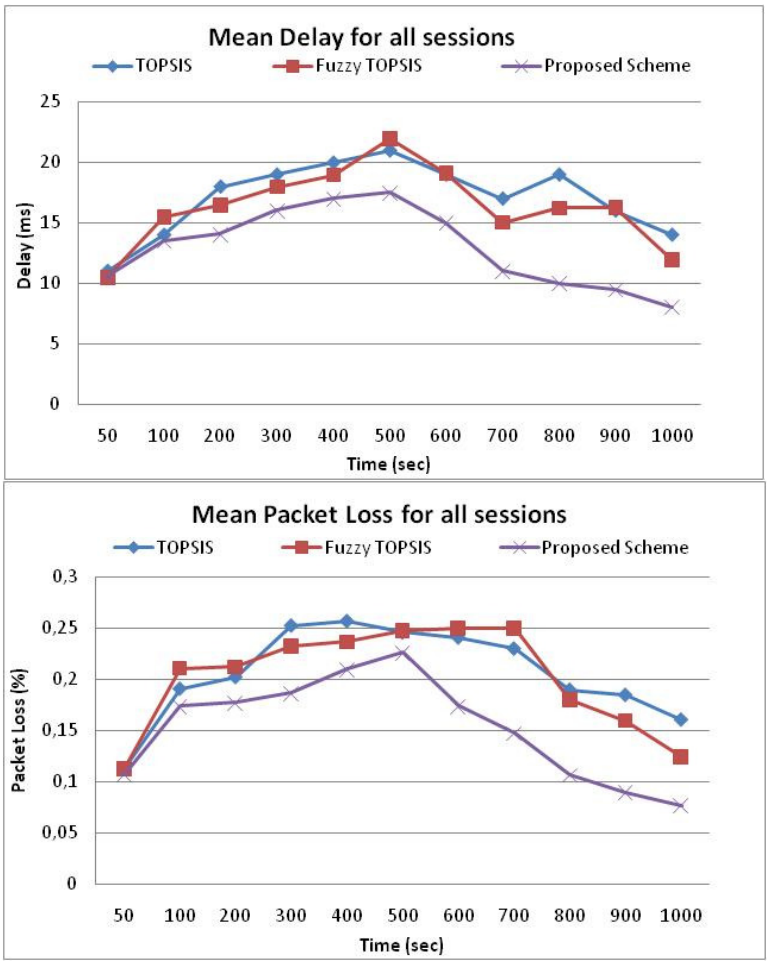
Το σενάριο ετερογενούς περιβάλλοντος υλοποιήθηκε σε ns2, για τυχαίες κλάσεις υπηρεσιών και θέσεις χρηστών, οι οποίοι αιτούνται την υπηρεσία Τηλεφωνίας. Τα κινητά τερματικά συνδέονται αρχικά με τυχαίο τρόπο με κάποια από τις διαθέσιμες τεχνολογίες πρόσβασης. Η υπηρεσία Τηλεφωνίας μοντελοποιείται ως υπηρεσία CBR αιτούμενη 384kbps ανά σύνοδο.

Τα δίκτυα ανανεώνουν τις μετρήσεις / προβλέψεις τους κάθε 30 δευτερόλεπτα. Η διάρκεια της περιόδου αυτής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, αφού υψηλές περίοδοι μπορεί να καταστήσουν το σύστημα ευπαθές σε συμφόρηση, ενώ χαμηλές τιμές μπορεί να προκαλέσουν υπερβολικό υπολογιστικό φόρτο. Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση της πλειοδοσίας, υποτίθεται ότι τα κινητά τερματικά κοινοποιούν όλες τις προσφορές στα υποψήφια δίκτυα, παρέχοντάς τους τη δυνατότητα να τροποποιήσουν τις προσφορές τους για μία μόνο φορά. Στη συνέχεια λαμβάνονται οι ανανεωμένες προσφορές και ξεκινάει η διαδικασία λήψης απόφασης.

Προκειμένου να εξετάσουμε την απόδοση της προτεινόμενης στρατηγικής, εφαρμόστηκαν τρία διαφορετικά σενάρια απόφασης διαπομπής, για κάθε ένα από τα οποία καταγράφηκε η απόδοση του συστήματος για συγκεκριμένες μετρικές QoS. Υποθέτουμε ότι τα κινητά τερματικά αιτούνται διαπομπή όταν η λαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας (ως προς καθυστέρηση και απώλεια πακέτων) είναι χαμηλότερη από το 70% της επιθυμητής τιμής. Τα σενάρια απόφασης διαπομπής που εξετάζονται είναι:

- Κατάταξη δικτύων με την TOPSIS [37]. Η στρατηγική αυτή βασίζεται σε MADM. Για αυτό το σενάριο οι μετρούμενες τιμές και τα βάρη έχουν την μορφή καθαρών αριθμών αντί για ασαφείς αριθμούς.
- Κατάταξη δικτύων με την Fuzzy TOPSIS. Η στρατηγική αυτή βασίζεται σε Ασαφή Λογική και MADM και αποτελεί πρακτικά το Στοιχείο Απόφασης Διαπομπής της προτεινόμενης στρατηγικής.
- Κατάταξη δικτύων με την προτεινόμενη στρατηγική, που βασίζεται σε Ασαφή Λογική, MADM και Θεωρία Παιγνίων.

Για τα δύο τελευταία σενάρια χρησιμοποιούνται τα ίδια βάρη με το αριθμητικό παράδειγμα, ενώ για το πρώτο σενάριο χρησιμοποιούνται οι μέσες τιμές αυτών των βαρών. Η Εικόνα 1.19 απεικονίζει τη μέση καθυστέρηση και απώλεια πακέτων που υπολογίζεται για όλες τις συνόδους. Παρατηρούμε ότι η TOPSIS και η Fuzzy TOPSIS αποδίδουν σχεδόν όμοια, ενώ η προτεινόμενη στρατηγική αποδίδει σημαντικά καλύτερα. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι σε αυτό το σενάριο τα δίκτυα μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία της απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται μια βελτίωση της τάξεως του 24.48% και 21.24% για τη μέση καθυστέρηση σε σύγκριση με την TOPSIS και την Fuzzy TOPSIS αντίστοιχα. Τα σχετικά ποσοστά για τη μέση απώλεια πακέτων είναι 26.2% και 24.54% αντίστοιχα. Επιπλέον, παρατηρείται συμφόρηση ανάμεσα στα 200 και τα 600 δευτερόλεπτα. Κατά το διάστημα αυτό, η προτεινόμενη στρατηγική καταφέρνει να βοηθήσει το σύστημα να ανακάμψει πιο γρήγορα σε σχέση με τις άλλες προσεγγίσεις.



Εικόνα 1.19. Μέση καθυστέρηση και απώλεια πακέτων για όλες τις συνόδους σε τρία σενάρια διαπομπής

1.5.4.4 Συζήτηση

Η προτεινόμενη στρατηγική εγγυάται ελάχιστο κόστος για τους χρήστες που προτιμούν εξοικονόμηση χρημάτων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας για τους χρήστες που την αποζητούν. Η προτίμηση του χρήστη για εξοικονόμηση χρημάτων ή εξασφάλιση υψηλής ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να επηρεάσει δραματικά τα αποτελέσματα, όπως φάνηκε και από το προηγούμενο αριθμητικό παράδειγμα. Δεδομένου ότι οι σύνθετοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται στην πλευρά των δικτύων, δεν επιβάλλεται σημαντικός υπολογιστικός φόρτος στα κινητά τερματικά.

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί η καθυστέρηση εκτέλεσης της διαπομπής δεν εξετάζεται στα πλαίσια αυτής της μελέτης, αφού θεωρείται η ίδια για όλα τα σενάρια διαπομπής. Εστιάζουμε στο χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου απόφασης για κάθε σενάριο, ώστε να εξετάσουμε τη βιωσιμότητα της στρατηγικής. Στη συνέχεια θα συζητήσουμε την απόδοσή της από πλευράς πολυπλοκότητας και κατανάλωσης χρόνου.

Ένας πιθανός περιορισμός της προτεινόμενης στρατηγικής είναι ότι προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διαδικασία προσαρμογής των προσφορών, πρέπει οι προσφορές να γνωστοποιούνται σε όλα τα υποψήφια δίκτυα, κάτι το οποίο μπορεί να μην είναι πάντα εφικτό. Η διαδικασία αυτή μπορεί ωστόσο να παραληφθεί, καθώς δεν αποτελεί υποχρεωτικό βήμα του αλγορίθμου. Στην περίπτωση αυτή βέβαια θα αρθούν οι εγγυήσεις του αλγορίθμου για βελτιστοποίηση.

Ως τελικό σχόλια, θα πρέπει να τονιστεί η επεκτασιμότητα της στρατηγικής, αφού τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν επιτρέπουν την εύκολη προσθήκη κριτηρίων απόφασης ή εναλλακτικών, χωρίς περιορισμούς. Ένα μειονέκτημα είναι ότι οι μέθοδοι MADM επιβάλλουν υπερβολικό φόρτο αν εισαχθεί ένας υπερβολικά μεγάλος αριθμός κριτηρίων. Παρόλα αυτά, για εφαρμογές σε πραγματικά σενάρια, ένας αριθμός τεσσάρων με έξι κριτηρίων μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικός και στην περίπτωση αυτή οι μέθοδοι MADM αποδίδουν ικανοποιητικά. Ως τελική αξιολόγηση της προτεινόμενης στρατηγικής, εξετάσαμε την απόδοσή της για διάφορους αριθμούς κριτηρίων απόφασης (η φύση και τα βάρη τους δεν είναι σημαντικά για αυτή τη μελέτη, καθώς η μετρική υπό εξέταση είναι ο χρόνος απόδοσης).

Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στον Πίνακα 1.30, δείχνοντας ότι μια αύξηση στον αριθμό των κριτηρίων επηρεάζει σε κάποιο βαθμό το συνολικό χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας λήψης απόφασης, ιδιαίτερα το χρόνο που απαιτείται για την εξαγωγή των προβλέψεων. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί το γιατί επιλέχθηκε η συγκεκριμένη διαδικασία να πραγματοποιείται περιοδικά και ανεξάρτητα από τη διαδικασία ανακάλυψης δικτύων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι προστίθεται επιπλέον καθυστέρηση λόγω της προετοιμασίας των προσφορών (τρίτη στήλη του Πίνακα 1.30). Η δεύτερη στήλη του Πίνακα 1.30 δε λαμβάνεται υπόψη, αφού οι λειτουργίες αυτές εκτελούνται περιοδικά και συνεπώς δεν επηρεάζουν τη διαδικασίας λήψης απόφασης όσον αφορά το χρόνο απόκρισης. Ο επιπλέον αυτός φόρτος αντισταθμίζεται από την περίπου 25% βελτίωση στην ποιότητα υπηρεσίας που επιτυγχάνεται.

#Criteria	**NBC Response Time**		**HDC Response Time**
	Measurements & Estimations	**Bids**	
4	~ 1.2 sec	~ 212 ms	~ 392 ms
6	~ 1.35 sec	~ 246 ms	~ 434 ms
8	~ 1.6 sec	~ 277 ms	~ 502 ms

Πίνακας 1.30. Επίδραση του αριθμού κριτηρίων στο χρόνο απόκρισης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΠΡΩΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

[1] ITU, 2003, "Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000", ITU-R M.1645, Switzerland, 2003.

[2] 3GPP, "Access Network Discovery and Selection Function (ANDSF) Management Object (MO)", 3GPP TS 24.312 8.3.0, 2009.

[3] 3GPP, "Study into network selection requirements for non-3GPP access", 3GPP TR 22.912 8.0.0, 2009.

[4] IEEE, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 21: Media Independent Handover Services," IEEE Std. 802.21-2008, Jan. 2009.

[5] 3GPP, "3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking; System Description; Release 6; Stage 2", 3GPP Technical Specification 23.234, 2005.

[6] Máirtín O'Droma, Ivan Ganchev, "Toward a ubiquitous consumer wireless world", IEEE Wireless Communications, Vol. 14, no. 1, February 2007, pp. 52-63.

[7] R. Trestian, O. Ormond and G-M. Muntean, "Game Theory-based Network Selection: Solutions and Challenges", IEEE Communication Survey and Tutorials, accepted 2012.

[8] Dimitris E. Charilas, Athanasios D. Panagopoulos, "Multi-Access Radio Network Environments", IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 5, Issue 4, December 2010, Pages 40 – 49.

[9] 3GPP, "3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking; System Description; Release 6; Stage 2", 3GPP Technical Specification 23.234, 2005.

[10] Máirtín O'Droma, Ivan Ganchev, "Toward a ubiquitous consumer wireless world", IEEE Wireless Communications, Vol. 14, no. 1, February 2007, pp. 52-63.

[11] 3GGP, "Telecommunication management; UTRAN and GERAN Key Performance Indicators (KPI)", 3GPP TR 32.814, 7.0.0, 2007.

[12] W. Zhang, "Handover Decision Using Fuzzy MADM in Heterogeneous Networks", IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Vol.2, pp. 653 – 658, March 2004 (WCNC 2004).

[13] F. Bari and Victor Leung, "Network Selection with Imprecise Information in Heterogeneous All-IP Wireless Systems", The 3rd international conference on Wireless Internet, Article 24, 2007.

[14] W. Shen, and Q.-A. Zeng, "Cost-Function-Based Network Selection Strategy in Integrated Wireless and Mobile Networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 57, No. 6, pp. 314 – 319, November 2008.

[15] Eng Hwee Ong , J.Y.Khan, "Dynamic Access Network Selection with QoS Parameters Estimation: A Step Closer to ABC", IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 2671 – 2676, 2008 (VTC Spring 2008).

[16] Dimitris E. Charilas, Ourania I. Markaki, John Psarras and Philip Constantinou, "Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to Network Selection", The 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (Mobilight 2009), May 2009, Athens, Greece.

[17] S. Kher, A. Somani and R. Gupta, "Network selection using fuzzy logic", 2nd International Conference on Broadband Networks, 2005.

[18] M. Alkhawlani and A. Ayesh, "Access Network Selection Based on Fuzzy Logic and Genetic Algorithms", Advances in Artificial Intelligence Hindawi Publishing Corporation, Vol. 8, Issue 1, 2008.

[19] O. Ormond, J. Murphy, G.-M. Muntean, "Utility-based Intelligent Network Selection in Beyond 3G Systems", IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2006.

[20] Haitao Lin, Mainak Chatterjee, Sajal K. Das, Kalyan Basu, "ARC: An Integrated Admission and Rate Control Framework for Competitive Wireless CDMA Data Networks Using Noncooperative Games", IEEE Trans. Mobile Comp., vol. 4, no. 3, May–June 2005, pp. 243–58.

[21] Lin Gao, Youyun Xu, Xinbing Wang, and Athanasios V. Vasilakos, "A Game Approach for Cell Selection and Resource Allocation in Heterogeneous Wireless Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking (accepted, revisions) .

[22] D. Niyato and E. Hossain, "Dynamics of Network Selection in Heterogeneous Wireless Networks: An Evolutionary Game Approach", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 58, No. 4, May 2009.

[23] Tran P.N., Boukhatem N., "Comparison of MADM decision algorithms for interface selection in heterogeneous wireless networks", 16th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, 2008 (SoftCOM 2008).

[24] Y. Yu, B. Yong, C. Lan, "Utility-dependent network selection using MADM in heterogeneous wireless networks", 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'07).

[25] S. Mahmoodzadeh, J. Shahrabi, M. Pariazar, and M. S. Zaeri, "Project Selection by Using Fuzzy AHP and TOPSIS Technique", Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 24, October 2007.

[26] Roy B., "The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods", Theory and Decision, Vol. 31, No. 49-73, 1991.

[27] Chen-Tung Chen, "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment", Fuzzy Sets and Systems, Volume 114, Issue 1, 16 August 2000, Pages 1-9.

[28] Ourania Markaki, Dimitris Charilas, Dimitris Nikitopoulos, "Enhancing Quality of Experience in Next Generation Networks through Network Selection Mechanisms", Mobile Terminal Assisted Enhanced Services Provisioning in a B3G Environment Workshop, PIMRC, September 2007, Athens, Greece.

[29] Bari, F. Leung, V., "Application of ELECTRE to Network Selection in a Hetereogeneous Wireless Network Environment", Wireless Communications and Networking Conference, 2007.

[30] Wei Wang, Xiaohong Guan, Xiangliang Zhang, "Processing of massive audit data streams for real-time anomaly intrusion detection", Computer Communications, 31(1): pp. 58-72, January 2008.

[31] Yann-Aël Le Borgne, Sylvain Raybaud, Gianluca Bontempi, "Distributed Principal Component Analysis for Wireless Sensor Networks", Sensors, 2008, Vol. 8(8): pp. 4821-4850.

[32] Jolliffe I. T., "Principal Component Analysis", 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 2002.

[33] Lindsay I. Smith, "A tutorial on Principal Components Analysis", February 26, 2002.

[34] Meriem Kassar, Brigitte Kervella, Guy Pujolle, "An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks", Computer Communications, vol. 31, issue 10, no. 25, pp. 2607-2620, June 2008.

[35] Dimitris E. Charilas, Athanasios D. Panagopoulos, "Fuzzy-based handover decision with multi-attribute auctions in heterogeneous network environments", International Journal of Wireless and Mobile Computing, Vol. 5, No.1, 2011, pp. 1 – 11.

[36] Chen W., Liu J., Huang H., "An adaptive scheme for vertical handoff in wireless overlay networks", Proceedings on the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems, pp. 541–548, 2004.

[37] Aggeliki Sgora, Christos A. Gizelis, Dimitrios D. Vergados, "Network selection in a WiMAX-WiFi environment", Pervasive and Mobile Computing, Volume 7, Issue 5, pp. 584-594, October 2011.

[38] Vetro A., Aouam T., Chang S.I., Lee E.S., "Fuzzy MADM: An outranking method". European Journal of Operational Research, Volume 145, Issue 2, pp. 317-328, 2003.

[39] Chan P., Sheriff R., Hu Y., Conforto P., Tocci C., "Mobility management incorporating fuzzy logic for a heterogeneous IP environment", IEEE Communications Magazine, Volume 39, Issue 12, pp. 42–51, 2001.

[40] Pahlavan K., Krishnamurthy P., Hatami A., Ylianttila M., Makela J., Pichna R., Vallstron, J.,. "Handoff in hybrid mobile data networks". IEEE Personal Communications, vol. 7, no. 2, pp. 34–47, 2007.

[41] R. Trestian, O. Ormond and G-M. Muntean, "Reputation-based Network Selection Mechanism using Game Theory", Elsevier Physical Communication, vol. 4, no. 3, pp. 156-171, 2011.

[42] Sehgal A., Agrawal R., "QoS based network selection scheme for 4G systems", IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.56, no.2, pp.560-565, May 2010.

[43] Ronen A. and Lehmann D., "Nearly optimal multi attribute auctions", 6th ACM conference on Electronic commerce. pp. 279–285, 2005.

[44] M. A. Khan et al., "Game-Theory Based User Centric Network Selection with Media Independent Handover Services and Flow Management," in Eighth Annual Research Conference on Communication Networks and Services (CNSR), 2010.

[45] Khan M.A, Toseef U., Marx S. and Goerg C., "Auction based Interface Selection with Media Independent Handover Services and Flow Management", European Wireless Conference, Vienna, Austria, 2010.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ:

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΕ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥΣ ΚΙΝΗΤΡΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ

2.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε συνοπτικά μερικές από τις βασικότερες έννοιες της θεωρίας παιγνίων. Για μια πιο λεπτομερή εισαγωγή στη θεωρία παιγνίων, οι αναγνώστες παραπέμπονται στην αναφορά [1]. Η αρχική ανάπτυξη της θεωρίας παιγνίων αποδίδεται στον John von Neumann [2] και δεκαέξι χρόνια αργότερα με το βιβλίο του σε συνεργασία με τον Oskar Mongenstern, "Theory of Games and Economic Behavior" [3]. Παρουσίασε μια θεωρία χρήσιμη σε ανταγωνιστικές καταστάσεις όπου το κέρδος του ενός είναι η ζημιά του άλλου. Όμως η θεωρία αυτή θα είχε δίχως αμφιβολία ξεχαστεί χωρίς τη συνεισφορά του John Nash και συγκεκριμένα με δύο εμπνευσμένες ιδέες, οι οποίες εμφανίστηκαν εξαρχής υπό τη μορφή μαθηματικών θεωρημάτων και με τις οποίες εισήγαγε την έννοια της ισορροπίας, γνωστή ως ισορροπία Nash. Περιέγραψε επίσης πολλά είδη παιγνίων για τα οποία πάντα υπάρχει μια τέτοια ισορροπία. Για την προσφορά του αυτή ο αμερικάνος μαθηματικός τιμήθηκε με το βραβείο Nobel οικονομίας το 1994.

Τη δεκαετία του '70 οι οικονομολόγοι John Harsanyi και Reinhard Selten ενδυνάμωσαν και ανέπτυξαν την έννοια της ισορροπίας Nash. Ο πρώτος εισήγαγε και ανέπτυξε την αβεβαιότητα των παικτών στην ανάλυση και ο δεύτερος ανέλυσε το πώς εξελίσσεται το παίγνιο και οι ισορροπίες του στο χρόνο. Την ίδια δεκαετία, μετά την εργασία του βιολόγου John Maynard Smith που εισήγαγε την έννοια της εξελικτικά σταθερής στρατηγικής, η θεωρία παιγνίων άρχισε να εφαρμόζεται συστηματικά και στη βιολογία.

Πολλά μοντέλα της θεωρίας παιγνίων άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην οικονομική και στην πολιτική επιστήμη ,στις κοινωνικές επιστήμες και στις επιστήμες που μελετούν την ανθρώπινη συμπεριφορά. Υπήρξε πηγή ελπίδας για μια ενοποιημένη κοινωνική επιστήμη η οποία επιβίωσε και με το τέλος του $20^{ου}$ αιώνα. Σε μια ειδική κατηγορία της θεωρίας παιγνίων, τα παίγνια με συνεργασία, πολύτιμη ήταν η προσφορά του Shapley. Τέλος ο Lemke, με την ανάπτυξη του ομώνυμου αλγόριθμου, έκανε το πρώτο βήμα στην ανακάλυψη αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση παιγνίων.

2.1.2 Ταξινόμηση Παιγνίων

Τα παίγνια ταξινομούνται συχνά σε διάφορα είδη μέσω ποικίλων κριτηρίων. Εδώ θα προσπαθήσουμε να δώσουμε κάποιες κατηγορίες. Αρχικά ένα βασικό κριτήριο βάσει του οποίου μπορούμε να ταξινομήσουμε ένα παίγνιο είναι ο αριθμός των παικτών που

συμμετέχουν. Αν λοιπόν συμμετέχουν δύο παίκτες τα παίγνια ονομάζονται παίγνια δύο παικτών, ενώ εάν συμμετέχουν n παίκτες έχουμε τα παίγνια n παικτών, όπου $n>2$. Η παρουσία δύο παικτών είναι η ελάχιστη απαίτηση για να έχουμε φαινόμενα ανταγωνισμού και συνεργασίας. Η παρουσία τριών ή περισσοτέρων παικτών οδηγεί περαιτέρω και στην δυνατότητα σχηματισμού συνασπισμών, όπου μια ομάδα από δύο ή περισσότερους παίκτες ενώνουν τα ενδιαφέροντα και τις στρατηγικές τους. Έτσι έχουμε *συνεργατικά και μη συνεργατικά παίγνια*, μια ταξινόμηση που βασίζεται στο κατά πόσο οι παίκτες πριν παίξουν το παίγνιο μπορούν να μορφώσουν συνασπισμούς και να επιτύχουν δεσμευτικές συμφωνίες για τις στρατηγικές. Ακόμη μπορούμε να ταξινομήσουμε τα παίγνια σύμφωνα με το εάν η σειρά που λαμβάνονται οι αποφάσεις παίζει ρόλο ή όχι. Έτσι έχουμε τα δυναμικά παίγνια όπου η σειρά με την οποία λαμβάνονται οι αποφάσεις παίζει ρόλο και τα στατικά παίγνια, στα οποία η σειρά με τη οποία ο παίκτης παίρνει τις αποφάσεις, δεν έχει σημασία.

Επίσης τα παίγνια ταξινομούνται σε *παίγνια πλήρους πληροφόρησης* στα οποία η συνάρτηση οφέλους κάθε παίκτη αποτελεί κοινή γνώση για όλους τους παίκτες και *σε παίγνια ελλιπούς πληροφόρησης* δηλαδή παίγνια στα οποία κάποιος παίκτης δεν είναι βέβαιος για τη συνάρτηση οφέλους κάποιου άλλου παίκτη (όπως για παράδειγμα στη δημοπρασία όπου το ύψος της μέγιστης προσφοράς που είναι πρόθυμος να υποβάλλει ο κάθε συμμετέχων για το πωλούμενο αγαθό δεν είναι γνωστό στους άλλους συμμετέχοντες).

Τα παίγνια επίσης ταξινομούνται σε παίγνια τέλειας και ατελούς πληροφόρησης. Στα *παίγνια τέλειας πληροφόρησης* ο παίκτης που καλείται να επιλέξει γνωρίζει το πλήρες ιστορικό της διεξαγωγής του παιγνίου μέχρι εκείνη τη στιγμή, ενώ στα *παίγνια ατελούς πληροφόρησης* σε κάποια κίνησή του ο παίκτης που πρόκειται να παίξει δεν γνωρίζει το πλήρες ιστορικό του. Επιπλέον, ο αριθμός στρατηγικών ταξινομεί τα παίγνια σε *πεπερασμένα* και *μη πεπερασμένα.*

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των παιγνίων είναι ως προς τα χαρακτηριστικά των συναρτήσεων αμοιβής ή απώλειας. Έτσι σε παίγνια δύο παικτών, όπου η αμοιβή του ενός είναι ίση με και προέρχεται από την απώλεια του άλλου, οι παίκτες βρίσκονται σε σύγκρουση και οποιαδήποτε συνεργασία είναι ανέφικτη. Τα παίγνια αυτά ονομάζονται *παίγνια μηδενικού αθροίσματος* αφού το άθροισμα των αμοιβών είναι μηδενικό.

Στα *παίγνια γενικού μη μηδενικού αθροίσματος*, υπάρχουν συνήθως στοιχεία ανταγωνισμού όσο και συνεργασίας. Έχουμε δύο ακραίες περιπτώσεις. Στην ειδική περίπτωση παιγνίων μη μηδενικού αθροίσματος οι παίκτες βρίσκονται σε σύγκρουση και η αμοιβή του ενός σημαίνει απώλεια για τον άλλον, ενώ στην ειδική περίπτωση παιγνίων σταθερής διαφοράς, οι παίκτες πρέπει να συνεργασθούν διότι είτε κερδίζουν είτε χάνουν μαζί.

Τέλος υπάρχει και μια ακόμη κατηγορία παιγνίων η οποία καθορίζεται από το εάν ο κάθε παίκτης επιλέγει διακριτές στρατηγικές. Πιο συγκεκριμένα, εάν ο παίκτης επιλέγει διακριτές στρατηγικές (π.χ. ή την 1 ή την 2,…) λέμε ότι ο παίκτης παίζει με καθαρή στρατηγική, οπότε και αυτού του είδους τα παίγνια ονομάζονται *παίγνια καθαρής στρατηγικής*. Στην αντίθετη περίπτωση, οπού ο κάθε παίκτης είναι δυνατόν να επιλέξει έναν συνδυασμό στρατηγικών, λέμε ότι έχουμε *παίγνια μικτής στρατηγικής*.

2.1.3 Το Δίλημμα των Κρατουμένων

Σε μια κανονικής μορφής παράσταση ενός παιγνίου όλοι οι παίκτες επιλέγουν ταυτόχρονα μια στρατηγική και ο συνδυασμός των στρατηγικών που επιλέχθηκαν από τους παίχτες καθορίζει το όφελος του κάθε παίκτη. Η κανονικής μορφής παράσταση ενός παιγνίου n παικτών προσδιορίζει τους χώρους στρατηγικής των παικτών $S_1, \dots, S_n$ και τις συναρτήσεις οφέλους τους $u_1, \dots, u_n$. Συμβολίζουμε αυτό το παίγνιο ως $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$.

Θα παρουσιάσουμε την κανονικής μορφής παράσταση ενός παιγνίου με ένα κλασικό παράδειγμα, το Δίλημμα των Κρατουμένων: δύο ύποπτοι συλλαμβάνονται και κατηγορούνται για ένα έγκλημα. Η αστυνομία δε διαθέτει επαρκή στοιχεία για να τους καταδικάσει, εκτός εάν τουλάχιστον ένας ομολογήσει. Η αστυνομία κρατά τους υπόπτους σε ξεχωριστά κελιά και τους εξηγεί τις επιπτώσεις που θα έχουν από τις πιθανές πράξεις τους. Αν κανείς τους δεν ομολογήσει, τότε και οι δυο θα καταδικαστούν για ένα πταίσμα και θα τους απαγγελθεί ένας μήνας φυλάκιση. Αν ομολογήσουν και οι δυο, τότε και οι δυο θα καταδικαστούν σε έξι μήνες φυλάκιση. Τέλος, αν ομολογήσει ο ένας αλλά ο άλλος όχι, τότε αυτός που ομολόγησε θα απελευθερωθεί αμέσως, όμως ο άλλος θα καταδικαστεί σε εννέα μήνες φυλάκιση-έξι για το έγκλημα και τρεις ακόμη για παρακώλυση δικαιοσύνης. Το πρόβλημα των κρατουμένων μπορεί να παρασταθεί στη συνοδευτική μήτρα διπλής εισόδου.

		Κρατούμενος 2	
		Σιωπώ	Καρφώνω
	Σιωπώ	-1,-1	-9,0
Κρατούμενος 1	Καρφώνω	0,-9	-6,-6

Πίνακας 2.1. Το Δίλημμα των Κρατουμένων

Στο παίγνιο αυτό κάθε παίκτης έχει δυο διαθέσιμες στρατηγικές: να προχωρήσει σε ομολογία (ή αλλιώς να καρφώσει) ή να μην ομολογήσει (να σιωπήσει).Τα οφέλη των δυο παικτών ανάλογα με το συγκεκριμένο ζεύγος στρατηγικών που θα επιλέξουν δίνονται στο αντίστοιχο κελί της μήτρας. Συμβατικά δεχόμαστε ότι το όφελος του λεγόμενου παίκτη των γραμμών είναι ο πρώτος αριθμός που δίνεται, ακολουθούμενο από το όφελος του παίκτη των στηλών. Έτσι, αν για παράδειγμα ο Κρατούμενος 1 επιλέξει να Σιωπήσει και ο Κρατούμενος

2 επιλέξει να καρφώσει, τότε ο Κρατούμενος 1 λαμβάνει όφελος -9 (που αντιπροσωπεύει εννέα μήνες φυλάκιση) και ο Κρατούμενος 2 λαμβάνει όφελος 0 (που αντιπροσωπεύει την άμεση απελευθέρωση). Αν ένας ύποπτος πρόκειται να παίξει «Καρφώνω», τότε ο άλλος θα προτιμούσε να παίξει «Καρφώνω» ώστε να βρεθεί στη φυλακή για έξι μήνες, αντί να παίξει «Σιωπώ» και να βρεθεί στη φυλακή για εννέα μήνες. Παρομοίως, αν ένας ύποπτος πρόκειται να παίξει, «Σιωπώ» τότε ο άλλος θα προτιμούσε να παίξει «Καρφώνω» και έτσι να απελευθερωθεί αμέσως αντί να παίξει «Σιωπώ» και να βρεθεί στη φυλακή για ένα μήνα. Ετσι για τον κρατούμενο *i*, το «Σιωπώ» κυριαρχείται από το «Καρφώνω». Αυτό συμβαίνει επειδή για κάθε στρατηγική που θα μπορούσε να επιλέξει ο κρατούμενος *j*, το όφελος του κρατουμένου *i* από το ≪Σιωπώ≫ είναι μικρότερο από το όφελος του *i* από το «Καρφώνω».

Έτσι γενικά σε ένα παίγνιο κανονικής μορφής $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$έστω ότι $s_t^{'}$ και $s_t^{''}$ είναι εφικτές στρατηγικές για τον παίκτη *i*. Η στρατηγική $s_t^{'}$ λέγεται *αυστηρά κυριαρχούμενη* από τη στρατηγική $s_t^{''}$ αν για κάθε εφικτό συνδυασμό στρατηγικών των άλλων παικτών, το όφελος του *i* παίζοντας $s_t^{'}$ είναι γνησίως μικρότερο από το όφελος του *i* παίζοντας $s_t^{''}$. Οι ορθολογικοί παίκτες δεν παίζουν αυστηρά κυριαρχούμενες στρατηγικές, διότι δεν υπάρχει καμία εκτίμηση σχετικά με τις στρατηγικές που θα ακολουθήσουν οι άλλοι παίκτες, ώστε η επιλογή μιας τέτοιας στρατηγικής να ήταν άριστη. Άρα στο δίλημμα των κρατουμένων ένας ορθολογικός παίκτης θα επιλέξει «Καρφώνω» και το (Καρφώνω, Καρφώνω) θα είναι το αποτέλεσμα στο οποίο θα καταλήξουν δύο ορθολογικοί παίκτες, παρόλο που το (Καρφώνω, Καρφώνω) καταλήγει και για τους δύο παίκτες σε χειρότερα οφέλη από το (Σιωπώ, Σιωπώ).

2.1.4 Ισορροπία κατά Nash

2.1.4.1 Ορισμός Ισορροπίας κατά Nash

Υποθέτουμε πως η παιγνιοθεωρητική ανάλυση κάνει μια μοναδική πρόβλεψη για τη στρατηγική που θα επιλέξει ο κάθε παίκτης. Για να είναι ορθή αυτή η πρόβλεψη είναι αναγκαίο ο κάθε παίκτης να είναι πρόθυμος να επιλέξει τη στρατηγική που προβλέπει η θεωρία. Άρα η προβλεπόμενη στρατηγική για κάθε παίκτη πρέπει να είναι η άριστη απόκριση αυτού του παίκτη στις προβλεπόμενες στρατηγικές των άλλων παικτών. Μια τέτοια πρόβλεψη θα αποκαλείται *ισορροπία κατά Nash* (Nash Equilibrium).

Ορισμός : Στο κανονικής παίγνιο n-παικτών $G = \{S_1, \dots, S_n; u_1, \dots, u_n\}$ *οι στρατηγικές* (s_1^*,…,s_n^*) *αποτελούν μια ισορροπία κατά Nash, αν για κάθε παίκτη i η* s_i^* *είναι η άριστη απόκριση (ή τουλάχιστον εξίσου καλή με άλλες) του παίκτη i στις στρατηγικές που αντιστοιχούν στους n-1 άλλους παίκτες* (s_1^*,…,s_{i-1}^*,s_{i+1}^*,…, s_n^*)*:*

$$u_i(s_1^*,\dots,s_{i-1}^*,s_i^*\ ,s_{i+1}^*\ ,\dots,\ s_n^*) \geq u_i(s_1^*,\dots,s_{i-1}^*,s_i\ ,s_{i+1}^*\ ,\dots,\ s_n^*) \text{ (NE)}$$

για κάθε εφικτή στρατηγική s_i στο S_i, δηλαδή το s_i^* να αποτελεί λύση του max $u_i(s_1^*,\ldots,s_{i-1}^*,s_i$ $,s_{i+1}^*,\ldots,s_n^*)$, $s_i \epsilon S_i$

Για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτόν τον ορισμό στο πλαίσιο της προηγούμενης επεξήγησης, υποθέτουμε πως η παιγνιοθεωρητική ανάλυση προτείνει τις στρατηγικές $(s_1',\ldots,s_n')$ ως λύση στο κανονικής μορφής παίγνιο $G = \{S_1, \ldots, S_n; u_1, \ldots, u_n\}$. Λέγοντας πως το $(s_1',\ldots,s_n')$ δεν αποτελεί ισορροπία κατά Nash του G, ισοδυναμεί με το να πούμε πως υπάρχει κάποιος παίκτης i για τον οποίο η s_t' δεν είναι άριστη απόκριση στο $(s_1',\ldots,s_{i-1}',s_{i+1}',\ldots,s_n')$. Δηλαδή υπάρχει κάποια s_t''στο S_i τέτοια ώστε $u_i(s_1',\ldots,s_{i-1}',$ $s_t',s_{i+1}',\ldots,s_n'') < u_i(s_1',\ldots,s_{i-1}', s_t'',s_{i+1}',\ldots,s_n'')$. Άρα, αν η θεωρία προσφέρει τις στρατηγικές $(s_1',\ldots,s_n')$ ως λύση αλλά αυτές οι στρατηγικές δεν αποτελούν ισορροπία κατά Nash, τότε τουλάχιστον ένας παίκτης θα έχει κίνητρο να παρεκκλίνει από την πρόβλεψη της θεωρίας ,οπότε και η θεωρία θα διαψευστεί από την πραγματική εξέλιξη του παιγνίου.

Μια μέθοδος άμεσης προσέγγισης για να βρεθούν οι ισορροπίες κατά Nash ενός παιγνίου είναι απλώς να ελεγχθεί αν κάθε πιθανό προφίλ στρατηγικών ικανοποιεί τη συνθήκη που αναφέρθηκε στον ορισμό. Σε ένα παίγνιο με δύο παίκτες ,αυτή η προσέγγιση ξεκινά ως εξής: για κάθε παίκτη και για κάθε εφικτή στρατηγική του συγκεκριμένου παίκτη, καθορίστε την άριστη απόκριση του άλλου παίκτη στην εν λόγω στρατηγική. Στο παράδειγμα του Πίνακα 2.2, αν ο παίκτης των στηλών σκόπευε να παίξει Α, για παράδειγμα, τότε η άριστη απόκριση του παίκτη των γραμμών θα ήταν Ε, μιας και το 4 ξεπερνά το 3 και το 0,οπότε υπογραμμίζεται το όφελος 4 του παίκτη των γραμμών στο κελί (Ε,Α) της μήτρας.

	Α	Μ	Δ
Π	0,<u>4</u>	<u>4</u>,0	5,3
Ε	<u>4</u>,0	0,<u>4</u>	5,3
Κ	3,5	3,5	<u>6,6</u>

Πίνακας 2.2. Εύρεση ισορροπίας Nash σε παίγνιο

Ένα ζεύγος στρατηγικών ικανοποιεί τη συνθήκη (NE) αν η στρατηγική του κάθε παίκτη είναι η άριστη απόκριση στη στρατηγική του άλλου-δηλαδή αν και τα δύο οφέλη είναι υπογραμμισμένα στο αντίστοιχο κελί της μήτρας. Έτσι το (Κ,Δ) είναι το μόνο ζεύγος στρατηγικών που ικανοποιεί την (NE) ανάλογα με το (Κάρφωμα, Κάρφωμα) στο Δίλημμα των Κρατουμένων. Αυτά τα ζεύγη στρατηγικών είναι οι μοναδικές ισορροπίες κατά Nash σε αυτά τα παίγνια.

2.1.4.2 Πολλαπλές Ισορροπίες κατά Nash

Ο Nash έδειξε ότι σε κάθε πεπερασμένο παίγνιο, δηλαδή σε ένα παίγνιο όπου το πλήθος των παικτών n και τα σύνολα στρατηγικών $S_1, \dots, S_n$ είναι όλα πεπερασμένα, υπάρχει τουλάχιστον μια ισορροπία κατά Nash [4]. Τελειώνουμε αυτήν την ενότητα με το κλασικό παράδειγμα της μάχης των φύλων (The Battle of the Sexes). Αυτό το παράδειγμα δείχνει πως ένα παίγνιο μπορεί να έχει πολλαπλές ισορροπίες κατά Nash.

Στην παραδοσιακή παρουσίαση αυτού του παιγνίου ένας άνδρας και μια γυναίκα προσπαθούν να αποφασίσουν για την ψυχαγωγία της βραδιάς. Ενώ βρίσκονται σε διαφορετικούς χώρους εργασίας ο Πατ και η Κρις πρέπει να διαλέξουν αν θα παρακολουθήσουν μια όπερα ή έναν αγώνα πυγμαχίας. Και οι δυο παίκτες θα ήθελαν να περάσουν τη βραδιά μαζί και όχι ξεχωριστά, όμως ο Πατ θα προτιμούσε να βρεθούν μαζί στον αγώνα πυγμαχίας ενώ η Κρις θα ήθελε να βρεθούν μαζί στην όπερα, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 2.3.

		Πατ	
		Όπερα	Αγώνας
Κρις	Όπερα	2,1	0,0
	Αγώνας	0,0	1,2

Πίνακας 2.3. Η Μάχη των φύλων

Τόσο το (Όπερα, Όπερα) όσο και το (Αγώνας, Αγώνας) είναι ισορροπίες κατά Nash. Στη μάχη των φύλων οι ισορροπίες (Όπερα, Όπερα) και (Αγώνας, Αγώνας) φαίνονται εξίσου πιθανές, γεγονός που υποδεικνύει πως μπορεί να υπάρχουν παίγνια για τα οποία η θεωρία παιγνίων δεν παρέχει μια μοναδική λύση και δεν προκύπτει καμία σύμβαση. Σε τέτοια παίγνια η ισορροπία κατά Nash χάνει σημαντικά την προβλεπτική της ικανότητα.

2.1.5 Παίγνια Μηδενικού Αθροίσματος

Ας θεωρήσουμε ένα παίγνιο μηδενικού αθροίσματος όπου δύο παίκτες Α και Β επιλέγουν ταυτόχρονα (και χωρίς να επικοινωνήσουν μεταξύ τους) μεταξύ του αριθμού 1 και του αριθμού 2. Αν επιλέξουν διαφορετικό αριθμό, κανείς τους δεν κερδίζει, ούτε χάνει τίποτα. Αν όμως επιλέξουν τον ίδιο αριθμό τότε, σε περίπτωση που επέλεξαν το 1, ο Β δίνει 1 ευρώ στην Α. Στην περίπτωση που οι Α και Β επιλέξουν τον αριθμό 2, ο Α δίνει 2 ευρώ στον Β. Η απάντηση που δίνει ο von Neumann σε αυτό το παίγνιο είναι η εξής: στον Α συνιστά να επιλέξει τον αριθμό 1 και στον Β το 2. Προφανώς, αν ακολουθήσουν τη συμβουλή του, τα κέρδη και των δύο θα είναι μηδενικά. Ας δούμε πώς κατέληξε σε αυτή τη λύση. Ο Α πρέπει να σκεφτεί ότι εάν επιλέξει τον αριθμό 1, τότε είτε θα κερδίσει 1 ευρώ (αν ο Β επιλέξει 1) είτε δε θα κερδίσει τίποτα (αν ο Β επιλέξει το 2). Εάν λοιπόν ο Α επιλέξει το 1, στη χειρότερη περίπτωση τα κέρδη του θα είναι μηδενικά. Αν όμως επιλέξει τον αριθμό 2,τότε είτε θα έχει

μηδενικά κέρδη (αν ο Β επιλέξει 1) είτε θα χάσει 2 ευρώ (αν και ο Β επιλέξει το 2). Άρα εφόσον επιλέξει το 2,στη χειρότερη περίπτωση η Α θα χάσει 2 ευρώ. Μεταξύ των δύο χειρότερων περιπτώσεων, είναι προφανές ότι η βέλτιστη είναι η πρώτη ενώ η χείριστη είναι η δεύτερη.

Από τη σκοπιά του Β έχουμε : η επιλογή 1 θα του αποφέρει είτε ζημιά ενός ευρώ (αν ο Α επιλέξει το 1) είτε μηδενικό κέρδος (αν και ο Α επιλέξει το 2). Το χειρότερο αποτέλεσμα για τον Β από την επιλογή 1 είναι ζημιά ενός ευρώ. Αν όμως επιλέξει το 2,στη χειρότερη περίπτωση θα έχει μηδενικό κέρδος (αν ο Α επιλέξει το 1,ενώ αν και ο Α επιλέξει το 2 τότε ο Β θα κερδίσει 2 ευρώ). Από τις δυο χειρότερες πιθανές καταστάσεις η χείριστη αντιστοιχεί στη στρατηγική επιλογή του αριθμού 1. Για αυτό ο von Neumann συμβουλεύει τον Β να επιλέξει τον αριθμό 2 στην έννοια των minmax ζημιών ή maxmin κερδών. Αν και οι δύο παίκτες ακολουθήσουν τη συμβουλή του von Neumann επιλέγοντας 1 η Α και 2 ο Β, τότε θα έχουν επιλέξει διαφορετικό αριθμό και κανείς τους δε θα αναγκαστεί να δώσει τα χρήματα στον άλλο.

Στον Πίνακα 2.4, ο Α επιλέγει μεταξύ των αριθμών 1 και 2 οι οποίοι αντιστοιχούν στις σειρές Α1 και Α2.Ταυτόχρονα ο Β επιλέγει μεταξύ των δικών του 1 και 2 που στον πίνακα παίρνουν τη μορφή των στηλών Β1 και Β2.Τ κέρδη τους εκφράζονται σε ευρώ με το κέρδος της Α να αναγράφεται πρώτο και του Β δεύτερο (οι ζημιές δίνονται ως αρνητικά κέρδη). Η τρίτη στήλη καταγράφει τα ελάχιστα κέρδη του Α για κάθε μια στρατηγική που έχει στη διάθεσή του, 0 και -2 αντίστοιχα. Το καλύτερο από τα δυο χειρότερα των στρατηγικών της Α είναι το 0. Η Τρίτη σειρά ,η min Β δίνει τα χειρότερα κέρδη του Β από τις στρατηγικές Β1 και Β2 : -1 και 0 αντίστοιχα. Το καλύτερο είναι το 0.Αρα υπογραμμίζουμε το (0,0) που προκύπτει από το συνδυασμό στρατηγικών (Α1,Β2).

	B1	B2	min A
A1	1,-1	0,0	0
A2	0,0	-2,2	-2
min B	-1	0	

Πίνακας 2.4 Παίγνιο Μηδενικού Αθροίσματος

Πρέπει να παρατηρήσουμε ότι το άθροισμα των maxmin κερδών του Α και του Β ισούται με το μηδέν. Ο von Neumann απέδειξε ότι για όλα τα παίγνια δυο παικτών μηδενικού αθροίσματος υπάρχουν maxmin στρατηγικές, μια για κάθε παίκτη που οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μικρότερη από τις μέγιστες ζημιές του Α ισούται με το μέγιστο μεταξύ των ελάχιστων κερδών του Β. Το θεώρημα αυτό είναι γνωστό ως το Θεώρημα Minimax.

2.1.6 Μικτές στρατηγικές

Σε προηγούμενη ενότητα ορίσαμε ως S_i το σύνολο των στρατηγικών που διαθέτει ο παίκτης *i* και πως για να αποτελεί ισορροπία κατά Nash το προφίλ στρατηγικών (s_1^*,…,s_n^*), για κάθε *i*, η s_i^* πρέπει να είναι η άριστη απόκριση του παίκτη *i* στις στρατηγικές των *n*-1 υπολοίπων παικτών. Με βάση τον ορισμό αυτό, στο ακόλουθο παίγνιο, το οποίο είναι γνωστό ως Ταιριαστά Κέρματα (Matching Pennies), δεν υπάρχει ισορροπία κατά Nash.

		Παίκτης 2	
		Κορώνα	Γράμματα
Παίκτης 1	Κορώνα	-1,1	1,-1
	Γράμματα	1,-1	-1,1

Πίνακας 2.5. Ταιριαστά Κέρματα

Σε αυτό το παίγνιο, ο χώρος στρατηγικής του κάθε παίκτη είναι {Κορώνα, Γράμματα}. Κάθε παίκτης έχει ένα κέρμα και πρέπει να επιλέξει αν θα το δείξει από την πλευρά με την κορώνα ή με τα γράμματα. Αν τα δύο κέρματα ταιριάξουν, δηλαδή αν και οι δύο παίκτες διαλέξουν κορώνα ή και οι δυο γράμματα, ο παίκτης 2 κερδίζει το κέρμα του παίκτη 1. Αν τα κέρματα δεν ταιριάξουν, τότε ο παίκτης 1 κερδίζει το κέρμα του παίκτη 2. Κανένα ζεύγος στρατηγικών δεν μπορεί να ικανοποιήσει την ισορροπία Nash, καθώς αν οι στρατηγικές των παικτών ταιριάζουν, ο παίκτης 1 προτιμά να αλλάξει στρατηγική, ενώ αν οι στρατηγικές δεν ταιριάζουν ο παίκτης 2 είναι που προτιμά τώρα να αλλάξει.

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του παιγνίου αυτού είναι ότι κάθε παίκτης θα ήθελε να "ξεγελάσει" τον άλλο. Σε οποιοδήποτε παρόμοιο παίγνιο δεν υπάρχει ισορροπία Nash όπως την ορίσαμε διότι η λύση περιλαμβάνει αναγκαστικά κάποια αβεβαιότητα σε σχέση με το τι θα κάνουν οι άλλοι παίκτες. Για να λύσουμε αυτό το παίγνιο εισάγουμε την έννοια της μικτής στρατηγικής, την οποία θα ερμηνεύσουμε με όρους αβεβαιότητας ενός παίκτη σε σχέση με το τι θα κάνει κάποιος άλλος παίκτης [5].

Τυπικά, μια μικρή στρατηγική για τον παίκτη *i* είναι μια κατανομή πιθανότητας ως προς ορισμένες ή όλες τις στρατηγικές του S_i. Στο εξής θα αναφερόμαστε στις στρατηγικές εντός του S_i ως αμιγείς στρατηγικές του παίκτη *i* . Στα Ταιριαστά Κέρματα, για παράδειγμα, ο S_i αποτελείται από τις δύο αμιγείς στρατηγικές Κορώνα και Γράμματα,. άρα μια μικτή στρατηγική για τον παίκτη *i* είναι η κατανομή πιθανότητας (q,1-q),όπου q είναι η πιθανότητα να παίξει Κορώνα, 1 – q είναι η πιθανότητα να παίξει Γράμματα και $0 \leq q \leq 1$. Η μικτή στρατηγική (0,1) δεν είναι παρά η αμιγής στρατηγική Γράμματα. Αντίστοιχα, η μικτή στρατηγική (1,0) είναι η αμιγής στρατηγική Κορώνα.

2.1.7 Επαναλαμβανόμενα παίγνια

Θεωρούμε το Δίλημμα των Κρατουμένων όπως παρουσιάζεται στην κανονική μορφή στην Ενότητα 2.1.3. Έστω ότι οι παίκτες παίζουν αυτό το παίγνιο ταυτόχρονων κινήσεων δυο φορές παρατηρώντας το αποτέλεσμα της πρώτης φοράς προτού ξεκινήσει το παίγνιο ξανά, και έστω ότι το όφελος ολόκληρου του παιγνίου προκύπτει απλώς αθροίζοντας τα οφέλη των δυο σταδίων. Αποκαλούμε αυτό το επαναλαμβανόμενο παίγνιο Δίλημμα των Κρατουμένων δύο σταδίων.

		Παίκτης 2	
		Α2	Δ2
Παίκτης 1	Α1	1,1	5,0
	Δ1	0,5	4,4

Πίνακας 2.6. Δίλημμα των Κρατουμένων Δύο Σταδίων - Πρώτο στάδιο

		Παίκτης 2	
		Α2	Δ2
Παίκτης 1	Α1	2,2	6,1
	Δ1	1,6	5,5

Πίνακας 2.7. Δίλημμα των Κρατουμένων Δύο Σταδίων - Δεύτερο στάδιο

Τα οφέλη είναι το άθροισμα του οφέλους από το αποτέλεσμα του πρώτου σταδίου (a_1, a_2) και το όφελος από το αποτέλεσμα του δεύτερου σταδίου του (α_3, α_4). Επίσης, το Δίλημμα των Κρατουμένων δύο σταδίων ικανοποιεί την υπόθεση: για κάθε εφικτό αποτέλεσμα του παιγνίου στο πρώτο στάδιο (a_1, a_2), το υπολειπόμενο παίγνιο στο δεύτερο στάδιο μεταξύ έχει μια μοναδική ισορροπία κατά Nash ,η οποία συμβολίζεται με $(\alpha_3(a_1, a_2), \alpha_4(a_1, a_2))$. Στο Δίλημμα των Κρατουμένων σε δύο στάδια, ωστόσο η μοναδική ισορροπία Nash στο παίγνιο του δεύτερου σταδίου είναι (A_1, A_2) , ανεξάρτητα από το αποτέλεσμα του πρώτου σταδίου.

Αναλύουμε αρχικά το πρώτο στάδιο του Διλήμματος των Κρατουμένων δύο σταδίων, λαμβάνοντας υπόψη το αποτέλεσμα του υπολειπόμενου παιγνίου (A_1, A_2) με όφελος (1,1). Άρα η αλληλεπίδραση του πρώτου σταδίου ισοδυναμεί με το απλό παίγνιο (που παίζεται μια φορά) του Πίνακα 2.7 ,στο οποίο το ζεύγος των οφελών (1,1) του δεύτερου σταδίου έχει προστεθεί σε κάθε ένα από τα ζεύγη των οφελών του πρώτου σταδίου. Το παίγνιο έχει επίσης μια μοναδική ισορροπία κατά Nash: την (A_1, A_2). Έτσι, το μοναδικό τέλειο ανά υποπαίγνιο αποτέλεσμα του Διλήμματος των Κρατουμένων δύο σταδίων είναι το (A_1, A_2) στο πρώτο στάδιο, ακολουθούμενο από (A_1, A_2) στο δεύτερο στάδιο. Η συνεργασία (δηλαδή το (Δ_1,Δ_2)) δεν μπορεί να επιτευχθεί σε κανένα στάδιο του τέλειου ανά υποπαίγνιο αποτελέσματος.

Ο ισχυρισμός αυτός ισχύει γενικότερα, επιτρέποντας οποιονδήποτε πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων, T. Έστω ότι με G = { A_1, …,A_n ; u_1 , … ,u_n } συμβολίζουμε ένα στατικό παίγνιο πλήρους πληροφόρησης στο οποίο οι παίκτες 1 έως n επιλέγουν ταυτόχρονα δράσεις α_1 έως α_n από τους χώρους δράσης A_1 έως A_n αντίστοιχα ενώ τα οφέλη είναι u_1 (a_1,…, α_n).Το παίγνιο G αποκαλείται παίγνιο σταδίου του επαναλαμβανόμενου παιγνίου.

Άρα με δεδομένο ένα παίγνιο σταδίου G, έστω ότι με G(T) συμβολίζουμε το πεπερασμένα επαναλαμβανόμενο παίγνιο στο οποίο το G παίζεται T φορές, με τα αποτελέσματα όλων των προηγούμενων διεξαγμένων παιγνίων σταδίου να παρατηρούνται προτού ξεκινήσει η επόμενη διεξαγωγή του παιγνίου. Τα οφέλη του G(T) είναι απλώς το άθροισμα των οφελών από τα T παίγνια σταδίου. Αν το παίγνιο σταδίου G έχει μια μοναδική ισορροπία κατά Nash, τότε, για κάθε πεπερασμένο T, το επαναλαμβανόμενο παίγνιο G(T) έχει ένα μοναδικό τέλειο ανά υποπαίγνιο αποτέλεσμα : και αυτό είναι η επιλογή της ισορροπίας κατά Nash του G σε κάθε στάδιο.

2.1.8 Θεωρία Παιγνίων και Σχηματισμός Συνασπισμών

Ενώ η μη συνεργατική θεωρία παιγνίων μελετά ανταγωνιστικά σενάρια, η συνεργατική θεωρία παιγνίων παρέχει αναλυτικά εργαλεία για να μελετηθεί η συμπεριφορά των ορθολογικών παικτών όταν συνεργάζονται. Ο κεντρικός κλάδος των συνεργατικών παιγνίων περιγράφει τον σχηματισμό συνεργαζόμενων ομάδων παικτών, που αναφέρονται ως συνασπισμοί [6], με τους οποίους μπορεί να ενισχυθεί η θέση των παικτών στο παιχνίδι. Τα παίγνια συνασπισμών μπορούν να αποδειχθούν ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για το σχεδιασμό δίκαιων, ισχυρών, πρακτικών, και αποτελεσματικών στρατηγικών συνεργασίας σε δίκτυα επικοινωνιών. Στη συνέχεια εξετάζονται τα κανονικά παίγνια συνασπισμών και τα παίγνια σχηματισμών συνασπισμών, αναλυτική περιγραφή των οποίων βρίσκεται στην αναφορά [7].

2.1.8.1 Κανονικά Παίγνια Συνασπισμών

Τα κανονικά παίγνια συνασπισμών είναι η πιο δημοφιλής κατηγορία της θεωρίας παιγνίων συνασπισμών. Ως εκ τούτου, στην κατηγορία αυτή αναφέρονται τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται ευρέως στη θεωρία παιγνίων συνασπισμών, πλήρως επισημοποιημένα, και έχουν σαφείς λύσεις. Για την ταξινόμηση ενός παιγνίου ως κανονικού, οι κύριες απαιτήσεις είναι οι εξής :

1. Το παίγνιο συνασπισμών να είναι χαρακτηριστικής μορφής.
2. Η συνεργασία, δηλαδή, ο σχηματισμός των μεγάλων συνασπισμών, να είναι πάντα ωφέλιμος. Ως εκ τούτου, σε κανονικά παίγνια οι παίκτες που δε δημιουργούν ομάδα

είναι σε χειρότερη θέση από αυτούς που συμμετέχουν σε συνασπισμούς. Αυτό αναφέρεται στη μαθηματική ιδιότητα της προσαύξησης (superadditivity).

3. Οι βασικοί στόχοι του κανονικού παιγνίου είναι οι εξής: (i) - να μελετήσει τις ιδιότητες και τη σταθερότητα του μεγάλου συνασπισμού, δηλαδή, τη συμμαχία όλων των παικτών στο παίγνιο, και (ii) - να μελετήσει τα κέρδη που προκύπτουν από τη συνεργασία με αμελητέο ή καθόλου κόστος, καθώς και τη διανομή των κερδών αυτών κατά τρόπο δίκαιο για τους παίκτες.

Δύο βασικές πτυχές έχουν σημασία σε κανονικά παίγνια: (i) - Εύρεση της κατανομής της πληρωμής που εγγυάται ότι καμία ομάδα παικτών δεν έχει κίνητρο για να εγκαταλείψει το μεγάλο συνασπισμό έτσι ώστε να έχουμε ένα σταθερό μεγάλο συνασπισμό και (ii) - την εκτίμηση ότι τα κέρδη που ο μεγάλος συνασπισμός μπορεί να επιτύχει, καθώς και τα κριτήρια της δικαιοσύνης που πρέπει να χρησιμοποιούνται για την κατανομή των κερδών αυτών έτσι ώστε να έχουμε ένα δίκαιο μεγάλο συνασπισμό. Για την επίλυση των συνασπισμών σε κανονικά παίγνια, η βιβλιογραφία παρουσιάζει μια σειρά από έννοιες, όπως ο πυρήνας και η αξία Shapley που προσδιορίζονται παρακάτω [6][8].

Η πιο γνωστή λύση για παίγνια συνασπισμών και ειδικότερα τα κανονικά παίγνια είναι ο πυρήνας [6][8]. Ο πυρήνας ενός κανονικού παιγνίου είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη σταθερότητα του μεγάλου συνασπισμού. Σε ένα κανονικό παίγνιο συνασπισμών (N, v), λόγω της ιδιότητας προσαύξησης, οι παίκτες έχουν κίνητρο να διαμορφώσουν τον μεγάλο συνασπισμό N. Έτσι ο πυρήνας του κανονικού παιγνίου είναι το σύνολο των κατανομών πληρωμών που εγγυάται ότι καμία ομάδα παικτών δεν έχει κίνητρο για να εγκαταλείψουν τον N, προκειμένου να διαμορφώσουν μια άλλη συμμαχία $S \subset N$. Για ένα παίγνιο μεταφερόμενης ωφέλειας (transferable utility – TU), δεδομένου του μεγάλου συνασπισμού N, ένα διάνυσμα πληρωμής $x \in R^N$ (N = |N |) για το χωρισμό $\upsilon(N)$ είναι ορθολογική ομάδα αν $\sum_{\iota \in N} x_i = \upsilon(N)$. Το διάνυσμα πληρωμής x είναι ατομικά ορθολογικό αν κάθε παίκτης μπορεί να αποκομίσει κέρδη όχι λιγότερα από το να λειτουργούσε μεμονωμένα, δηλαδή $x_i. \geq \upsilon(\{i\}), \forall\, i$.Η απόδοση είναι ένα διάνυσμα πληρωμής που ικανοποιεί τις παραπάνω δύο προϋποθέσεις. Έχοντας προσδιορίσει την απόδοση, ο πυρήνας μπορεί να οριστεί ως

$$C_{TU} = \{x : \sum_{i \in N} x_i = \upsilon(N) \text{ και } \sum_{\iota \in N} x_i \geq \upsilon(S)\ \forall\, S \subseteq N\} \tag{2.1}$$

Ως λύση , ο πυρήνας πάσχει από τρία κύρια μειονεκτήματα: (i) ο πυρήνας μπορεί να είναι άδειος, (ii) ο πυρήνας μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος, συνεπώς η επιλογή μιας κατάλληλης κατανομής πυρήνα μπορεί να είναι δύσκολη, και (iii) σε πολλά σενάρια, οι κατανομές που βρίσκονται στον πυρήνα μπορεί να είναι άδικοι για έναν ή περισσότερους παίκτες. Αυτά τα μειονεκτήματα οδήγησαν στην αναζήτηση μιας λύσης η οποία μπορεί να συνδέσει με κάθε παίγνιο συνασπισμών (N, υ) ένα μοναδικό διάνυσμα πληρωμής γνωστό ως η αξία του παιγνίου (η οποία είναι αρκετά διαφορετική από την αξία ενός συνασπισμού). Ο Shapley

προσέγγισε το πρόβλημα αυτό αξιωματικά με τον καθορισμό ενός συνόλου από επιθυμητές ιδιότητες και έχει χαρακτηριστεί μια μοναδική χαρτογράφηση φ που μπορεί να ικανοποιεί αυτά τα αξιώματα, γνωστή ως αξία Shapley [6]. Πιο συγκεκριμένα, ο Shapley πρότεινε τα παρακάτω τέσσερα αξιώματα, όπου Φ_i είναι η πληρωμή που δίνεται στον παίκτη *i* από την αξία Shapley φ:

1. Αξίωμα αποτελεσματικότητας : $\sum_{i \in N} \varphi_i(\upsilon) = \upsilon\ (N)$
2. Αξίωμα συμμετρίας : Αν ο παίκτης i και ο παίκτης j είναι τέτοιοι που υ(S∪{i}) = υ(S ∪ $\{j\}$)για κάθε συνασπισμό S που δεν περιέχουν τον παίκτη *i* και τον παίκτη *j*, τότε $\varphi_i(\upsilon) = \varphi_j(\upsilon)$.
3. Αξίωμα μη χρησιμότητας: Αν ο παίκτης *i* είναι τέτοιος ώστε υ(S) = υ(S∪{i}) για κάθε συνασπισμό S που δεν περιέχει το *i*, τότε $\varphi_i(\upsilon) = 0$.
4. Αξίωμα προσθετικότητας: Εάν *u* και *v* είναι χαρακτηριστικές συναρτήσεις, τότε Α φ(u + υ) = φ (υ + u) = φ (u) + φ (υ)

Ο Shapley έδειξε ότι υπάρχει μια μοναδική χαρτογράφηση, η αξία Shapley *φ(υ)*, από το χώρο όλων των παιγνίων συνασπισμών R^Nπου ικανοποιεί τα αξιώματα. Ως εκ τούτου, για κάθε παίγνιο *(N,υ)*, η αξία Shapley φ προσδιορίζει μια μοναδική κατανομή πληρωμής στο R^N που πληροί τα τέσσερα αξιώματα. Το αξίωμα της αποτελεσματικότητας είναι η ορθολογικότητα της ομάδας. Το αξίωμα της συμμετρίας σημαίνει ότι, όταν δύο παίκτες έχουν την ίδια συμβολή σε έναν συνασπισμό, οι απολαβές τους πρέπει να είναι ίσες. Το αξίωμα μη χρησιμότητας δεν εκχωρεί καμία πληρωμή σε παίκτες που δεν βελτιώνουν την αξία του κάθε συνασπισμού. Τέλος, το αξίωμα προσθετικότητας συνδέει την αξία των διαφορετικών παιγνίων *u* και *v* και υποστηρίζει ότι φ είναι μια μοναδική χαρτογράφηση πάνω από το χώρο των παιγνίων συνασπισμών.

2.1.8.2 Παίγνια Σχηματισμών Συνασπισμών

Τα παίγνια σχηματισμών συνασπισμών περιλαμβάνουν παίγνια συνασπισμών, όπου, σε αντίθεση με τα κανονικά παίγνια, η δομή του δικτύου και το κόστος για τη συνεργασία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Ταξινομούμε ένα παιχνίδι ως ένα παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών, όταν:

1. Το παίγνιο είναι είτε σε χαρακτηριστική μορφή ή σε μορφή διαχωρισμού (TU ή NTU) και γενικά δεν έχει την ιδιότητα της προσαύξησης.
2. Η διαμόρφωση ενός συνασπισμού φέρνει κέρδη στα μέλη του, αλλά τα κέρδη περιορίζονται από το κόστος για τη διαμόρφωση του συνασπισμού, ως εκ τούτου, ο μεγάλος συνασπισμός είναι σπάνια η βέλτιστη δομή.
3. Ο στόχος είναι να μελετηθεί η δομή του δικτύου συνασπισμών, απαντώντας σε ερωτήσεις όπως ποιοι είναι οι συνασπισμοί που θα σχηματιστούν,

ποιο είναι το βέλτιστο μέγεθος του συνασπισμού και πώς μπορούμε να αξιολογήσουμε τα χαρακτηριστικά της δομής, και ούτω καθεξής.

4. Το παίγνιο συνασπισμών υπόκειται στις αλλαγές του περιβάλλοντος, όπως μια μεταβολή στον αριθμό των παικτών, αλλαγή στη δύναμη του κάθε παίκτη ή άλλους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την τοπολογία του δικτύου.
5. Μια δομή συνασπισμών επιβάλλεται από έναν εξωτερικό παράγοντα στο παίγνιο (π.χ. φυσικοί περιορισμοί στο πρόβλημα).

Σε αντίθεση με τα κανονικά παίγνια, ένα παίγνιο σχηματισμού συνασπισμών δεν έχει γενικά την ιδιότητα της προσαύξησης και μπορεί να υποστηρίξει τη μορφή διαχωρισμού. Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο που χαρακτηρίζει αυτά τα παίγνια είναι η παρουσία του κόστους για τη διαμόρφωση συνασπισμών. Στα κανονικά παίγνια, καθώς και στο μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας, υπάρχει μια σιωπηρή παραδοχή ότι η δημιουργία ενός συνασπισμού είναι πάντα ωφέλιμη (π.χ. μέσω της ιδιότητας προσαύξησης). Σε πολλά προβλήματα, ο σχηματισμός ενός συνασπισμού απαιτεί μια διαδικασία διαπραγμάτευσης ή μια διαδικασία ανταλλαγής πληροφοριών οι οποίες μπορούν να θεμελιώσουν μια μείωση του κόστους από τα κέρδη που προκύπτουν από το σχηματισμό του συνασπισμού. Σε γενικές γραμμές, τα παίγνια σχηματισμών συνασπισμού μπορεί να είναι είτε στατικά είτε δυναμικά. Σε αντίθεση με τα κανονικά παίγνια, όπου υπάρχουν τυπικοί κανόνες και αναλυτικές έννοιες, η λύση ενός παιγνίου σχηματισμού συνασπισμών, ιδιαίτερα ενός δυναμικού παιγνίου σχηματισμού συνασπισμών, είναι πιο δύσκολη.

2.1.9 Δημοπρασίες

Η δημοπρασία είναι ένας μηχανισμός που βασίζεται σε ένα κανόνα κατανομής που καθορίζει ποιο αγαθό κατανέμεται σε ποιους και έναν κανόνα πληρωμής που ορίζει την καταβολή των αντίστοιχων αντιτίμων. Ένας συμμετέχων μιας δημοπρασίας καλείται *πλειοδότης*, ενώ η οντότητα που διεξάγει την δημοπρασία *δημοπράτης*. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την κατάταξη των δημοπρασιών. Οι δημοπρασίες ταξινομούνται σε απλές ή μίας μονάδας , εφόσον μόνο ένα αγαθό δημοπρατηθεί και σε πολλών μονάδων αν δημοπρατηθούν πολλές μονάδες ενός αγαθού (π.χ., άρτιες μονάδες εύρους ζώνης μιας σύνδεσης) . Επιπλέον, ανάλογα με το αν οι προσφορές γίνονται δημόσια ή όχι, η δημοπρασία αναφέρεται ως *ανοικτή* ή *κλειστή*, αντίστοιχα.

Η δημοπρασία με ενσφράγιστες προσφορές αποτελεί στατικό παίγνιο ελλιπούς πληροφόρησης, αφού κάθε συμμετέχων γνωρίζει τη δική του αξιολόγηση για το πωλούμενο αγαθό, όμως δεν γνωρίζει την αξιολόγηση κανενός άλλου, καθώς οι προσφορές κατατίθενται σε σφραγισμένους φακέλους και ταυτόχρονα.

Θεωρούμε την εξής δημοπρασία πρώτης τιμής με ενσφράγιστες προσφορές. Υπάρχουν δυο συμμετέχοντες, τους οποίους συμβολίζουμε i = 1,2. Ο συμμετέχων i έχει αποτίμηση v_i για το αγαθό, δηλαδή αν ο i κερδίσει το αγαθό και πληρώσει τιμή p, τότε το όφελος του i είναι v_i- p .Οι αποτιμήσεις των δυο συμμετεχόντων είναι ανεξάρτητες και ομοιόμορφα κατανεμημένες στο [0,1]. Οι προσφορές είναι υποχρεωτικά μη αρνητικές. Οι συμμετέχοντες καταθέτουν ταυτόχρονα τις προσφορές τους. Ο πλειοδότης κερδίζει το αγαθό και καταβάλλει τιμή ίση με την προσφορά του, ενώ ο άλλος συμμετέχων ούτε παίρνει ούτε πληρώνει τίποτα. Στην περίπτωση ισοπαλίας, ο νικητής καθορίζεται από το στρίψιμο ενός νομίσματος. Οι συμμετέχοντες είναι ουδέτεροι ως προς το ρίσκο.

Δράση του παίκτη i είναι η κατάθεση μιας μη αρνητικής προσφοράς b_i και τύπο του παίκτη i αποτελεί η αποτίμησή του v_i. Επειδή οι αποτιμήσεις είναι ανεξάρτητες, ο παίκτης i εκτιμά πως το v_j κατανέμεται ομοιόμορφα στο [0,1], όποια και αν είναι η τιμή του v_i.Τέλος, η συνάρτηση ωφέλειας του παίκτη i είναι

$$u_i(b_1,b_2\,;v_1,v_2) = \begin{Bmatrix} v_i - b_i & \text{αν } b_i > b_j \\ (v_i - b_i)/2 & \text{αν } b_i = b_j \\ 0 & \text{αν } b_i < b_j \end{Bmatrix} \tag{2.2}$$

Για να υπολογίσουμε μια ισορροπία κατά Nash αυτού του παιγνίου, ξεκινάμε κατασκευάζοντας τους χώρους στρατηγικής των παικτών. Σε ένα στατικό παίγνιο η στρατηγική είναι μια συνάρτηση από τύπους σε δράσεις. Συνεπώς, μια στρατηγική για τον παίκτη i είναι μια συνάρτηση $b_i(v_i)$ που καθορίζει την προσφορά που θα επέλεγε κάθε ένας από τους τύπους i ,(δηλαδή για κάθε μια από τις αποτιμήσεις). Σε μια ισορροπία κατά Nash, η στρατηγική του παίκτη 1, $b_1(v_1)$, είναι η άριστη απόκριση στην στρατηγική του παίκτη 2, $b_2(v_2)$, και αντίστροφα. Τυπικά, το ζεύγος των στρατηγικών $(b_1(v_1), b_2(v_2))$ αποτελεί ισορροπία κατά Nash αν για κάθε v_i στο [0,1] το $b_i(v_i)$ αποτελεί λύση του:

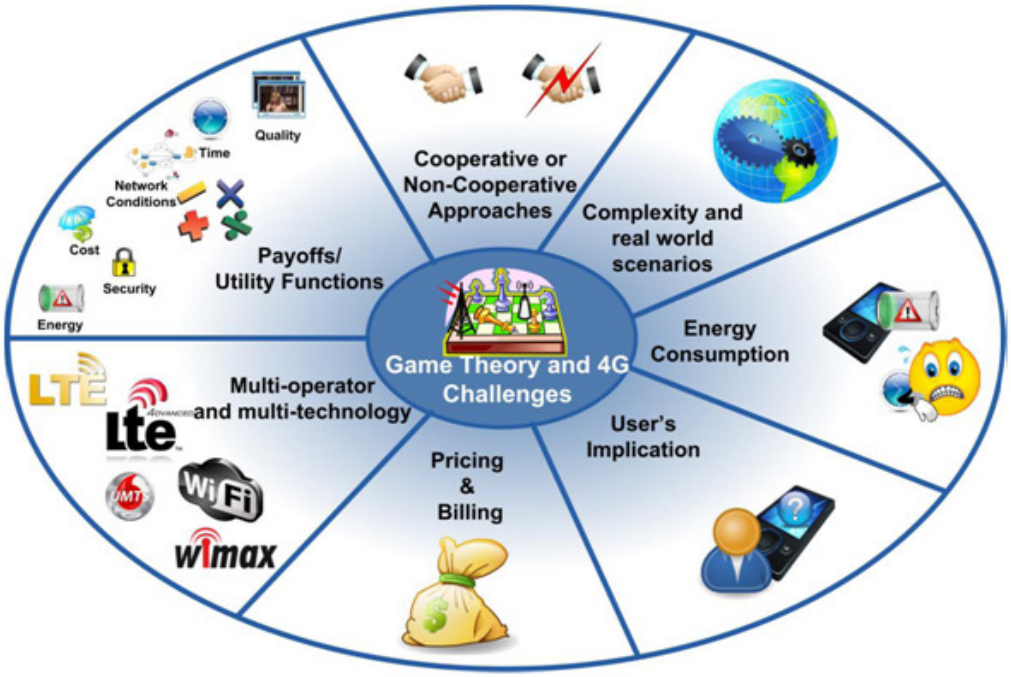
$$max_{b_i}\,(v_i - b_i)\,\text{Prob}\,\{\,b_i > b_j(v_j)\,\} + \frac{1}{2}\,(v_i - b_i)\,\text{Prob}\,\{\,b_i = b_j(v_j)\} \tag{2.3}$$

Ψάχνουμε μια γραμμική ισορροπία : $b_1(v_1) = a_1 + c_1 v_1$ και $b_2(v_1) = a_2 + c_2 v_2$.Προκύπτει πως επειδή οι αποτιμήσεις των παικτών είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, μια γραμμική ισορροπία όχι μόνο υπάρχει αλλά είναι και μοναδική. Θα βρούμε πως $b_i(v_i) = v_i/2$.Δηλαδή,κάθε παίκτης καταθέτει μια προσφορά ίση με τη μισή αποτίμησή του. Μια τέτοια προσφορά αντανακλά το θεμελιώδες δίλημμα που αντιμετωπίζει ένας συμμετέχων σε μια δημοπρασία: όσο περισσότερα προσφέρει ,τόσο πιθανότερο είναι ότι θα κερδίσει, όσο λιγότερα προσφέρει, τόσο περισσότερα θα αποκομίσει αν κερδίσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.2: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ

2.2.1 Προκλήσεις της Θεωρίας Παιγνίων

Όταν χρησιμοποιείται η θεωρία παιγνίων για επίλυση προβλημάτων σε ετερογενή ασύρματα περιβάλλοντα, όπως τα δίκτυα 4G, τότε πολλές προκλήσεις και ζητήματα μπορούν να επισημανθούν, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 [9]. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημαντικότερα από αυτά.



Εικόνα 2.1. Προκλήσεις της θεωρίας παιγνίων

Συνεργατική και μη συνεργατική προσέγγιση: Μία από τις πρώτες προκλήσεις είναι ο προσδιορισμός των παικτών και η μοντελοποίηση του προβλήματος ως συνεργατικό ή μη συνεργατικό παίγνιο. Οι παίκτες του παιγνίου, οι διαθέσιμες στρατηγικές κάθε παίκτη και οι στόχοι τους πρέπει να είναι σαφώς καθορισμένοι, δεδομένου ότι αποτελούν τα κύρια συστατικά με καθοριστικούς ρόλους στο παίγνιο. Θεωρώντας το ετερογενές ασύρματο περιβάλλον, οι παίκτες απεικονίζονται από οντότητες στα δίκτυα ή από τερματικά χρηστών, που υποτίθεται ότι είναι ορθολογικοί. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία των παιγνίων μπορούμε να διαμορφώσουμε ρεαλιστικά σενάρια στα οποία οι παίκτες ανταγωνίζονται μεταξύ τους και κάθε ένας από αυτούς επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του κέρδους του.

Απολαβές /Συναρτήσεις ωφέλειας: Η επιλογή των απολαβών ή των συναρτήσεων ωφέλειας είναι μια άλλη πρόκληση, δεδομένου ότι επηρεάζουν το πώς οι παίκτες θα επιλέξουν τις πράξεις τους. Αρκετές διαφορετικές συναρτήσεις χρησιμότητας έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα οι συγγραφείς στο [10], ορίζουν μια συνάρτηση κόστους ως ένα σταθμισμένο άθροισμα των διαφόρων παραμέτρων (φορτίο του σημείου πρόσβασης, την τιμή και την απόσταση). Οι συγγραφείς στο [11] εισάγουν μια συνάρτηση τιμολόγησης, προκειμένου να αποτρέψει τους χρήστες από τις υπερβολικές απαιτήσεις σε πόρους και την κακή χρήση των διαθέσιμων πόρων. Στο [12] η απολαβή του χρήστη ορίζεται με βάση το Πλεόνασμα του Καταναλωτή, που εκφράζεται ως η διαφορά μεταξύ της νομισματικής αξίας της παρεχόμενης ποιότητας υπηρεσίας προς τον χρήστη για τη τρέχουσα υπηρεσία και της πραγματικής τιμής της χρέωσης

Πολλαπλοί φορείς και πολλαπλές τεχνολογίες: Μια άλλη πρόκληση, κατά τον σχεδιασμό ενός συνεργατικού ή μη συνεργατικού παιγνίου, έρχεται όταν εξετάζουμε έναν ή πολλαπλούς φορείς. Μερικά από τα παίγνια συνεργασίας στη βιβλιογραφία μελετούν το σχηματισμό συνασπισμού μεταξύ διαφόρων δικτύων [13]. Τα δίκτυα μέσα σε ένα συνασπισμό συνεργάζονται προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των χρηστών σε υπηρεσίες. Η σκοπιμότητα ενός τέτοιου σεναρίου στον πραγματικό κόσμο, όπου ο ανταγωνισμός μεταξύ των φορέων είναι σκληρός, είναι αμφισβητήσιμη. Επιπλέον, οι πληροφορίες σχετικά με το εύρος της κάλυψης και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των σημείων πρόσβασης ή των σταθμών βάσης θεωρείται ότι είναι άκρως εμπιστευτικές στους φορείς. Για παράδειγμα, στο [10] οι συγγραφείς υποθέτουν την ύπαρξη μιας υπηρεσίας πληροφόρησης που έχει αναπτυχθεί στο σύστημα το οποίο παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα διαθέσιμα σημεία πρόσβασης και τους χρήστες τους. Θα ήταν ασυνήθιστο για τους φορείς να είναι πρόθυμοι να παρέχουν τέτοιες πληροφορίες. Τέλος, οι λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε έναν ή πολλαπλούς τύπους τεχνολογιών δικτύων πρόσβασης.

Κοστολόγηση και τιμολόγηση: Μια άλλη σημαντική άποψη εμφανίζεται όταν μελετάμε το νομισματικό κόστος που υφίσταται ο χρήστης, αφού ο μηχανισμός τιμολόγησης που χρησιμοποιείται θα επηρεάσει τη στρατηγική απόφασης. Στις περισσότερες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία υιοθετείται σταθερό σχέδιο τιμολόγησης, το οποίο λειτουργεί καλά όσο η χρήση του δικτύου είναι λογική. Σήμερα, με την εκθετική αύξηση της συμφόρησης δεδομένων , οι περισσότεροι φορείς ασύρματων δικτύων έχουν αρχίσει να υιοθετούν τον τρόπο χρήσης με βάση το σύστημα τιμολόγησης (π.χ., η AT & T κινήθηκε προς ένα κλιμακωτό μοντέλο).

Συμμετοχή των χρηστών: Η συμμετοχή του χρήστη στο μηχανισμό αποφάσεων στηρίζεται στην ιδέα ότι προκειμένου να παρέχουν μια χρήσιμη λύση, αν όχι την καλύτερη για τον πελάτη, οι πάροχοι υπηρεσιών θα πρέπει να γνωρίζουν τι χρειάζεται κάθε πελάτης

πραγματικά και που βρίσκεται το πραγματικό πρόβλημα. Υπάρχουν πολλοί τρόποι συλλογής στοιχείων από το χρήστη. Για παράδειγμα, η λύση που προτείνεται στην αναφορά [14] ενσωματώνει ένα GUI στο κινητό τερματικό του χρήστη, προκειμένου να συγκεντρώσει τις προτιμήσεις του χρήστη σχετικά με τις ακόλουθες παραμέτρους: Κατηγορία αιτήματος υπηρεσίας (Data, Video, Voice), Προτιμώμενη ποιότητα υπηρεσίας (Εξαιρετική, Καλή, Μέτρια) και Προτιμώμενες τιμές υπηρεσιών (Πάντα Φθηνότερα, Μέγιστη τιμή υπηρεσίας). Ζητώντας από τον χρήστη τα δεδομένα μπορεί να είναι ενοχλητικό ή ακόμα και επεμβατικό, μιας και ο μηχανισμός απόφασης δεν είναι πλέον διαφανής. Είναι πολύ σημαντικό να βρεθεί ένας συμβιβασμός μεταξύ του κόστους που αφορά τον χρήστη και του μηχανισμού απόφασης. Μια λύση για την ελαχιστοποίηση της αλληλεπίδρασης του χρήστη ίσως είναι η υλοποίηση ενός ευφυούς μηχανισμού μάθησης που θα μπορούσε να προβλέψει τις προτιμήσεις του χρήστη με την πάροδο του χρόνου.

Κατανάλωση ενέργειας: Μελετώντας την κατανάλωση ενέργειας των πολλαπλών διεπαφών της κινητής συσκευής, μια σημαντική πτυχή είναι η συνδεσιμότητα. Για παράδειγμα, στο [15], οι συγγραφείς θεωρούν ότι οι πολλαπλές διεπαφές των κινητών συσκευών έχουν ταυτόχρονες συνδέσεις, με απαιτήσεις εύρους ζώνης που μοιράζεται μεταξύ πολλαπλών δικτύων. Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, οι ταυτόχρονες συνδέσεις θα αδειάσουν την μπαταρία του κινητού ακόμα πιο γρήγορα από τη μία και μόνο σύνδεση.

Πολυπλοκότητα και πραγματικά σενάρια: Γενικά οι προτεινόμενες λύσεις έχουν δοκιμαστεί μέσα από διεξοδικά αριθμητικά αποτελέσματα ή προσομοιώσεις ,αλλά δεν έχουν προταθεί σενάρια που να έχουν δοκιμαστεί στον πραγματικό κόσμο. Η ενσωμάτωση σε ένα πραγματικό σενάριο είναι αμφισβητήσιμη, καθώς ορισμένες λύσεις απαιτούν ανάπτυξη εξωτερικών φορέων. Για παράδειγμα, στο [11], η ανάπτυξη του Κεντρικού Συντονιστή Φάσματος στο δίκτυο είναι απαραίτητη προκειμένου να κατανέμει τους διαθέσιμους πόρους μεταξύ των ανταγωνιστικών χρηστών. Η προσθήκη νέου εξοπλισμού σε ένα ήδη περίπλοκο δίκτυο δεν είναι μια καλή λύση. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται, οι φορείς των δικτύων στρέφονται προς την υιοθέτηση νέων αρχιτεκτονικών που έρχονται να απλοποιήσουν τα πράγματα, επιτρέποντας την γρήγορη ανάπτυξη υπηρεσιών και εφαρμογών.

2.2.2 Κατηγοριοποίηση Εφαρμογών Θεωρίας Παιγνίων σε Ασύρματα Δίκτυα

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να συγκεντρώσουμε το ευρύ φάσμα των εφαρμογών της θεωρίας παιγνίων στα ασύρματα δίκτυα. Προκειμένου να παρέχουμε μια συνεκτική παρουσίαση και να επισημάνουμε τα διάφορα πεδία εφαρμογής, οι εφαρμογές κατηγοριοποιούνται βάσει των επιπέδων OSI. Η ακολουθούμενη απεικόνιση ανά επίπεδο αποσκοπεί στο να δείξουμε ότι η Θεωρία Παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την

επίλυση προβλημάτων σε όλες τις πτυχές των τηλεπικοινωνιών, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη δυνατότητα συνδυασμού παιγνιοθεωρητικών πλαισίων για την επίτευξη διαστρωματικής βελτιστοποίησης. Στα περισσότερα από αυτά τα παίγνια συζητείται επίσης η έννοια της τιμολόγησης, δεδομένου ότι η τιμολόγηση αποτελεί ζωτικό παράγοντα σε μια συνάρτηση ωφέλειας.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.8, εξετάζονται διάφορα πεδία εφαρμογής σε κάθε επίπεδο, ενώ ενδιαφέρουσες προσεγγίσεις παρουσιάζονται για κάθε πεδίο. Αυτό όμως δεν σημαίνει σε καμία περίπτωση ότι δεν υπάρχουν άλλα πεδία εφαρμογής. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί πως μηχανισμοί όπως ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων ή έλεγχος φορτίου δεν μπορούν να αντιστοιχιστούν ρητά σε ένα μοναδικό επίπεδο, δεδομένου ότι αναπτύσσονται σε διαστρωματικές τεχνικές βελτιστοποίησης και έτσι θα μπορούσαν να ενέχουν στοιχεία πολλών επιπέδων.

Στρώματα OSI	**Πεδία Εφαρμογών**	**Συγκεκριμένες εφαρμογές**
Φυσικό	Έλεγχος ισχύος	Έλεγχος ισχύος σε CDMA
		Έλεγχος ισχύος σε OFDMA δίκτυα
	Κατανομή φάσματος	Κοινή χρήση φάσματος – Συναλλαγές φάσματος
	Συστήματα MIMO	Διαχείριση ισχύος σε MIMO
	Συνεργατικές επικοινωνίες	Αποκωδικοποίηση και προώθηση-Συνεργασία
Ζεύξη δεδομένων	Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο	Πρόσβαση στο Aloha με σχισμές
		Τυχαία πρόσβαση στο κανάλι παρεμβολής
Δικτύου	Δρομολόγηση	Δρομολόγηση και προώθηση
Μεταφοράς	Έλεγχος αποδοχής κλήσεων	Κατανομή αιτήσεων μεταξύ παρόχων
		Αποδοχή κλήσεων βασισμένη σε συμφωνία μεταξύ παρόχου και πελάτη
	Έλεγχος φορτίου	Τερματισμός συνεδριών βασισμένη σε συμφωνία μεταξύ παρόχου και πελάτη
	Επιλογή κυψέλης	Διακυψελικά και ενδοκυψελικά παίγνια

Πίνακας 2.8. Πεδία εφαρμογής θεωρίας παιγνίων στα ασύρματα δίκτυα

2.2.3 Φυσικό Στρώμα

Όσον αφορά το φυσικό στρώμα, η επίδοση είναι συνάρτηση του εκτιμώμενου λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο (Signal-to-Interference-and-Noise Ratio - SINR) που λαμβάνουν οι παίκτες / κόμβοι. Όταν οι κόμβοι σε ένα δίκτυο ανταποκρίνονται στις παρατηρούμενες αλλαγές του SINR προσαρμόζοντας τα σήματά τους, στο φυσικό στρώμα συντελείται διαδραστική διαδικασία λήψης αποφάσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, η θεωρία παιγνίων μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα σχετικά με την κατανομή πόρων, όπως η ενέργεια ή το φάσμα. Μια σημαντική πτυχή που λαμβάνεται υπόψη σε τέτοιους σχηματισμούς είναι η αποφυγή παρεμβολών.

2.2.3.1 Έλεγχος Ισχύος

Με τον όρο έλεγχο ισχύος αναφερόμαστε στην καλύτερη δυνατή επιλογή της στάθμης της ισχύος μετάδοσης σε ένα ασύρματο δίκτυο, προκειμένου να επιτευχθεί η αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και η καλύτερη δυνατή επίδοση του δικτύου. Λέγοντας καλύτερη επίδοση, εννοούμε τη βελτιστοποίηση τιμών κάποιων παραμέτρων, όπως ο ρυθμός δεδομένων στο δίαυλο, η χωρητικότητα του δικτύου ή ακόμα και η γεωγραφική κάλυψή του.

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση από μέρους των χρηστών για πρόσβαση σε υπηρεσίες ασύρματων επικοινωνιών εντείνει το ενδιαφέρον για την κατάλληλη και αποδοτική αξιοποίηση των πόρων καθώς και των υπηρεσιών που μπορούν να τη διευκολύνουν. Το γεγονός ότι οι διαθέσιμοι προς αξιοποίηση ραδιοπόροι είναι περιορισμένοι καθιστά αναγκαία τη λειτουργία του ελέγχου ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, περιορίζεται η αμοιβαία παρεμβολή που προκαλείται μεταξύ των χρηστών, ενώ παράλληλα αντιμετωπίζονται οι αρνητικές επιδράσεις του χωρικά και χρονικά μεταβαλλόμενου περιβάλλοντος, στο οποίο λαμβάνει χώρα η επικοινωνία.

Στο πρόβλημα ελέγχου ισχύος, η συνάρτηση ωφέλειας κάθε χρήστη αυξάνει το λόγο του σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο (SINR) μειώνοντας το επίπεδο ισχύος [16]. Εάν έχουν καθοριστεί τα επίπεδα ισχύος για όλους τους χρήστες, τότε αυξάνοντας το επίπεδο ισχύος του ενός θα αυξηθεί ο SINR του άλλου. Ωστόσο, όταν ο χρήστης αυξάνει την ισχύ μετάδοσης, αυξάνονται οι παρεμβολές προς τους άλλους χρήστες, ρίχνοντας τον SINR τους και ωθώντας τους να αυξήσουν τα δικά τους επίπεδα ισχύος. Οι Mackenzie και Wicker στην αναφορά [17] διατυπώνουν ένα μη συνεργατικό παίγνιο ελέγχου ισχύος για ένα σύστημα CDMA. Υποθέτουμε ότι οι χρήστες μεταδίδουν δεδομένα με ρυθμό R bits/sec σε πακέτα μεγέθους L bits σε φάσμα εύρους ζώνης W (Hz). Θεωρούμε p_j τη μεταδιδόμενη ισχύ από τον παίκτη j και υποθέτοντας ότι οι χρήστες επιλέγουν τα επίπεδα ισχύος από το σύνολο των μη αρνητικών πραγματικών αριθμών, $p_j \in [0,\infty)$, τότε ο λόγος σήματος προς παρεμβολές και θόρυβο (SINR) του χρήστη j μπορεί να οριστεί ως

$$SINR_j = \gamma_j = \frac{W}{R} \cdot \frac{h_j p_j}{\sum_{\forall i \neq j} h_i p_i + \sigma^2} \tag{2.4}$$

όπου h_j είναι το κέρδος χρήστη j στο σταθμό βάσης και σ^2 είναι η ισχύς του θορύβου στο δέκτη. Είναι επίσης δεκτό ότι ο θόρυβος είναι προσθετικός λευκός γκαουσιανός (AWGN). Η συνάρτηση χρησιμότητας j του χρήστη έχει μονάδα bits/J και μπορεί να εκφραστεί με

$$u_j(p_j, \gamma_j) = \frac{R}{p_j}(1 - 2 \cdot BER(\gamma_j))^L \tag{2.5}$$

όπου BER είναι το ποσοστό εσφαλμένων bit. Αν η μεταδιδόμενη ισχύς του χρήστη είναι υπερβολικά υψηλή, τότε σπαταλά πολύτιμη ισχύ ενώ έχει μικρή επίπτωση στο ποσοστό εσφαλμένων bit. Οι χρήστες θα προσπαθήσουν να κάνουν τις καλύτερες δυνατές επιλογές, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι άλλοι χρήστες κάνουν το ίδιο πράγμα. Θεωρώντας ότι οι χρήστες έχουν πλήρη πληροφόρηση ο ένας για τον άλλο και ότι είναι εντελώς ορθολογικοί, σύμφωνα με τη θεωρία των παιγνίων, θα επιλέξουν ένα σημείο λειτουργίας το οποίο είναι ισορροπία Nash. Οι Mackenzie και Wicker [18] εισάγουν επίσης δύο νέα είδη παιγνίων: τα επαναλαμβανόμενα παίγνια και τα παίγνια με διαιτησία ελέγχου ισχύος. Οι Gunturi και Paganini [19] διατυπώνουν ένα παρόμοιο παίγνιο ελέγχου ισχύος το οποίο διευρύνεται σε πολυκυψελωτά συστήματα.

Επιπλέον, ο Han στην αναφορά [20] προσθέτει έναν εικονικό διαιτητή στο πρόβλημα ελέγχου ισχύος στα πολυκυψελωτά συστήματα. Αν ο σταθμός βάσης ελέγχει την εκπεμπόμενη ισχύ από τους χρήστες τότε είναι πιθανό να επιτευχθεί αύξηση της αποτελεσματικότητας της ισορροπίας. Η επιλογή της ισχύος εκπομπής θα γίνεται από τους χρήστες όπως προηγουμένως, όμως το σημείο λειτουργίας θα επιλέγεται από το σταθμό βάσης, βάσει κριτηρίων που μεγιστοποιούν την απόδοση του δικτύου στο σύνολό του. Η βέλτιστη αυτή τιμή της λαμβανόμενης, στο σταθμό βάσης, ισχύος εξαρτάται από τις παραμέτρους του συστήματος, τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από το σταθμό βάσης, καθώς και τη στάθμη του λευκού θορύβου στο περιβάλλον του σταθμού βάσης. Ο υπολογισμός της βέλτιστης στάθμης ισχύος μπορεί να γίνεται κεντρικά στο σταθμό βάσης και να μεταδίδεται έπειτα προς τους τερματικούς χρήστες, ή να τους παρέχονται οι απαραίτητες τιμές για να την υπολογίζουν αυτοί. Αφού καθοριστεί το επιθυμητό σημείο λειτουργίας, το σύστημα πρέπει να επιβάλλει την διατήρησή του μέσω της επιβολής κάποιας ποινής στους χρήστες που δεν το ακολουθούν και εκπέμπουν με μεγαλύτερη ισχύ. Ωστόσο πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και το ενδεχόμενο κάποιος χρήστης να έχει αυξήσει αρκετά την ισχύ εκπομπής του μετά από φαινόμενα ισχυρών διαλείψεων που τον δυσκολεύουν στον υπολογισμό του κέρδους ισχύος διαδρομής και όχι με πρόθεση να αυξήσει την ποιότητα λειτουργίας του σε βάρος των άλλων χρηστών.

Η θεωρία παιγνίων εφαρμόστηκε με παρόμοιο τρόπο και στα δίκτυα πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση συχνότητας (Orthogonal frequency-division multiplexing - OFDM). Στις περιπτώσεις αυτές ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικά μεταβιβαζόμενης ισχύος υπό περιορισμούς στο ρυθμό και την ισχύ, προσαρμόζοντας το συντελεστή κατανομής σε διαφορετικούς διαύλους για διαφορετικούς χρήστες. Στην αναφορά [20] το πρόβλημα αυτό μοντελοποιείται ως μη συνεργατικό παίγνιο μεταξύ των χρηστών, θεωρώντας το ως water-filling πρόβλημα. Η τεχνική αυτή είναι η βέλτιστη μέθοδος εύρεσης της ζητούμενης κατανομής ισχύος. Η τεχνική Water Filling χρησιμοποιείται για να καθορίσει ποιο ποσοστό

της συνολικής ισχύος πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε κάθε υποκανάλι, με σκοπό την καλύτερη εκμετάλλευση αυτών και κατ' επέκταση την αύξηση της χωρητικότητας του συστήματος. Η λύση του παιγνίου παρέχει τις βέλτιστες τιμές για ισχύ και ποσοστό που προσφέρουν την καλύτερη χρησιμότητα για ένα χρήστη που έχει λάβει την κατανομή των πόρων των άλλων χρηστών. Μια παιγνιοθεωρητική προσέγγιση για την κατανομή ισχύος σε πολυκυψελωτά δίκτυα OFDM μέσω των μη συνεργατικών παιγνίων παρουσιάζεται στο [21].

2.2.3.2 Κατανομή φάσματος

Το πρόβλημα κατανομής του ραδιοφάσματος αφορά το ζήτημα του πώς κατανέμεται το περιορισμένο διαθέσιμο φάσμα μεταξύ πολλών ασύρματων συσκευών. Η κατανομή του ραδιοφάσματος θα πρέπει να χρησιμοποιεί όσο δυνατόν περισσότερους από τους διαθέσιμους πόρους. Ωστόσο, όταν η χρησιμότητα μεγιστοποιηθεί μπορούν να γίνουν συμβιβασμοί ως προς την αμεροληψία.. Ένα συνεργατικό παίγνιο για κοινή χρήση κατανεμημένου φάσματος συζητείται στο [17]. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, το διαθέσιμο εύρος ζώνης διαιρείται εξίσου σε πολλαπλά κανάλια. Κάθε κόμβος μπορεί να μεταδίδει σε κάθε συνδυασμό καναλιών οποιαδήποτε στιγμή και να καθορίσει τη μεταδιδόμενη ισχύ σε κάθε κανάλι. Οι κόμβοι-δέκτες δεν μεταδίδουν και επομένως δεν θεωρούνται παίκτες στο παίγνιο. Ας ορίσουμε $\chi = \{1,..., K\}$ το σύνολο των διαθέσιμων καναλιών, *B* το συνολικό εύρος ζώνης, με κάθε κανάλι να έχει εύρος ζώνης *B/K*, και *N* τον αριθμό των κόμβων-πομπών στο δίκτυο. Το παίγνιο κοινής χρήσης του ραδιοφάσματος έχει διατυπωθεί ως εξής: $M = \{1,...,N\}$, $P_i^x = \{(p_i^k)k \in x \mid p_i^k \geq 0, \sum_{k \in x} p_i^k < P_{\max}\}$ και $P^x = P_1^x X ... X P_N^x$. Έστω $p \in P^{\chi}$ and $u_i(p) = C_i(p)$, όπου *Ci (p)* είναι η χωρητικότητα Shannon :

$$C_i(p) = \frac{B}{K} \cdot \sum_{k=1}^{K} \log_2 (1 + \frac{H^k{}_{ii} p_i^k}{\frac{\sigma^2}{K} \sum_{\forall j \neq i} H^k{}_{ji} p_j^k}) \tag{2.6}$$

όπου p_i^k είναι η ισχύς μεταδίδεται από τον κόμβο *i* στο κανάλι *k*, P_{max} είναι η μέγιστη ισχύ μετάδοσης, H_{ji}^k είναι το κέρδος από τον *j* στο δέκτη *i* στο κανάλι *k*, και σ^2 είναι ο θερμικός θόρυβος για ολόκληρο το εύρος ζώνης *B*. Έτσι, η συνάρτηση χρησιμότητας του κόμβου *i* μπορεί να προσεγγιστεί ως τη χωρητικότητα Shannon , δεδομένου ότι οι κόμβοι-δέκτες που είναι αρκετά μακριά από τον κόμβο *i* έχουν αμεληθεί εφόσον προκαλούν αμελητέα παρεμβολή. Προσομοιώσεις δείχνουν ότι όταν η παρεμβολή είναι υψηλή, οι βέλτιστες μικτές στρατηγικές περιλαμβάνουν συνήθως ένα μόνο κόμβο που εκπέμπει σε μια στιγμή.

Οι Niyato και Hossain [22] εξετάζουν το πρόβλημα κοινής χρήσης φάσματος μεταξύ ενός πρωτεύοντος χρήστη και πολλαπλών δευτερευόντων χρηστών, μοντελοποιώντας την

ανταγωνιστική κατανομή φάσματος μεταξύ των δευτερευόντων χρηστών σε γνωστικά δίκτυα. Το όφελος των δευτερευόντων χρηστών είναι σε αυτή την περίπτωση :

$$\pi_t(\mathrm{B}) = r_i k_i b_i - b_i[x + y(\sum_{b_j \varepsilon \mathrm{B}} b_j)^{\tau}] \tag{2.7}$$

όπου b_i είναι το μέγεθος του κατανεμημένου φάσματος, B είναι το σύνολο όλων των διαθέσιμων στρατηγικών, k_i είναι ο μέσος ρυθμός μετάδοσης, r_i είναι τα έσοδα, x, y, και τ είναι μη-αρνητικά σταθερές, $\tau \geq 1$. Παρόμοιες προσεγγίσεις μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [23] και [24].

Παρόμοιο πρόβλημα με την κοινή χρήση του φάσματος είναι οι ανταλλαγές φάσματος. Οι Niyato και Hossain [25] μελέτησαν το πρόβλημα της τιμολόγησης του φάσματος σε γνωστικά δίκτυα όπου πολλαπλοί πάροχοι ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να προσφέρουν ευκαιρίες πρόσβασης στο ραδιοφάσμα σε δευτεροβάθμιους χρήστες. Ομοίως, οι συγγραφείς του [26] αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των μη συνεργαζόμενων παρόχων προσπαθώντας να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους με την προσφορά επιπλέον φασματικών πόρων σε άλλους. Τα έσοδα και οι δαπάνες για τον πάροχο i υπολογίζονται ως εξής

$$\begin{aligned} &\mathrm{Re}v(i) = c_i M_i \\ &Cost(q_i) = c_2 M_i (BW_i^{req} - a_i \frac{W_i - q_i}{M_i})^2 \end{aligned} \tag{2.8}$$

όπου c_1 και c_2 δηλώνουν βάρη για τα έσοδα και τις συναρτήσεις κόστους, αντίστοιχα, BW_i^{req} υποδηλώνει την απαίτηση εύρους ζώνης για έναν πάροχο, a_i είναι η φασματική απόδοση για τον πρωτοβάθμιο πάροχο i και Mi είναι ο αριθμός των κύριων συνδέσεων. Με βάση το παραπάνω μοντέλο, ένα παίγνιο μπορεί να διατυπωθεί βάσει του ότι οι παίκτες είναι οι πάροχοι του προσφερόμενου φάσματος. Η στρατηγική τους μπορεί να είναι η τιμή ανά μονάδα φάσματος pi και, τελικά το όφελος για κάθε πάροχο μπορεί να είναι το κέρδος (έσοδα μείον έξοδα) μετά τη συναλλαγή του φάσματος. Τα έσοδα για κάθε παρόχου μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$\mathrm{Pr}of_i(p) = q_i p_i + \mathrm{Re}v_i - Cost_i \tag{2.9}$$

όπου p_i δηλώνει το σύνολο των τιμών που προσφέρονται από όλους τους παίκτες στο παιχνίδι και $p = \{p_1, \ldots, p_N\}$ είναι το σύνολο των τιμών. Η καλύτερη απόκριση του παρόχου i, δίνεται από ένα σύνολο από τιμές που προσφέρονται από άλλους πρωτεύοντες χειριστές p_i είναι $B_i(p_i) = \arg\max_{p_i}(\mathrm{Pr}of_i(p_i))$

2.2.3.3 Συστήματα MIMO

Στην αναφορά [27] εξετάζεται η διαχείριση των παρεμβολών σε ασύρματα ad hoc δίκτυα χρησιμοποιώντας MIMO (Multiple Input Multiple Output) τεχνικές. Σύμφωνα με αυτή την

προσέγγιση, η κατανομή ισχύος στη σύνδεση *i* διαμορφώνεται ως μη συνεργατικό παίγνιο χρησιμοποιώντας την απλή συνάρτηση χρησιμότητας $u_i = C_i - \gamma_i p_i$ όπου γ_i είναι ένας παράγοντας κλίμακας, έτσι ώστε οι δύο όροι στην προηγούμενη εξίσωση να έχουν τις ίδιες μονάδες, C_i είναι ο εφικτός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων της σύνδεσης και p_i είναι η μεταδιδόμενη ισχύς της σύνδεσης. Ομοίως, στην αναφορά [28] διατυπώθηκαν μη συνεργατικά παίγνια , στα οποία οι παίκτες είναι οι ζεύξεις και οι συναρτήσεις ωφέλειας είναι οι ρυθμοί μετάδοσης σε κάθε ζεύξη.

2.2.3.4 Συνεργατικές Επικοινωνίες

Οι Chen και Kishore [29] ανέπτυξαν τη θεωρητική ανάλυση ενός συνεργατικού παιγνίου αποκωδικοποίησης και προώθησης συνεργατικών επικοινωνιών με πρόσθετο λευκό Gaussian θόρυβο (AWGN) και Rayleigh εξασθένηση καναλιών ως μοντέλο Markov δύο καταστάσεων. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, τα τερματικά, τα οποία αποτελούν τους παίκτες, επικοινωνούν μέσω ορθογώνιων καναλιών με ένα κοινό κόμβο προορισμό. Οι συγγραφείς προτείνουν δύο εναλλακτικές λύσεις για το όφελος: μπορεί να θεωρηθεί ίσο με την χωρητικότητα Shannon ή με την αξιοπιστία της μετάδοσης, η οποία ισούται με 1 μείον το ποσοστό λανθασμένων bits . Τα παίγνια αυτά θεωρείται ότι ελέγχονται από μια οντότητα που είτε επιβραβεύει είτε τιμωρεί τους κόμβους (αυξάνοντας ή μειώνοντας την ισχύ εκπομπής, αντίστοιχα) με βάση τη συμπεριφορά τους.

2.2.4 Στρώμα Ζεύξης Δεδομένων

Εφαρμογές της θεωρίας παιγνίων που συναντάμε στο στρώμα ζεύξης δεδομένων αφορούν το πρόβλημα ελέγχου πρόσβασης στο μέσο. Σε αυτά τα παίγνια χρήστες με εγωιστική συμπεριφορά επιδιώκουν να λάβουν άδικα πρόσβαση στο κανάλι. Η δράση αυτή όμως μειώνει την ικανότητα άλλων χρηστών να έχουν πρόσβαση στο κανάλι.

2.2.4.1 Έλεγχος πρόσβασης στο μέσο

Ένα καλό παράδειγμα τέτοιων παιγνίων είναι το έργο των MacKenzie και Wicker [30][31], που μοντελοποιούν την τυχαία πρόσβαση σε Aloha με σχισμές. Σύμφωνα με αυτή την περίπτωση, οι χρήστες επιθυμούν να μεταδίδουν το συντομότερο δυνατό. Ωστόσο, αν πολλοί χρήστες προσπαθούν να μεταδίδουν ταυτόχρονα όλες οι προσβάσεις θα αποτύχουν. Επίσης, ανεπιτυχείς προσπάθειες για τη μετάδοση μπορεί να κοστίσουν. Στο Aloha με σχισμές, ο χρόνος χωρίζεται σε σχισμές και μέσα από μια συγκεκριμένη μέθοδο συγχρονισμού. Όλοι οι χρήστες γνωρίζουν πού βρίσκονται τα όρια της σχισμής. Όταν ένας χρήστης επιθυμεί να έχει

πρόσβαση στο κοινόχρηστο κανάλι περιμένει μέχρι το επόμενο όριο σχισμής και στη συνέχεια προσπαθεί να μεταδώσει. Αν δύο ή περισσότεροι χρήστες προσπαθούν να μεταδώσουν στην ίδια χρονοσχισμή , οι χρήστες μπαίνουν σε ουρά αναμονής και πρέπει να προσπαθήσουν να επαναλάβουν τη μετάδοση σε μια μελλοντική χρονοσχισμή.

Έστω *G (n)* το παίγνιο στο οποίο υπάρχουν επί του παρόντος *n* χρήστες. Σε κάθε στάδιο του *G (n)* κάθε ένας από τους παίκτες πρέπει να αποφασίσει αν θα μεταδώσει (T) ή θα περιμένει (W). Αν ένας παίκτης αποφασίσει να μεταδώσει και οι υπόλοιποι αποφασίσουν να περιμένουν, ο παίκτης που μεταδίδει θα λάβει όφελος 1, και κάθε ένας από τους άλλους (*n* - 1) παίκτες θα παίξουν *G (n-1)* κατά την επόμενη περίοδο. Σε περίπτωση που είτε κανένας χρήστης δε μεταδώσει ή μεταδώσει παραπάνω από ένας χρήστης , όλοι οι παίκτες θα παίξουν *G (n)* και πάλι κατά την επόμενη περίοδο. Οι παίκτες θέτουν χαμηλότερη τιμή για όφελος σε μεταγενέστερα στάδια από ότι τα τρέχοντα οφέλη. Αυτό αντιπροσωπεύεται από ένα συντελεστή προεξόφλησης ανά περίοδο $d<1$. Ας συμβολίσουμε με $u_{i,n}$ την ωφέλεια του παίκτη *i* που παίζει *G (n)* και ας ορίσουμε *K* να είναι μια τυχαία μεταβλητή που δηλώνει τον αριθμό των άλλων χρηστών που μεταδίδουν σε μια συγκεκριμένη χρονοσχισμή. Τότε οι συναρτήσεις ωφέλειας για κάθε ενέργεια είναι [31]:

$$u_{i,n}(T)=\frac{P[K=0]}{1-\delta\cdot P[K>0]},u_{i,n}(W)=\frac{\delta\cdot P[K=1]}{1-\delta\cdot P[K\neq 1]}u_{i,n-1} \tag{2.10}$$

Αυτό το παίγνιο έχει συμμετρική ισορροπία Nash. Ο Simeone [32] μελέτησε το σχηματισμό παιγνίου ενός βασικού καναλιού με παρεμβολές με τυχαίες αφίξεις πακέτων και τυχαίες προσπελάσεις. Σε αυτό το μοντέλο ο χρόνος είναι χωρισμένος σε σχισμές και η μετάδοση κάθε πακέτου παίρνει μια χρονοσχισμή. Ας υποθέσουμε ότι σε αυτό το μη συνεργατικό παίγνιο ο πομπός *i* μεταδίδει με πιθανότητα $p_i^{(1)}$ αν ο άλλος πομπός δεν έχει κανένα πακέτο στην ουρά, και $p_i^{(2)}$ το αντίθετο. Το σύνολο όλων των εφικτών πιθανοτήτων μετάδοσης ορίζεται ως

$$P_i(\boldsymbol{\rho}_i)=\{\boldsymbol{\rho}_i=[p_i^{(1)}p_i^{(2)}]^T:0\leq p_i^{(1)},p_i^{(2)}\leq 1\} \tag{2.11}$$

υπό τους περιορισμούς

$$p_i^{(1)}=0\Rightarrow p_i^{(2)}>0,p_i^{(2)}=0\Rightarrow p_i^{(1)}>0,p_i^{(2)}=0\Rightarrow p_j^{(2)}>0 \tag{2.12}$$

Υποθέτοντας ότι η κατάσταση του συστήματος κατά τη χρονοσχισμή *t* περιγράφεται από μια μεταβλητή S (t) που παίρνει τιμές στο σύνολο S = {S1, S2, S3, S4} = {(0, 0), (1 , 0), (0, 1), (1, 1)}, όπου κάθε παρένθεση περιγράφει το υπόλοιπο των δύο πομπών (1 σημαίνει ότι ο πομπός έχει ένα πακέτο για μετάδοση, ενώ το 0 σημαίνει ότι δεν έχει), το όφελος μοντελοποιείται ως

$$R_i(\boldsymbol{p})=\pi_{q(i)}(\boldsymbol{p})p_i^{(1)}\rho^{(1)}+\pi_4(\boldsymbol{p})[p_i^{(2)}(1-p_j^{(2)})\rho^{(1)}+p_i^{(2)}p_j^{(2)}\rho^{(2)} \tag{2.13}$$

όπου q(1) = 2, q(2) = 3 και $\pi_{q(i)}(\mathbf{p})$ = P [S(t) = S_k], k = 1, 2, 3, 4 οι πιθανότητες σταθερής κατάστασης.

2.2.5 Στρώμα Δικτύου

Οι λειτουργίες του στρώματος δικτύου περιλαμβάνουν τη δημιουργία διαδρομών και την προώθηση των πακέτων κατά μήκος των διαδρομών. Στις περισσότερες περιπτώσεις η θεωρία παιγνίων μπορεί να εφαρμοστεί για να βοηθήσει έναν κόμβο να προσδιορίσει ποια είναι η βέλτιστη διαδρομή ή να αποφασίσει εάν θα πρέπει να προωθήσει ένα πακέτο ή όχι. Η θεωρία παιγνίων είναι ένα πολύτιμο πλεονέκτημα στο πλαίσιο αυτό διότι ότι οι κόμβοι πρέπει να αποφασίσουν μεμονωμένα σχετικά με τις δράσεις τους, διατηρώντας παράλληλα τη γνώση για τη συμπεριφορά των άλλων. Δεδομένου ότι κάθε κόμβος επιθυμεί να διατηρήσει την ενέργειά του, προκειμένου να είναι σε θέση να στείλει όσο το δυνατόν περισσότερη κίνηση, το να προωθήσει ένα πακέτο για άλλο κόμβο δεν είναι ορθολογικό, τουλάχιστον με την πρώτη ματιά.

2.2.5.1 Δρομολόγηση και Προώθηση Πακέτων

Τα παίγνια που διατυπώνονται εδώ είναι μη συνεργατικά και λαμβάνουν χώρα μεταξύ δύο κόμβων, που συμβολίζονται ως *i* και *-i*. Παραλλαγές όπως τα Min-Max παίγνια ή παίγνια συμφόρησης αναφέρονται επίσης στην αναφορά [33]. Στο πρόβλημα δρομολόγησης οι κόμβοι –πηγές μπορούν να θεωρηθούν ως οι παίκτες στο παιχνίδι. Η δράση που διατίθεται σε κάθε παίκτη είναι το σύνολο όλων των πιθανών διαδρομών από την πηγή στον προορισμό. Στα ασύρματα ad hoc δίκτυα για παράδειγμα, οι κόμβοι επικοινωνούν με μακρινούς προορισμούς χρησιμοποιώντας ενδιάμεσους κόμβους για αναμετάδοση. Δεδομένου ότι οι ασύρματοι κόμβοι έχουν περιορισμένη ενέργεια, μπορεί να μην είναι προς το συμφέρον ενός κόμβου να δέχεται πάντα αιτήσεις αναμετάδοσης. Από την άλλη πλευρά, αν όλοι οι κόμβοι αποφασίσουν να μην καταναλώνουν ενέργεια για αναμετάδοση, τότε η συνολική απόδοση του δικτύου θα μειωθεί δραματικά. Για το λόγο αυτό, ad hoc και peer-to-peer δίκτυα λειτουργούν ενίοτε εθελοντικά ως δίκτυα διαμοιραζόμενων πόρων, βασιζόμενα στην προθυμία των χρηστών να ξοδέψουν τους δικούς τους πόρους για το κοινό καλό [34]. Στο [35] η συνάρτηση χρησιμότητας ενός τέτοιου παιχνιδιού διαμορφώνεται ως $U_j(s) = a_j(s) + \beta_j(s)$, όπου $a_j(s) = a_j(\sum_{i \in N, i \neq j} s_i)$ είναι το όφελος (ή το κόστος) ενός χρήστη που προήλθε από την κοινή χρήση των πόρων των άλλων και $\beta_j(s) = \beta_j(s_j)$ είναι το όφελος (ή το κόστος) που προήλθε από την κοινή χρήση των πόρων ενός χρήστη από τους άλλους ,όπου s είναι η κοινή δράση από όλους τους παίκτες (s = 0 κοινή χρήση και s = 1, μη κοινή χρήση).

Το τελευταίο μπορεί να είναι αρνητικό, δεδομένου ότι μπορεί να υπάρχει κόστος λόγω συμμετοχής στο δίκτυο (όπως η ταχύτερη εξάντληση των ενεργειακών πόρων ενός κόμβου) ή θετικό, αν υπάρχουν οικονομικά κίνητρα για συμμετοχή ή αν ο χρήστης αντλεί ικανοποίηση με αυτό τον τρόπο.

Όσον αφορά τα παίγνια προώθησης, μια ευρεία ποικιλία συναρτήσεων ωφέλειας έχει προταθεί στο πλαίσιο αυτό. Στην πλειονότητά τους θεωρούνται μετρικές όπως το ποσοστό προώθησης ενός κόμβου και η κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα στο πρωτόκολλο DARWIN [36], δεδομένου ότι α είναι η ανταμοιβή που λαμβάνει ένας κόμβος για την προώθηση ενός πακέτου και p_i είναι η πιθανότητα ότι ο κόμβος i χάνει ένα πακέτο, η απόδοση είναι

$$u_i = 1 + \frac{1}{2a-1} p_i - \frac{2a}{2a-1} p_{-i} \tag{2.14}$$

2.2.6 Στρώμα Μεταφοράς

Στο στρώμα μεταφοράς τα παιγνιοθεωρητικά μοντέλα αναπτύχθηκαν κυρίως για την ανάλυση της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων ελέγχου συμφόρησης. Ο έλεγχος αποφυγής συμφόρησης αφορά τον έλεγχο του φορτίου του δικτύου, περιορίζοντας την αποδοχή των συνεδριών νέων χρηστών και επιλύοντας τις ανεπιθύμητες καταστάσεις υπερφόρτωσης, όπως θα εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 2.3.

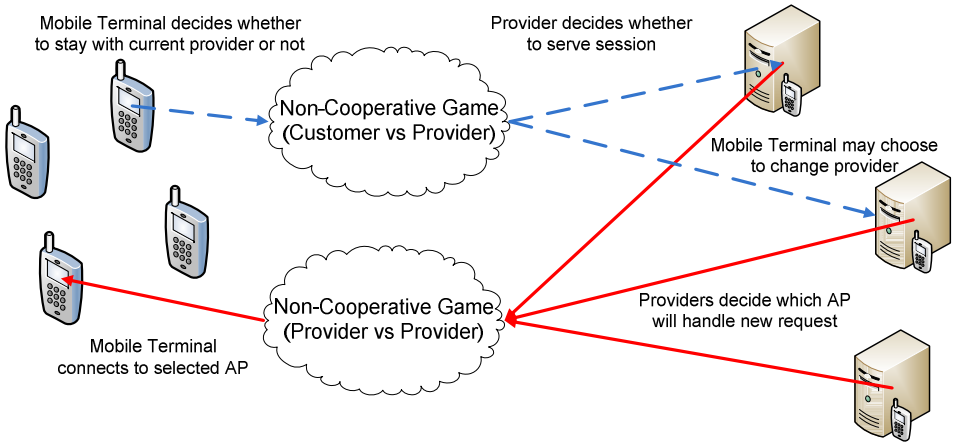
2.2.6.1 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Ο έλεγχος αποδοχής γίνεται κάθε φορά που μια νέα αίτηση συνεδρίας λαμβάνεται και αποφασίζει κατά πόσον θα πρέπει να διατεθούν πόροι ή να απορριφθεί λόγω έλλειψης πόρων. Βασικός στόχος του σε κυψελωτά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας είναι να ελέγχει την αποδοχή νέων συνεδριών στο δίκτυο με στόχο τη διατήρηση του φορτίου του δικτύου σε ορισμένα όρια. Η Εικόνα 2.2 απεικονίζει δύο διαφορετικούς τύπους αυτού του είδους παιγνίων οι οποίοι διακρίνονται:

1) *Πάροχος εναντίον παρόχου (Provider vs Provider):* Σε αυτό το είδος των παιγνίων τα δίκτυα αποτελούν τους παίκτες. Ως μεμονωμένοι παίκτες, τα δίκτυα πρόσβασης θα προσπαθήσουν να επιλέξουν το αίτημα που ταιριάζει καλύτερα στα χαρακτηριστικά τους. Ένα τέτοιο παιχνίδι μπορεί να παίζεται σε γύρους. Σε κάθε γύρο του παιγνίου τα δίκτυα πρέπει να αποφασίσουν ποιο αίτημα θα μεγιστοποιήσει το όφελός τους και στη συνέχεια να το επιλέξουν. Μόλις το αίτημα επιλεχθεί αφαιρείται από το σύνολο των αιτήσεων παροχής υπηρεσιών και το παιχνίδι επαναλαμβάνεται, έως

ότου όλα τα αιτήματα επιλεχθούν. Η μοντελοποίηση αυτού του παιγνίου θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2.4 της παρούσης διατριβής.

2) *Πελάτης εναντίον παρόχου (Customer vs Provider):* Ο κύριος στόχος αυτών των παιγνίων είναι να μεγιστοποιήσουν όχι μόνο την QoS που προσφέρεται στους πελάτες, αλλά και το κέρδος του παρόχου, επομένως προσπαθούν να πετύχουν την εξισορρόπηση των συμφερόντων των δύο πλευρών. Η μοντελοποίηση αυτού του παιγνίου θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 2.5 της παρούσης διατριβής.



Εικόνα 2.2. Παίγνια ελέγχου αποδοχής κλήσεων

2.2.6.2 Έλεγχος Φορτίου

Το σύστημα που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.5 για τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων έχει επίσης επεκταθεί και για τον έλεγχο φορτίου. Η κύρια διαφορά είναι ότι αυτό το παίγνιο παίζεται περιοδικά, ενώ οι συνεδρίες εκτελούνται. Μέσω αυτής της διαδικασίας είναι δυνατόν να τερματιστούν συνεδρίες που καταναλώνουν άπληστα τους πόρους του συστήματος, που προκαλούν με αυτόν τον τρόπο υποβάθμιση του QoS που προσφέρεται στους υπόλοιπους πελάτες και μειώνουν έτσι τα συνολικά έσοδα του παρόχου.

2.2.6.3 Επιλογή Κυψέλης

Ο στόχος των διαδικασιών επιλογής κυψέλης είναι ο καθορισμός του βέλτιστου σταθμού βάσης. Ο Gao [37], διατύπωσε το πρόβλημα επιλογής κυψέλης ως παίγνιο δύο βαθμίδων. Στην πρώτη βαθμίδα, δηλαδή, στο διακυψελικό παίγνιο, τα κινητά επιλέγουν την κυψέλη, σύμφωνα με τη βέλτιστη στρατηγική επιλογή κυψελών που προέρχεται από το αναμενόμενο όφελος. Στη δεύτερη βαθμίδα, δηλαδή, σε ενδοκυψελικό παίγνιο, το κινητό επιλέγει την κατάλληλη συχνότητα από τους πόρους της κυψέλης στην οποία εξυπηρετείται για να επιτύχει το μέγιστο όφελος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.3: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ

2.3.1 Έλεγχος Αποφυγής Συμφόρησης

Τα ασύρματα δίκτυα έχουν περιορισμένους διαθέσιμους ραδιοπόρους και θα πρέπει να διαχειρίζονται πολύ προσεκτικά ώστε να λειτουργούν σε ομαλές καταστάσεις, διασφαλίζοντας το ότι οι χρήστες θα λαμβάνουν την βέλτιστη δυνατή ποιότητα υπηρεσίας για την υπηρεσία που έχουν ζητήσει. Λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων πόρων έχουν καθοριστεί στρατηγικές διαχείρισης πόρων, οι οποίες όχι μόνο διασφαλίζουν τις συμφωνίες ποιότητος υπηρεσιών (QoS agreements) με τους χρήστες, αλλά επίσης και το ότι οι χρήστες δε θα παραβιάζουν αυτές τις συμφωνίες από τη δική τους μεριά. Για παράδειγμα, όταν υπάρχουν πολλοί χρήστες συνδεδεμένοι στο δίκτυο και αυτοί παραβιάζουν τις συμφωνίες QoS λαμβάνοντας καλύτερη ποιότητα από ότι θα έπρεπε, τότε το δίκτυο θα υπερφορτωθεί και θα δημιουργηθεί συμφόρηση. Οι καταστάσεις συμφόρησης είναι πολύ επικίνδυνες για ένα δίκτυο, επειδή προκαλούν πολλά προβλήματα από την πλευρά του δικτύου, όπως αυξημένες παρεμβολές, απώλειες πακέτων, χαμηλή διαθεσιμότητα εύρους ζώνης, αλλά και από την πλευρά του χρήστη, αφού μειώνεται η ποιότητα της λαμβανόμενης υπηρεσίας, λόγω έλλειψης διαθέσιμων πόρων, με αποτέλεσμα την δυσφορία του χρήστη.

Οι καταστάσεις συμφόρησης μπορούν να αποφευχθούν εφαρμόζοντας μια ομάδα μηχανισμών που εργάζονται προς αυτή την κατεύθυνση. Αυτή η ομάδα μηχανισμών καλείται ως μηχανισμός ελέγχου αποφυγής συμφόρησης (Congestion Avoidance Control – CAC), ο οποίος έχει την πολύ σημαντική εργασία του ελέγχου του φορτίου του δικτύου, περιορίζοντας την αποδοχή νέων χρηστών και επιλύοντας ανεπιθύμητες καταστάσεις υπερφόρτωσης. Ο μηχανισμός ελέγχου αποφυγής συμφόρησης αποτελείται από δυο επιμέρους μηχανισμούς:

- *Έλεγχος αποδοχής κλήσεων (call admission control),* ο οποίος είναι ο μηχανισμός που λαμβάνει αιτήσεις για νέες ροές κίνησης (είτε από νέους είτε από ήδη υπάρχοντες χρήστες) και ελέγχει πρώτα αν αυτοί είναι πιστοποιημένοι στο δίκτυο και έπειτα αν το δίκτυο έχει διαθέσιμους τους απαραίτητους πόρους για την αποδοχή της νέας ροής, βασιζόμενο στο είδος της υπηρεσίας που ζητήθηκε και τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης υπηρεσίας.
- *Έλεγχος φορτίου (load control)* ή έλεγχος συμφόρησης (congestion control), που είναι ο μηχανισμός που ελέγχει το φορτίο του δικτύου επιβλέποντας το φορτίο σε κάθε κυψέλη και ενεργώντας κατάλληλα όταν το φορτίο έχει υπερβεί κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι.

Οι μηχανισμοί ελέγχου αποδοχής και ελέγχου φορτίου είναι δυο μηχανισμοί άρρηκτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους και οι οποίοι αλληλοσυμπληρώνονται. Η διαδικασία του αλγορίθμου αποδοχής περιλαμβάνει επίσης ένα βήμα ελέγχου συμφόρησης, όταν θα πρέπει να γίνει "οπωσδήποτε" αποδεκτή η νέα αίτηση, αλλά δεν υπάρχουν οι διαθέσιμοι πόροι, οπότε θα πρέπει να μετριαστούν οι πόροι που λαμβάνουν κάποιοι άλλοι χρήστες "λιγότερο σημαντικοί", ώστε να εξοικονομηθούν οι απαραίτητοι πόροι για τη νέα αίτηση. Επίσης, ο έλεγχος συμφόρησης επικοινωνεί με τον έλεγχο αποδοχής για να απορριφθούν νέες αιτήσεις όταν έχει παρατηρηθεί υπερφόρτωση. Ο συνδυασμός των δυο αυτών μηχανισμών μπορεί να βελτιστοποιήσει την απόδοση του δικτύου.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο μηχανισμών είναι ξεκάθαρη, αφού ο έλεγχος αποδοχής δέχεται νέους χρήστες στο δίκτυο με αποτέλεσμα την αύξηση του φορτίου του δικτύου, ενώ ο έλεγχος φορτίου παρακολουθεί συνεχώς το φορτίο του δικτύου για να εντοπίσει καταστάσεις υπερφόρτωσης. Ο έλεγχος φορτίου όταν εντοπίσει μια κατάσταση υπερφόρτωσης στέλνει μηνύματα στον έλεγχο αποδοχής να απορρίψει νέες αιτήσεις ροών κίνησης μέχρι να αντιμετωπιστεί η υπερφόρτωση, ενώ ο έλεγχος αποδοχής στέλνει μηνύματα αντιμετώπισης υπερφόρτωσης όταν θα πρέπει να εισαχθεί οπωσδήποτε μια νέα ροή κίνησης στο δίκτυο και δεν υπάρχουν οι απαραίτητοι πόροι που ζητάει.

2.3.2 Έλεγχος Αποδοχής Κλήσεων

Ο έλεγχος αποδοχής είναι ένας μηχανισμός κλειδί για τη διαχείριση ασύρματων πόρων και διασφαλίζει την ομαλή λειτουργία ενός δικτύου με την αποδοχή ή την απόρριψη νέων αιτήσεων χρηστών βασιζόμενος σε κριτήρια, όπως το φορτίο του δικτύου. Σε γενικές γραμμές ο μηχανισμός ελέγχου αποδοχής διασφαλίζει ότι η αποδοχή μιας νέας ροής σε ένα περιορισμένων πόρων δίκτυο δεν παραβιάζει τις δεσμεύσεις υπηρεσιών που έχουν γίνει από το δίκτυο στις ήδη αποδεκτές ροές. Τα σχήματα ελέγχου αποδοχής είναι τα μέρη λήψης αποφάσεων του δικτύου με στόχο να παρέχουν στους χρήστες υπηρεσίες με εγγυημένη ποιότητα, έτσι ώστε να μειωθεί η συμφόρηση του δικτύου και η πιθανότητα διακοπής κλήσεων και να επιτευχθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη χρησιμοποίηση των πόρων.

Ο έλεγχος αποδοχής εξετάζει γενικά την αποδοχή ή μη καινούριων αιτήσεων είτε αυτές προέρχονται από νέους είτε από εκ διαπομπής χρήστες. Η βασική λειτουργία ενός αποδοτικού ελέγχου αποδοχής είναι να αποφασίσει σε κάποια δεδομένη χρονική στιγμή αν κάποιο δίκτυο και κάποια συγκεκριμένη μορφή και κυψέλη έχει τους απαραίτητους πόρους ώστε να εξυπηρετήσει με συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας μια νέα ροή κίνησης από ένα συγκεκριμένο χρήστη. Οι αποφάσεις του ελέγχου αποδοχής πρέπει να λαμβάνονται πολύ προσεκτικά, ώστε να αποφεύγονται ή να ελαχιστοποιούνται τα δυο παρακάτω γεγονότα [38]:

- *Λάθος απορρίψεις*, οι οποίες συμβαίνουν όταν ο αλγόριθμος απορρίπτει μια νέα ροή κίνησης, ενώ υπάρχει κάποια κυψέλη/μορφή ή κάποιο δίκτυο που να έχει τους απαραίτητους πόρους, ώστε να μπορεί να εξυπηρετεί το χρήστη και να του προσφέρει την ποιότητα της υπηρεσίας, ανάλογα και με τις απαιτήσεις σε ποιότητα της υπηρεσίας αυτής. Σε αυτή την περίπτωση η χωρητικότητα του συστήματος δεν βελτιστοποιείται και το κέρδος του διαχειριστή του δικτύου.
- *Λάθος αποδοχές*, οι οποίες συμβαίνουν όταν ο αλγόριθμος δέχεται μια ροή κίνησης, ενώ δεν υπάρχει η απαραίτητη διαθέσιμη χωρητικότητα για να εξυπηρετήσει το συγκεκριμένο χρήστη με την ποιότητα υπηρεσίας που απαιτεί η υπηρεσία που ζήτησε. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπερφορτωθεί το δίκτυο και η ποιότητα υπηρεσίας που να λαμβάνουν οι χρήστες να είναι πολύ χαμηλότερη από την πρέπουσα, με αποτέλεσμα την δυσαρέσκεια των χρηστών.

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχουν διατυπωθεί ποικίλες απόψεις για σχεδιασμό και ανάλυση αποδοτικότητας αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Παρόλα αυτά, το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά σύνθετο στην περίπτωση των ασυρμάτων δικτύων εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως η παρεμβολή πολλαπλής πρόσβασης, οι απώλειες καναλιού, οι απαιτήσεις διαπομπών και το περιορισμένο εύρος ζώνης. Μια πλήρης κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων ελέγχου αποδοχής κλήσεων μπορεί να βρεθεί στην αναφορά [39]. Στην πρώτη και δεύτερη γενιά δικτύων, ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων αναπτύχθηκε για περιβάλλοντα μίας μόνο υπηρεσίας. Ωστόσο, στα δίκτυα τρίτης γενιάς, εξαιτίας της ετερογένειας των προσφερόμενων υπηρεσιών όσον αφορά τις απαιτήσεις του χρήστη, έχουν υιοθετηθεί διάφορα προφίλ ποιότητας υπηρεσίας (QoS profiles), γεγονός που οδηγεί αναπόφευκτα σε πιο πολύπλοκους μηχανισμούς [39].

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε εν συντομία μερικές βασικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Αρχικά θα εξετάσουμε την περίπτωση που ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων βασίζεται στην ποιότητα του σήματος. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή μια νέα αίτηση γίνεται δεκτή μόνο αν ο σηματοθορυβικός λόγος (Signal Interference Ratio - SIR) ξεπερνάει μια ελάχιστη τιμή [40][41][42]. Η εναπομένουσα χωρητικότητα R_k (εξίσωση 2.1) μιας κυψέλης *k* υπολογίζεται περιοδικά και όταν ένας νέος χρήστης εισέρχεται ελέγχεται κατά πόσο η R_k είναι μεγαλύτερη από το μηδέν. Αν είναι, τότε η νέα κλήση γίνεται δεκτή, αλλιώς απορρίπτεται.

$$R_k = \begin{cases} \left\lfloor \dfrac{1}{SIR_{TH}} - \dfrac{1}{SIR_k} \right\rfloor & ,if \left\lfloor \dfrac{1}{SIR_{TH}} - \dfrac{1}{SIR_k} \right\rfloor > 0 \\ 0 & ,otherwise \end{cases} \tag{2.15}$$

Στην προηγούμενη σχέση το SIR_k είναι το μετρούμενο SIR στην κυψέλη k και SIR_{TH} είναι το κατώφλι. Μια επέκταση της προσέγγισης αυτής υιοθετεί τη χρήση του παράγοντα παρεμβολής μεταξύ γειτονικών κυψελών β ως

$$R_k = \begin{Bmatrix} \min\{R_k^{(j)} \mid j \in \kappa(k)\} & ,if\ \min\{R_k^{(j)} \mid j \in \kappa(k)\} > 0 \\ 0 & ,otherwise \end{Bmatrix} \tag{2.16}$$

όπου $$R_k^{(j)} = \begin{Bmatrix} \left\lfloor \frac{1}{SIR_{TH}} - \frac{1}{SIR_k} \right\rfloor & ,if\ j = k \\ \left\lfloor \frac{1}{\beta}\left(\frac{1}{SIR_{TH}} - \frac{1}{SIR_k}\right) \right\rfloor & ,if\ j \neq k \end{Bmatrix} \tag{2.17}$$

όπου $\kappa(k)$είναι ένα υποσύνολο που περιέχει την κυψέλη k και τις γειτονικές της κυψέλες. Ορισμένες προσεγγίσεις αποδέχονται κλήσεις με τιμή SIR που εξασφαλίζει πιθανότητα αποκλεισμού (blocking probability) κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι, όπου $P_{BLK}(k) = Pr\{R_k = 0\}$. Από την άλλη πλευρά, προσεγγίσεις που βασίζονται στο εύρος ζώνης εκφράζουν την απαίτηση για SIR ως

$$\mathrm{P}(\mathrm{I} > \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{R}}) < \mathrm{L} \tag{2.18}$$

όπου W είναι το εύρος ζώνης του συστήματος, R είναι ο ρυθμός μετάδοσης και L είναι μια παράμετρος συστήματος που καθορίζει την αξιοπιστία της ποιότητας σήματος.

2.3.3 Έλεγχος Φορτίου

Οι αλγόριθμοι ελέγχου αποδοχής είναι σχεδιασμένοι ώστε να λαμβάνουν αποφάσεις για νέες αιτήσεις ροών κίνησης, με βασικό κριτήριο να μην υπερφορτώνεται το δίκτυο, δηλαδή το φορτίο να παραμένει κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Παρόλα αυτά, επειδή οι αλγόριθμοι του ελέγχου αποδοχής δεν λειτουργούν πάντα σωστά επειδή δεν είναι σωστά σχεδιασμένοι ή για οποιονδήποτε άλλο λόγο (π.χ. χρήστες να υπερβαίνουν την ποιότητα υπηρεσίας που τους αντιστοιχεί), υπάρχει το συχνό φαινόμενο το φορτίο του δικτύου να ξεπερνάει το κατώφλι, οπότε να υπερφορτώνεται το δίκτυο. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρεμβαίνει ο αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης, ώστε να αντιμετωπίσει τα αίτια που προκαλούν την υπερφόρτωση. Η συμφόρηση το δικτύου είναι μια πολύ κρίσιμη κατάσταση και έχει μέγιστη προτεραιότητα, δεδομένου και των όλο και αυξανόμενων μεγέθους, ζήτησης και ταχύτητας (σε ρυθμό μετάδοσης) των νέων ολοκληρωμένων δικτύων υπηρεσιών. Ο σχεδιασμός αποδοτικών στρατηγικών ελέγχου συμφόρησης για μελλοντικά δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών θεωρείται αρκετά δύσκολος λόγω της πολυπλοκότητας της δομής των δικτύων, της φύσεως των μελλοντικών υπηρεσιών που θα παρέχονται μέσω του δικτύου, καθώς και της ποικιλίας των δυναμικών παραμέτρων που εμπλέκονται.

Σύμφωνα με ορισμό (ITU-T: Rec. I.371) της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union – ITU), συμφόρηση είναι μια κατάσταση των στοιχείων του δικτύου στην οποία το δίκτυο δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσει τους συμφωνημένους στόχους απόδοσης για τις ήδη εγκατεστημένες συνδέσεις ή/και για νέες αιτήσεις σύνδεσης. Ο έλεγχος συμφόρησης (κατά τον ίδιο ορισμό) είναι μια λίστα από ενέργειες που λαμβάνονται από το δίκτυο, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η ένταση, η εξάπλωση και η διάρκεια της συμφόρησης. Είναι ένα πρωτόκολλο του δικτύου που εντοπίζει και επιλύει καταστάσεις συμφόρησης [38].

Το βασικό αποτέλεσμα ενός συμφορημένου δικτύου είναι η μείωση της απόδοσής του. Οι χρήστες βιώνουν μεγάλες καθυστερήσεις στην παράδοση των πακέτων, καθώς και πολλές απώλειες που προκαλούνται από υπερχείλιση των buffers. Σε κατάσταση συμφόρησης οι τιμές της καθυστέρησης και της χρονικής μεταβολής της καθυστέρησης είναι πολύ ψηλές και η δυνατότητα διεκπεραίωσης του δικτύου μπορεί να είναι μηδενική ή πολύ κοντά στο μηδέν. Η μείωση της απόδοσης του δικτύου, οι καθυστερήσεις και οι απώλειες πακέτων έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση κατά πολύ της διαθέσιμης χωρητικότητας του συστήματος, μιας και καταναλώνονται αρκετοί πόροι για την επαναμετάδοση των χαμένων πακέτων.

Ένας αποδοτικός μηχανισμός ελέγχου φορτίου θα πρέπει πρώτα απ' όλα να είναι προληπτικός ώστε να αποφεύγονται καταστάσεις συμφόρησης. Μιας και είναι σχεδόν απίθανο να μην υπάρξουν τέτοιες καταστάσεις, ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης θα πρέπει να είναι σχεδιασμένος ώστε να δρα πολύ γρήγορα και να ελαχιστοποιεί την διάρκεια και την ένταση της συμφόρησης και να επαναφέρει το φορτίο σε τιμές κανονικής λειτουργίας.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι ώστε να παρατηρηθεί ή να εντοπιστεί μια κατάσταση συμφόρησης στο δίκτυο [38]:

- Απώλεια πακέτων (packet loss), που μπορεί να παρατηρηθεί στις ουρές από υπερχείλιση, στον προορισμό από τον αύξοντα αριθμό των πακέτων και να γίνει αντιληπτή από τον χρήστη ή από τον αποστολέα λόγω έλλειψης των επιβεβαιώσεων (acknowledgements) που αποδεικνύει τις απώλειες.
- Καθυστέρηση πακέτων (packet delay), που μπορεί να εξαχθεί από το μέγεθος της ουράς, να παρατηρηθεί από τον προορισμό και να επιβεβαιωθεί στο χρήστη (π.χ. χρησιμοποιώντας σφραγίδες χρόνου στις επικεφαλίδες των πακέτων) ή να παρατηρηθεί από τον αποστολέα από πακέτα που μετρούν το χρόνο κυκλικού ταξιδίου (Round Trip Time – RTT)
- Απώλειες σε ρυθμοαπόδοση (loss of throughput), που μπορεί να παρατηρηθεί από το μέγεθος της ουράς του αποστολέα και το χρόνο παραμονής στην ουρά.
- Άλλα γεγονότα όπως αυξημένο μέγεθος ουράς δικτύου και η αύξησή της ή εισροή ουράς και η επίδρασή της στη μελλοντική συμπεριφορά της ουράς.

Στα ασύρματα δίκτυα το πιο διαδεδομένο κριτήριο για τον έλεγχο φορτίου είναι επίσης η ισχύς του σήματος, αφού η λαμβανόμενη ισχύς πρέπει να ξεπερνάει ένα κατώφλι προκειμένου οι χρήστες να μπορούν να συνδεθούν στα σημεία πρόσβασης (Access Points – Aps). Ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα σημείο πρόσβασης, καθώς και ο τύπος της κίνησης, παίζουν καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό του μέγιστου φορτίου που μπορεί να υποστηριχθεί από ένα σύστημα. Γενικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο κριτήρια για να αποφασιστεί κατά πόσο μια αίτηση πρέπει να γίνει αποδεκτή ή όχι [43][44]. Το πρώτο περιλαμβάνει το λόγο Relative Occupied Bandwidth (ROB) που υπολογίζεται ως [45]

$$B_{occu} = \frac{T_{busy}}{T} \cdot 100 \tag{2.19}$$

όπου T είναι ένα παράθυρο χρόνου και T_{busy} είναι ο χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου είναι κατειλημμένο το ασύρματο μέσο. Με άλλα λόγια ο δείκτης ROB εκφράζει το ποσοστό χρησιμοποίησης του ασύρματου μέσου σε μια συγκεκριμένη χρονική διάρκεια.

Το δεύτερο κριτήριο περιλαμβάνει το λόγο Average Collision Time (ACT), που μετράει το μέσο ρυθμό συγκρούσεων σε μια περίοδο T ως [45]

$$R_c = \frac{N_c}{N_t} \tag{2.20}$$

όπου N_c είναι ο αριθμός των συγκρούσεων και N_t είναι ο αριθμός όλων των μεταδόσεων. Άλλοι αλγόριθμοι ελέγχου φορτίου βασίζονται στη συνολική ρυθμοαπόδοση. Για παράδειγμα, στα συστήματα WCDMA μια νέα σύνδεση απορρίπτεται αν ισχύει η παρακάτω συνθήκη στην άνω ζεύξη [46][47][48]

$$n_{ul} + \Delta L > n_{ul,threshold}, \text{όπου } n_{ul} = \frac{\mathrm{E}_b / N_o}{W / R} \cdot N \cdot u \cdot (1+i) \tag{2.21}$$

όπου n_{ul} είναι ο παράγοντας φορτίου, η E_b / N_o ενέργεια/bit, N ο αριθμός των χρηστών στην κυψέλη, $i = \frac{other\ cell\ interference}{own\ cell\ interference}$, R το bit rate και u ο παράγοντας δραστηριότητας. Παρόμοια, η συνθήκη για την κάτω ζεύξη είναι

$$n_{dl} + \Delta L > n_{dl,threshold}, \text{όπου } n_{dl} = \sum_{j=1}^{N} u_j \frac{(\mathrm{E}_b / N_o)_j}{W / R_j} \cdot [(1-a_j) + i_j)] \tag{2.22}$$

όπου n_{dl} είναι ο παράγοντας φορτίου και α ο παράγοντας ορθογωνικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.4: ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΜΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΠΑΙΓΝΙΑ

2.4.1 Μοντελοποίηση Παιγνίου Αποδοχής Κλήσεων

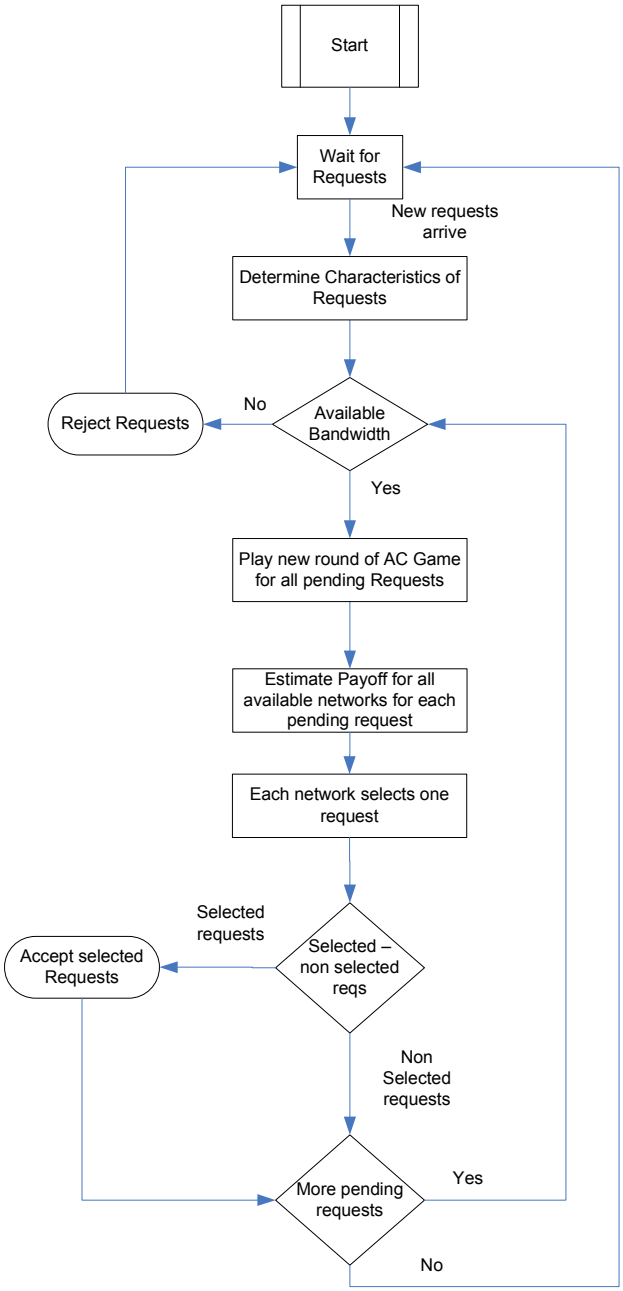
Όπως επεξηγήθηκε στο πρώτο μέρος της παρούσης διατριβής, όταν οι απαιτήσεις μιας υπηρεσίας μπορούν να καλυφτούν ταυτόχρονα από διαφορετικές τεχνολογίες ραδιοπρόσβασης απαιτείται η επιλογή της πιο κατάλληλης τεχνολογίας. Στο κεφάλαιο αυτό θα μοντελοποιηθεί το πρόβλημα αποδοχής κλήσεων σε ασύρματα δίκτυα ως μη συνεργατικό παίγνιο [49][50][51]. Στόχος είναι να κατανεμηθεί με βέλτιστο τρόπο ένα σύνολο αιτήσεων ανάμεσα σε έναν αριθμό δικτύων πρόσβασης. Υποθέτουμε αρχικά ότι έχουμε δύο διαθέσιμα δίκτυα πρόσβασης και ότι όλες οι αιτήσεις υπηρεσιών (service requests) μπορούν να εξυπηρετηθούν από οποιοδήποτε δίκτυο.

Στο προτεινόμενο παίγνιο τα δίκτυα αποτελούν τους παίκτες, οι οποίοι προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν την απόδοσή τους. Το παίγνιο είναι μη συνεργατικό, αφού οι παίκτες δρουν εγωιστικά και δεν μπορούν να συνάψουν συμμαχίες με άλλους παίκτες. Το παίγνιο αποδοχής κλήσεων ενεργοποιείται κάθε φορά που πραγματοποιούνται ταυτόχρονα πολλαπλές αιτήσεις υπηρεσιών. Κάθε δίκτυο πρέπει στη συνέχεια να αποφασίσει κατά πόσο μπορεί να εξυπηρετήσει κάθε αίτηση με βάση τους διαθέσιμους πόρους. Το παίγνιο απεικονίζεται στην Εικόνα 2.3.

Υποθέτουμε ότι υπάρχουν N αιτήσεις και M διαθέσιμα δίκτυα. Κάθε αίτηση μπορεί να ανήκει σε οποιαδήποτε κλάση υπηρεσιών και επίπεδο προτεραιότητας. Επίσης m είναι ο αριθμός των διαφορετικών κλάσεων υπηρεσιών και k ο αριθμός των επιπέδων προτεραιότητας που μπορεί να φέρει ένας χρήστης. Με $n(t)_i$ συμβολίζουμε τον αριθμό των χρηστών που εξυπηρετούνται από το δίκτυο i τη χρονική στιγμή t, $1 \leq i \leq M$. Τέλος, ο κάθε χρήστης μπορεί να εξυπηρετείται μόνο από ένα δίκτυο σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή $\sum_{i=1}^{M} n(t)_i = N$.

Το παίγνιο αποδοχής κλήσεων μπορεί επομένως να μοντελοποιηθεί ως $G = (P, A, S_i, \pi_{ij})$, όπου:

- $P = \{1, \ldots, M\}$ είναι το σύνολο των παικτών, δηλαδή τα δίκτυα πρόσβασης
- $A = \{1,\ldots,N\}$ είναι οι διαθέσιμοι πόροι προς κατανομή, δηλαδή οι αιτήσεις υπηρεσιών
- S_i είναι το σύνολο όλων των στρατηγικών του παίκτη i
- π_{ij} είναι η απόδοση του παίκτη i αν διαλέξει την αίτηση j.



Εικόνα 2.3. Παίγνιο αποδοχής κλήσεων

Το παίγνιο παίζεται σε γύρους. Σε κάθε γύρο τα δίκτυα επιλέγουν την αίτηση που μεγιστοποιεί την απόδοσή τους. Αφού μια αίτηση επιλεχτεί, τότε αφαιρείται από το σύνολο των διαθέσιμων αιτήσεων και το παίγνιο επαναλαμβάνεται μέχρι να έχουν κατανεμηθεί όλες οι αιτήσεις. Σε περίπτωση συγκρούσεων, δηλαδή όταν δύο δίκτυα επιλέγουν την ίδια αίτηση, επιλέγουμε να αναθέσουμε την αίτηση στο δίκτυο με την υψηλότερη απόδοση, ενώ ο γύρος τελειώνει χωρίς να απομακρυνθεί δεύτερη αίτηση από τη λίστα. Επίσης, στην περίπτωση πολλαπλών ισορροπιών κατά Nash, υποθέτουμε για λόγους απλότητας ότι το πρώτο δίκτυο θα επιλέγει την αίτηση με το μικρότερο αύξοντα αριθμό, ενώ το δεύτερο αυτή με το μεγαλύτερο. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούνται οι συγκρούσεις.

2.4.2 Υπολογισμός των Αποδόσεων

Προκειμένου να εξαχθούν οι προτιμήσεις των χρηστών αλλά και να επιτευχθεί βέλτιστη κατανομή των αιτήσεων, λαμβάνονται υπόψη οι εξής δύο παράμετροι:

- Η αποδοτικότητα του δικτύου (network efficiency), η οποία λαμβάνεται ίση με την τιμή GRC που χαρακτηρίζει κάθε δίκτυο. Η μεθοδολογία εξαγωγής της τιμής GRC περιγράφηκε στα [52][53] και στις Ενότητες 1.2.4 και 1.3.1. Ως γνωστόν, όσο υψηλότερη είναι αυτή η τιμή, τόσο πιο ικανό είναι το δίκτυο να προσφέρει την απαραίτητη ποιότητα υπηρεσίας. Επίσης, αιτήσεις του ίδιου τύπου υπηρεσιών έχουν την ίδια τιμή GRC.
- Η χωρητικότητα του δικτύου (network capacity), η οποία δείχνει την τωρινή ικανότητα του δικτύου να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις της υπηρεσίας. Τα μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη είναι το διαθέσιμο και το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Πιο συγκεκριμένα, ως χωρητικότητα του δικτύου θεωρούμε το λόγο των παραπάνω μεγεθών. Προφανώς όσο μεγαλύτερος είναι αυτός ο λόγος τόσο θα πρέπει να αυξάνεται η απόδοση του δικτύου.

Με βάση τα παραπάνω, η απόδοση, που εδώ ονομάζεται προτίμηση δικτύου, λαμβάνεται ως το γινόμενο της αποδοτικότητας επί τη χωρητικότητα του δικτύου, δηλαδή Network Preference = Network Efficiency x Network Capacity. Άρα η απόδοση του δικτύου *i* για την αίτηση *j* είναι ίση με

$$NP_{ij} = GRC_{ij} \cdot \frac{B^{av}{}_{j}}{B^{req}{}_{i}} \tag{2.23}$$

όπου B^{av} είναι το διαθέσιμο και B^{req} το απαιτούμενο εύρος ζώνης, $i = \{1, \ldots, N\}$, $j = \{1, \ldots, M\}$. Τα δίκτυα επομένως θα προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν την απόδοσή τους, όπως αυτή υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση.

2.4.3 Αριθμητικό Παράδειγμα

Στην ενότητα αυτή θα δείξουμε ένα απλό αριθμητικό παράδειγμα του προηγούμενου αλγορίθμου. Θεωρούμε ότι διαθέτουμε δύο WLAN δίκτυα, κάθε ένα από τα οποία μπορεί να υποστηρίξει ρυθμούς μετάδοσης μέχρι 100 Mbps. Επιπλέον, θεωρούμε τέσσερις τύπους υπηρεσιών, όλους με την ίδια προτεραιότητα. Στον πίνακα 2.9 φαίνονται οι επιλεγμένοι τύποι υπηρεσιών, καθώς και το εύρος ζώνης που απαιτεί ο καθένας. Με βάση αυτούς τους τύπους θεωρούμε ότι υπάρχουν έξι αιτήσεις που πρέπει να κατανεμηθούν. Ο Πίνακας 2.9 συγκεντρώνει αυτές τις πληροφορίες, καθώς και τις τιμές GRC που χρησιμοποιούνται για κάθε δίκτυο.

	Web browsing	**Access to corporate database**	**Video download**	**Peer-to-peer file sharing**
Required Data Rate	512 kbps	512 kbps	5 Mbps	5 Mbps
GRC for WLAN 1	0.578	0.673	0.76	0.615
GRC for WLAN 2	0.789	0.545	0.584	0.875
Service Requests	R1, R4	R3, R6	R2	R5

Πίνακας 2.9. Χαρακτηριστικά αριθμητικού παραδείγματος

Με βάση αυτές τις παραμέτρους μοντελοποιούμε το παίγνιο ως $P = \{1,2\}$, $A = \{R1,R2,R3,R4,R5\}$, $S_{1,2} = \{R1,R2,R3,R4,R5\}$ και π_i υπολογιζόμενο από την εξίσωση (2.23). Επιπλέον, ο περιορισμός ότι κάθε αίτηση μπορεί να επιλεχτεί μόνο από ένα δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα η διαγώνιος του πίνακα να μη διαθέτει αποδόσεις, έτσι ώστε να αποφεύγονται οι συγκρούσεις. Προκειμένου να εφαρμόσουμε την προτεινόμενη μεθοδολογία σχηματίζουμε τον πίνακα του παιγνίου. Κάθε κελί του πίνακα γεμίζει με την τιμή της προτίμησης δικτύου, όπως αυτή προκύπτει από την εξίσωση (2.23).

		WLAN 2					
WLAN 1	Services	R1	R2	R3	R4	R5	R6
	R1		113 12	113 106	113 154	113 18	113 106
	R2	15 154		15 106	15 154	15 18	15 106
	R3	131 154	131 12		131 154	131 18	131 106
	R4	113 154	113 12	113 106		113 18	113 106
	R5	12 154	12 12	12 106	12 154		12 106
	R6	131 154	131 12	131 106	131 154	131 18	

		WLAN 2				
WLAN 1	Services	R2	R4	R5	R6
	R2		15 153	15 17	15 106
	R4	112 12		112 17	112 106
	R5	12 12	12 153		12 106
	R6	131 12	131 153	131 17	

		WLAN 2	
WLAN 1	Services	R2	R5
	R2		15 17
	R5	12 12	

Εικόνα 2.4. Πίνακες αποδόσεων για τους τρεις γύρους του αριθμητικού παραδείγματος

Όπως βλέπουμε από την Εικόνα 2.4, στον πρώτο γύρο του παιγνίου ο παίκτης 1 (WLAN 1) μεγιστοποιεί την απόδοσή του επιλέγοντας είτε την αίτηση R3 είτε την αίτηση R6. Δεδομένης της υπόθεσης που έχουμε κάνει παραπάνω σχετικά με τον αύξοντα αριθμό, ο παίκτης 1 επιλέγει την αίτηση 3. Όμοια, ο παίκτης 2 (WLAN 2) μεγιστοποιεί την απόδοσή του επιλέγοντας είτε την αίτηση R1 είτε την αίτηση R4. Προφανώς επιτυγχάνεται ισορροπία Nash όταν οι παίκτες επιλέξουν τις R3, R1. Ισορροπία Nash επιτυγχάνεται όταν ο κάθε

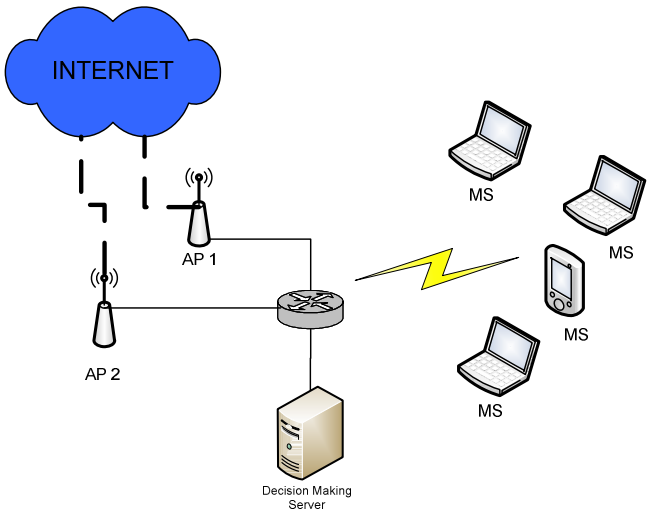
παίκτης επιλέξει μια στρατηγική που του εγγυάται την υψηλότερη απόδοση ανεξάρτητα από την επιλογή του άλλου παίκτη. Για τον πρώτο γύρο του παιχνιδιού έχουμε λοιπόν $\pi_1 = 131$ και $\pi_2 = 154$.

Πριν ξεκινήσει ο δεύτερος γύρος του παιγνίου πρέπει να ληφθεί υπόψη η μεταβολή του διαθέσιμου εύρους ζώνης και στα δύο δίκτυα. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τον Πίνακα 2.9, το διαθέσιμο εύρος ζώνης είναι πλέον 99.488 Mbps και για τα δύο δίκτυα. Στο τέλος του δεύτερου γύρου ο παίκτης 1 επιλέγει την αίτηση R6, ενώ ο παίκτης 2 την αίτηση R4. Οι αντίστοιχες αποδόσεις είναι $\pi_1 = 131$ και $\pi_2 = 153$, όπως φαίνεται από την Εικόνα 2.4.

Στον τρίτο και τελευταίο γύρο του παιγνίου το διαθέσιμο εύρος ζώνης έχει μειωθεί σε 98.976 Mbps και για τα δύο δίκτυα. Εδώ ο παίκτης 1 επιλέγει την αίτηση R2, ενώ ο παίκτης 2 την αίτηση R5 και οι αντίστοιχες αποδόσεις είναι $\pi_1 = 15$ και $\pi_2 = 17$. Η συνολική απόδοση είναι για κάθε δίκτυο αντίστοιχα $\Sigma\pi_1 = 277$ και $\Sigma\pi_2 = 324$.

2.4.4 Σενάριο Προσομοίωσης

Προκειμένου να ελεγχθεί η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου υλοποιήθηκαν δύο δίκτυα WLAN (802.11b) στον προσομοιωτή ns2, κάθε ένα από τα οποία διαθέτει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά. Ογδόντα κινητοί κόμβοι τοποθετήθηκαν τυχαία μεταξύ δύο σημείων πρόσβασης (access points) και δεδομένου ότι η μετακίνηση κόμβων δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα, για τους σκοπούς αυτής της μελέτης, όλες οι μετακινήσεις κόμβων ήταν απενεργοποιημένες. Αυτός ο αριθμός κόμβων κρίθηκε επαρκής προκειμένου να παραχθεί αρκετή κίνηση, λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα και των δύο δικτύων.



Εικόνα 2.5. Αρχιτεκτονική σεναρίου προσομοίωσης

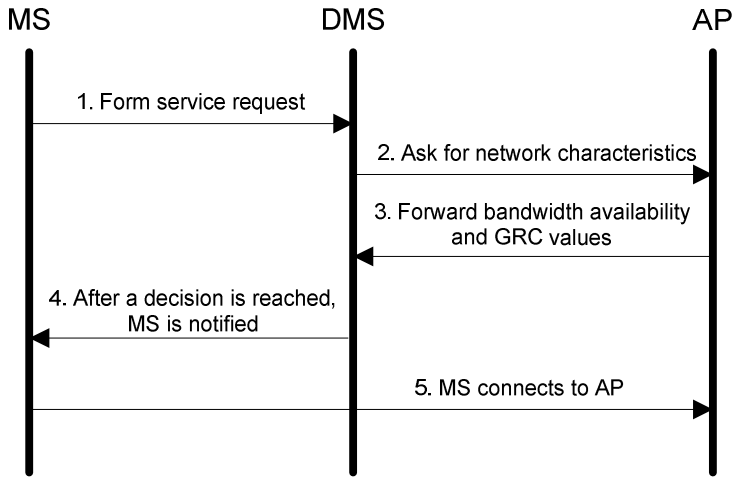
Κάθε κόμβος ζητά μια συγκεκριμένη υπηρεσία, η οποία μπορεί να είναι είτε Τηλεφωνία (Voice), είτε FTP είτε Βίντεο τηλεφωνία (Video Telephony). Ο Πίνακας 2.10 παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά όλων των τύπων υπηρεσιών. Η αναλογία των υπηρεσιών, όπως φαίνεται

στον Πίνακα 2.10, είναι 4:3:1. Η Τηλεφωνία και η Βίντεο τηλεφωνία διαμορφώνονται ως κίνηση CBR με τα πακέτα 60 και 500 bytes αντίστοιχα, ενώ η υπηρεσία FTP εφαρμόζεται ως υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best effort) πάνω από TCP με μέγεθος πακέτων ίσο με 1500 bytes. Όλα τα αιτήματα υπηρεσιών υποβάλλονται ταυτόχρονα και ολοκληρώνονται στο τέλος της προσομοίωσης.

Υπηρεσίες	**Ποσοστό Αιτήσεων**	**Ζητούμενο εύρος ζώνης ανά αίτηση**	**GRC για WLAN 1**	**GRC για WLAN 2**
Voice	50%	48 kbps	0.648	0.412
FTP	37.5%	300 kbps	0.212	0.503
Video tel	12.5%	256 kbps	0.713	0.779

Πίνακας 2.10. Χαρακτηριστικά υπηρεσιών

Το δίκτυο WLAN 1 διαθέτει μέγιστο εύρος ζώνης ίσο με 11 Mbps και βελτιστοποιεί την απόδοση CBR συνδέσεων χαμηλών απαιτήσεων (π.χ. συνδέσεις Τηλεφωνίας), ενώ το WLAN 2 έχει συνολικό εύρος ζώνης ίσο με 5Mbps και ευνοεί τις TCP. Τα παραπάνω απεικονίζονται μέσα από τις τιμές GRC στον Πίνακα 2.10. Σημειώνεται ότι αφού το προτεινόμενο παίγνιο δεν κάνει διάκριση προτεραιοτήτων, όλες οι αιτήσεις θεωρούνται ίσης προτεραιότητας.



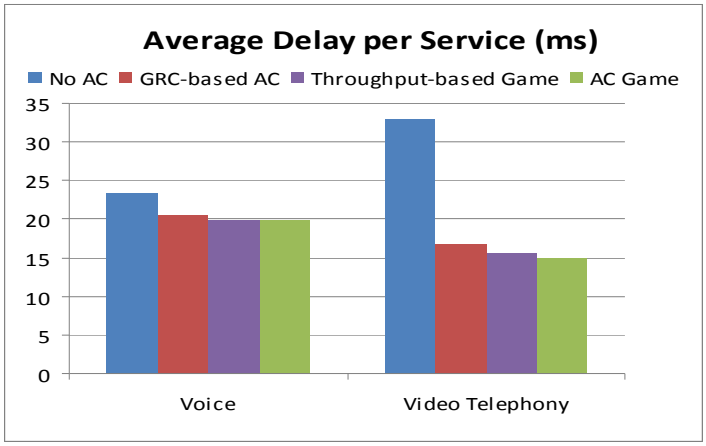
Εικόνα 2.6. Επικοινωνία μεταξύ οντοτήτων σεναρίου προσομοίωσης

Το παίγνιο αποδοχής κλήσεων μπορεί να ενσωματωθεί σε μια πραγματική τοπολογία δικτύων ως μια εφαρμογή σε έναν εξυπηρετητή. Στην περίπτωση αυτή ο εξυπηρετητής καλείται Εξυπηρετητής Λήψης Αποφάσεων (Decision Making Server -DMS) και συνδέεται με ένα router, το οποίο κατανέμει τις αιτήσεις στα διαθέσιμα Σημεία Πρόσβασης (Access Points - AP). Με τον τρόπο αυτό, μόλις ένα Κινητό Τερματικό (Mobile Station - MS) διατυπώνει μια αίτηση που περιέχει όλη την απαραίτητη πληροφορία, ο Εξυπηρετητής Λήψης Αποφάσεων συλλέγει πληροφορίες από όλα τα Σημεία Πρόσβασης και υπολογίζει τις αποδόσεις. Αφού ολοκληρωθεί το παίγνιο και ληφθεί απόφαση, ο Εξυπηρετητής Λήψης Αποφάσεων ενημερώνει το Κινητό Τερματικό σχετικά με το ποιο Σημείο Πρόσβασης θα αναλάβει την αίτηση. Οι Εικόνες 2.5 και 2.6 απεικονίζουν την εν λόγω κεντροποιημένη αρχιτεκτονική.

2.4.5 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Προκειμένου να αξιολογηθεί το προτεινόμενο παίγνιο και να καθοριστεί έτσι ο αντίκτυπος στην QoS που έλαβε κάθε αίτηση υπηρεσιών, πραγματοποιήθηκαν τέσσερα πειράματα:

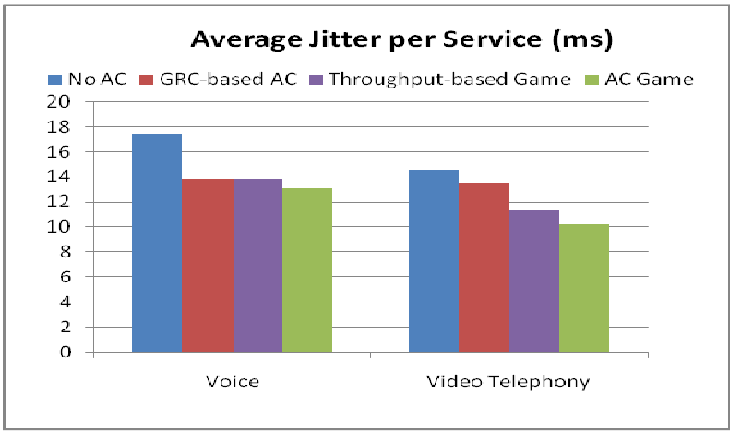
- Το πρώτο πείραμα αντιστοιχούσε στη χειρότερη αναμενόμενη απόδοση, δεδομένου ότι κανένας αλγόριθμος αποδοχής κλήσεων δεν εφαρμόστηκε και η διανομή των αιτημάτων έγινε με τυχαίο τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το WLAN 1 ανέλαβε όλες τις αιτήσεις με μονό αύξοντα αριθμό, ενώ το WLAN 2 όλες τις αιτήσεις με ζυγό αύξοντα αριθμό.
- Στο δεύτερο πείραμα η διανομή των αιτημάτων έγινε σύμφωνα με τις τιμές GRC τους, δηλαδή κατέληγαν στο δίκτυο με το υψηλότερο GRC. Αυτό πρακτικά είχε ως αποτέλεσμα το WLAN 1 να αναλάβει όλα τα αιτήματα Τηλεφωνίας και το WLAN 2 όλα τα υπόλοιπα. Το εν λόγω πείραμα αποτελεί στην πράξη έναν απλό μηχανισμό επιλογής δικτύων που αγνοεί την τρέχουσα κατάσταση των δικτύων.
- Στο τρίτο πείραμα εφαρμόσαμε μια εναλλακτική μορφή του παιγνίου αποδοχής κλήσεων όπου οι αποδόσεις λάμβαναν υπόψη μόνο τη χωρητικότητα δικτύων και αγνοούσαν την αποδοτικότητά τους (παίγνιο βασισμένο στην ρυθμοαπόδοση). Οι αιτήσεις επέλεγαν πάντα το δίκτυο με το υψηλότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Μέσω των δύο τελευταίων πειραμάτων κατορθώσαμε να απομονώσουμε τον αντίκτυπο κάθε όρου που αποτελεί την προτίμηση δικτύων (εξίσωση 2.22).
- Τέλος εφαρμόστηκε το προτεινόμενο παίγνιο αποδοχής κλήσεων, που λαμβάνει υπόψη, όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, και το GRC και τη χωρητικότητα των δικτύων. Όπως ήταν αναμενόμενο η απόδοση σχεδόν όλων των συνδέσεων βελτιώθηκε σημαντικά, δεδομένου ότι οι αποφάσεις λήφθηκαν κατά τρόπο λογικότερο.



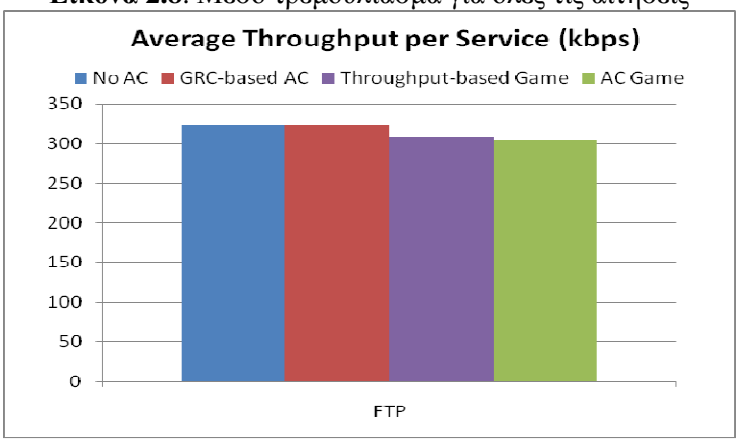
Εικόνα 2.7. Μέση καθυστέρηση για όλες τις αιτήσεις

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στις παραπάνω εικόνες. Σημειώνεται ότι αφού το delay και το jitter δεν είναι σημαντικά για την υπηρεσία FTP, οι συγκεκριμένες παράμετροι δεν απεικονίζονται για την υπηρεσία αυτή. Παρόμοια, οι CBR υπηρεσίες δεν

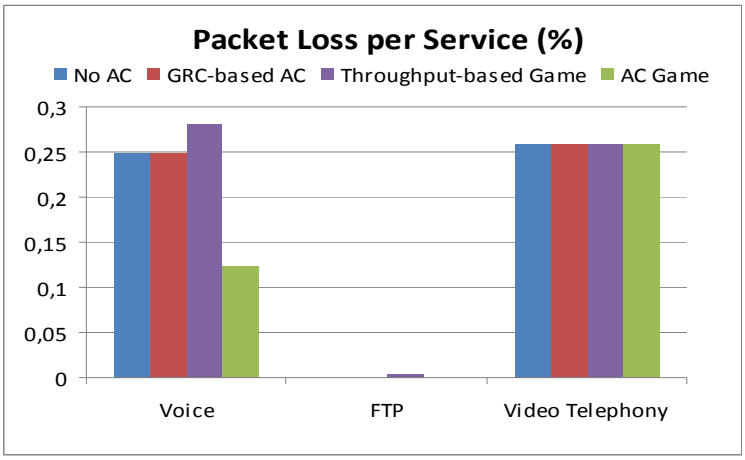
επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις της ρυθμοαπόδοσης και συνεπώς οι τιμές της δεν απεικονίζονται για αυτές.



Εικόνα 2.8. Μέσο τρεμούλιασμα για όλες τις αιτήσεις



Εικόνα 2.9. Μέση ρυθμοαπόδοση για όλες τις αιτήσεις



Εικόνα 2.10. Μέση απώλεια πακέτων για όλες τις αιτήσεις

Κατά τη διάρκεια του 4ου πειράματος αρκετοί γύροι οδήγησαν σε σύγκρουση μεταξύ των δύο δικτύων. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα δίκτυα επέλεγαν κατά κύριο λόγο τις αιτήσεις για τις οποίες διαθέτουν την υψηλότερη τιμή GRC. Ωστόσο, σε κάποιους γύρους του παιγνίου το WLAN 2 επέλεξε αιτήσεις Τηλεφωνίας αντί για αιτήσεις των άλλων υπηρεσιών, το οποίο αιτιολογείται από το χαμηλό εύρος ζώνης που απαιτεί η συγκεκριμένη υπηρεσία. Παρόμοια,

το WLAN 1 επέλεξε αιτήσεις Βίντεο Τηλεφωνίας, ακόμη κι αν δε διαθέτει την υψηλότερη τιμή GRC για αυτή την υπηρεσία. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι η χαμηλότερη τιμή GRC αντισταθμίστηκε από το μεγαλύτερο διαθέσιμο εύρος ζώνης.

Οι Εικόνες 2.7-2.10 παρέχουν μια συνολική εκτίμηση της απόδοσης κάθε πειράματος. Ως γενικό συμπέρασμα θα μπορούσε να ισχυριστεί κάποιος ότι η απουσία μηχανισμού ελέγχου αποδοχής κλήσεων κατέληξε στα χειρότερα αποτελέσματα, αφού η κατανομή των αιτήσεων γινόταν τυχαία. Η κατανομή με βάση την τιμή GRC έδωσε σε γενικές γραμμές ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Το κύριο μειονέκτημα ωστόσο αυτής της προσέγγισης είναι ότι δε λαμβάνει υπόψη την τωρινή διαθεσιμότητα εύρους ζώνης, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε συμφόρηση ενός δικτύου ενώ το άλλο δίκτυο έχει πολύ μικρό φόρτο. Συνεπώς δεν εγγυάται κάποια βελτίωση και η απόδοση εξαρτάται κυρίως από την αναλογία υπηρεσιών που θα χρησιμοποιηθεί.

Αντιθέτως, τα παίγνια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα 3 και 4 απέδωσαν αρκετά καλύτερα από τις προηγούμενες προσεγγίσεις. Το παίγνιο που βασίζεται στη ρυθμοαπόδοση βελτίωσε σημαντικά την καθυστέρηση και το τρεμούλιασμα όλων των τύπων υπηρεσιών, ευνοώντας ιδιαίτερα την υπηρεσία βίντεο τηλεφωνίας. Ωστόσο, υπήρξε μια αύξηση στον αριθμό χαμένων πακέτων στην περίπτωση αιτήσεων τηλεφωνίας.

Τα καλύτερα αποτελέσματα ωστόσο προέκυψαν από την εφαρμογή του προτεινόμενου παιγνίου το οποίο, στη χειρότερη περίπτωση, άφησε ανεπηρέαστες ορισμένες παραμέτρους QoS ενώ βελτίωσε κάποιες άλλες. Πιο συγκεκριμένα, η Εικόνα 2.7 δείχνει ότι το προτεινόμενο παίγνιο βελτίωσε σημαντικά τη μέση καθυστέρηση της αίτησης βίντεο τηλεφωνίας και ελάχιστα την καθυστέρηση ορισμένων αιτήσεων τηλεφωνίας. Συγχρόνως, σύμφωνα με την Εικόνα 2.8 παρατηρήθηκε μια μικρή βελτίωση στο μέσο τρεμούλιασμα για όλες τις υπηρεσίες που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση. Επιπλέον, η μέση ρυθμοαπόδοση διατηρήθηκε στα απαιτούμενα επίπεδα για όλες τις CBR συνδέσεις και κατανεμήθηκε δίκαια ανάμεσα στις «άπληστες» TCP συνδέσεις, γεγονός που συνεπάγεται ότι δεν επιτράπηκε στις FTP αιτήσεις να καταναλώσουν επιπλέον πόρους , σε αντίθεση με τα πρώτα δύο πειράματα. Για το λόγο αυτό οι FTP αιτήσεις παρουσιάζουν ελαφρώς χαμηλότερη ρυθμοαπόδοση. Όσον αφορά στην απώλεια πακέτων, δεν παρατηρήθηκε βελτίωση για τις συνδέσεις βίντεο τηλεφωνίας, αλλά 50% των συνδέσεων τηλεφωνίας δεν παρουσίαζαν πλέον απώλεια πακέτων, γεγονός που βελτίωσε σημαντικά την απόδοση του συγκεκριμένου τύπου υπηρεσίας.

Ο Πίνακας 2.11 συνοψίζει τη θεωρητική χρησιμοποίηση εύρους ζώνης με βάση τις απαιτήσεις των υπηρεσιών σε εύρος ζώνης και την κατανομή των αιτήσεων. Στα πρώτα δύο πειράματα η κατανομή είναι άνιση, συνεπώς το ένα δίκτυο είναι φορτωμένο, ενώ το άλλο είναι αδρανές. Δεδομένου ότι το WLAN 2 δεν μπορεί να εξυπηρετήσει όλες τις εισερχόμενες

αιτήσεις, ορισμένες από αυτές απορρίπτονται. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αποφευχθεί μέσω κατάλληλου ελέγχου αποδοχής κλήσεων, ώστε να μην απορρίπτονται αιτήσεις ενώ θα μπορούσαν να τους διατεθούν πόροι από κάποιο άλλο δίκτυο. Ονομάζουμε το ποσοστό του εύρους ζώνης που μένει ανεκμετάλλευτο Bandwidth Excess (%). Το δεύτερο πείραμα, όπως ήταν αναμενόμενο, κατέληξε στη χειρότερη απόδοση αφού αγνοούσε τελείως την τωρινή κατάσταση των δικτύων. Τα παίγνια ελέγχου αποδοχής κλήσεων ωστόσο παρουσίασαν μια πιο κατανεμημένη κατανομή εύρους ζώνης, η οποία εξασφάλισε ότι όλες οι αιτήσεις εξυπηρετήθηκαν. Το τελευταίο πείραμα παρουσίασε την πιο ισορροπημένη κατανομή.

Utilization (%)	**EXP 1**	**EXP 2**	**EXP 3**	**EXP 4**
WLAN 1	61,27	17,45	86,54	83,27
WLAN 2	100	100	79,2	86,4
BExcess (%)	12,96	48,88	-	-

Πίνακας 2.11. Χρησιμοποίηση εύρους ζώνης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.5: ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΜΕ ΜΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΠΑΙΓΝΙΑ

2.5.1 Συμφωνίες Συνόδων Μεταξύ Παρόχων

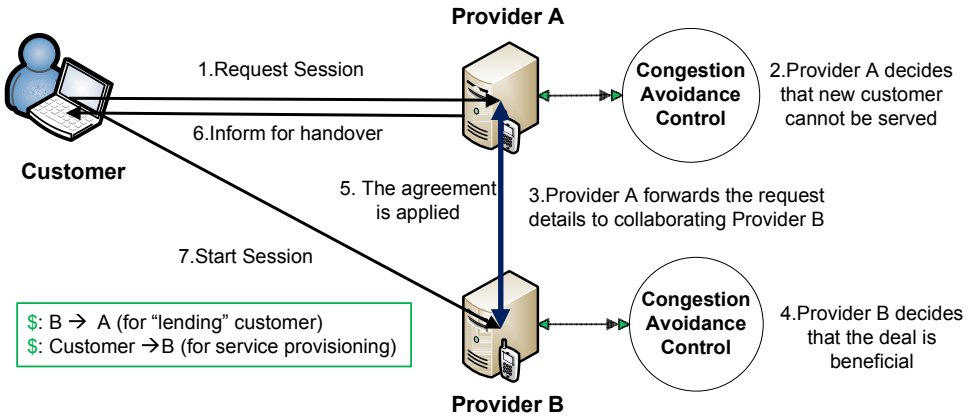
Ένα βασικό στοιχείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να βελτιωθεί η παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας προς τους χρήστες είναι οι συμφωνίες συνόδων μεταξύ παρόχων (federation agreements), παρόμοια με την περιαγωγή (roaming). Το roaming επιτρέπει σε χρήστες ενός παρόχου δικτύου να χρησιμοποιήσουν τις υπηρεσίες ενός άλλου παρόχου όταν βρίσκονται μέσα στην περιοχή κάλυψής του [54]. Οι νομικές λεπτομέρειες για τη διαπραγμάτευση της χρέωσης των υπηρεσιών ανάμεσα στους συνεργαζόμενους παρόχους καθορίζονται στις λεγόμενες συμφωνίες περιαγωγής (roaming agreements). Με έναν παρόμοιο τρόπο ορίζονται και οι συμφωνίες συνόδων, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ως ένα συμβόλαιο μεταξύ δύο παρόχων το οποίο προσδιορίζει τις συνθήκες (π.χ. οικονομικοί και νομικοί όροι, διαδικασίες πιστοποίησης και εξουσιοδότησης, κτλ) κάτω από τις οποίες μπορεί να επιτευχθεί συνεργασία. Στο Κεφάλαιο αυτό θεωρείται ότι προ-υπάρχουν τέτοιες συμφωνίες μεταξύ των παρόχων και ότι η συμφωνία πραγματοποιείται όταν επαληθευτεί η διαθεσιμότητα πόρων.

Ο στόχος αυτών των συμφωνιών είναι να επιτρέψουν σε κάποιον άλλο πάροχο δικτύου να χειριστεί μια αίτηση υπηρεσίας που δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον πάροχο του πελάτη (home provider). Ως πάροχο του χρήστη θεωρούμε τον πάροχο με τον οποίο ο χρήστης διατηρεί ένα υπογεγραμμένο συμβόλαιο. Σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία ωστόσο, θεωρείται ότι σε περίπτωση ανεπαρκών πόρων, ο πελάτης είναι ελεύθερος να αναζητήσει καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας σε κάποιον άλλο πάροχο, δεδομένου ότι υπάρχει κάποιο είδος συμφωνίας ανάμεσα στους δύο παρόχους, πιθανόν και με κάποια μικρή χρηματική ποινή. Προκειμένου να επιτύχει αυτό το μοντέλο φυσικά, απαιτούνται κατάλληλα οικονομικά κίνητρα, ώστε όλες οι πλευρές να ωφελούνται. Στη συνέχεια εξετάζονται δύο πιθανά σενάρια στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί η ιδέα των συμφωνιών συνόδων.

Σενάριο 1

Ένας πελάτης που διατηρεί συμβόλαιο με τον πάροχο Α επιθυμεί να πραγματοποιήσει μια τηλεφωνική κλήση. Ωστόσο, ο πάροχος Α δεν μπορεί να δεχτεί την αίτηση, καθώς αυτό θα προκαλούσε συμφόρηση στο δίκτυο. Υπό φυσιολογικές συνθήκες ο πάροχος Α θα απέρριπτε την αίτηση και συνεπώς δε θα λάμβανε κανένα εισόδημα. Ωστόσο, στην περίπτωση που

υπάρχει μια συμφωνία συνόδων με τον πάροχο Β, ο Α μπορεί να προωθήσει τις λεπτομέρειες της αίτησης στον Β. Όταν ο Β επαληθεύσει ότι διαθέτει τους απαραίτητους πόρους και αποφασίσει ότι έχει οικονομικό όφελος, τότε αποδέχεται την αίτηση. Έπειτα συλλέγει το εισόδημα από την εξυπηρέτηση της αίτησης και καταθέτει ένα μικρό «φόρο» στον Α, αφού ο τελευταίος δρα ως διαπραγματευτής. Με τον τρόπο αυτό και οι δυο πάροχοι συλλέγουν εισόδημα που δε θα είχαν κερδίσει αλλιώς, ενώ ο πελάτης εξυπηρετείται. Το σενάριο αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 2.11.



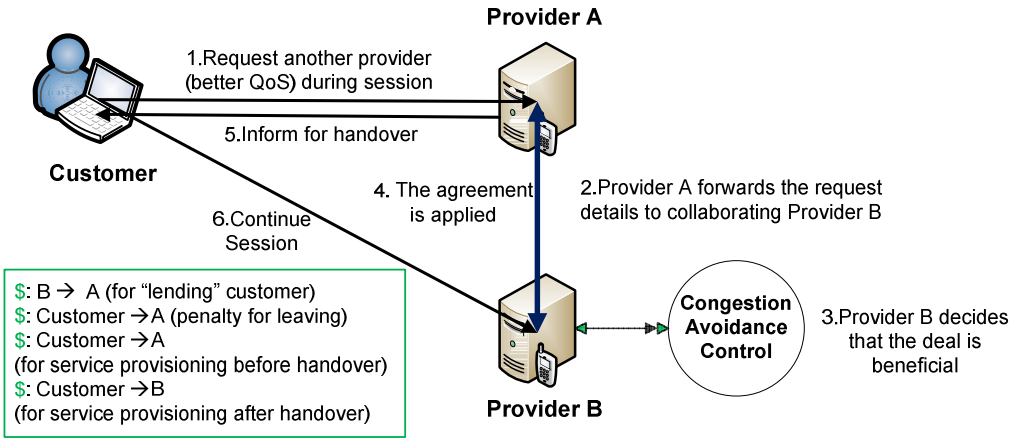
Εικόνα 2.11. Αλλαγή παρόχου λόγω έλλειψης πόρων

<u>Σενάριο 2</u>

Στο σενάριο αυτό ο ίδιος πελάτης εξυπηρετείται από τον πάροχο Α, ωστόσο είναι δυσαρεστημένος από την ποιότητα της υπηρεσίας που λαμβάνει και συνεπώς επιθυμεί να αναζητήσει καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας σε κάποιον άλλο πάροχο, ακόμη και αν αυτό σημαίνει μεγαλύτερο κόστος. Για το σκοπό αυτό, με βάση το μοντέλο των συμφωνιών συνόδων, ο πάροχος Α προωθεί τις λεπτομέρειες του πελάτη και της συνόδου στον Β, ρωτώντας κατά πόσο ο τελευταίος μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του πελάτη. Αν ο Α λάβει θετική απάντηση από τον Β, τότε πραγματοποιείται διαπομπή. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο, εδώ ο πελάτης φεύγει οικειοθελώς και κατά συνέπεια υποχρεούται να καταβάλλει μια μικρή χρηματική ποινή στον πάροχο Α για πρόωρο τερματισμό του συμβολαίου.

Με μια πρώτη ματιά μπορεί να φαίνεται ότι ο πάροχος Α χάνει εισόδημα «διώχνοντας» τον πελάτη του, αλλά στην πραγματικότητα μπορεί να έχει σημαντικό όφελος. Ο πάροχος Α εισπράττει και τη χρηματική ποινή από τον πελάτη και το φόρο που καταβάλλεται από τον πάροχο Β, χωρίς να έχει σπαταλήσει κανέναν πόρο. Ταυτόχρονα καταφέρνει να αποτρέψει πιθανή συμφόρηση, εξαιτίας της οποίας ορισμένοι πελάτες μπορεί να εξέφραζαν δυσαρέσκεια. Από την άλλη πλευρά, όπως προηγουμένως, ο πάροχος Β λαμβάνει εισόδημα που δε θα είχε λάβει αλλιώς. Τέλος, ο πελάτης επιτυγχάνει υψηλότερη ποιότητα υπηρεσίας,

ακόμη και αν το κόστος αυξάνεται, αφού αυτός ήταν άλλωστε ο αρχικός του στόχος. Το σενάριο αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12. Αλλαγή παρόχου λόγω δυσαρέσκειας πελάτη

2.5.2 Μοντέλα Κοστολόγησης

Δεδομένου ότι η υιοθέτηση μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης επηρεάζει αναπόφευκτα το εισόδημα των παρόχων και τα έξοδα των πελατών, θεωρείται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη αναφορά στα μοντέλα κοστολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί βέλτιστη κατανομή πόρων [55][56]. Προκειμένου να αναπτυχθούν δυναμικά και ευέλικτα συστήματα, αντί για στατικές χρεώσεις, πρέπει να υιοθετηθούν δυναμικοί μηχανισμοί χρέωσης που προσαρμόζουν την ικανοποίηση του χρήστη (ως προς την ποιότητα υπηρεσίας που δέχεται) σε οικονομικά μέτρα.

Προς την κατεύθυνση αυτή προτείνουμε δύο πιθανά μοντέλα κοστολόγησης, και τα δύο από τα οποία έχουν εφαρμογή σε δίκτυα μεταγωγής πακέτου. Η επίδοση οποιουδήποτε μηχανισμού συμφόρησης που λαμβάνει υπόψη οικονομικά μεγέθη εξαρτάται σημαντικά από την επιλογή του μοντέλου κοστολόγησης, αφού επηρεάζει όλες τις πλευρές. Πιο συγκεκριμένα, η παροχή υπηρεσιών μπορεί να χρεώνεται:

- *Με βάση το επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας που λαμβάνει ο πελάτης:* όσο λιγότερους πόρους διαθέτει το δίκτυο στον πελάτη, τόσο λιγότερο θα είναι υποχρεωμένος αυτός να πληρώσει. Αυτό λειτουργεί ως κίνητρο στους παρόχους για να προσφέρουν υψηλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας στους πελάτες τους, αφού μια υπερβολική αύξηση στον αριθμό των πελατών δε θα επιφέρει περισσότερο εισόδημα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να αναζητηθεί μια ισορροπία ανάμεσα σε κόστος και ποιότητα υπηρεσίας. Το μοντέλο αυτό μπορεί να παρουσιάσει διάφορες παραλλαγές ανάλογα με τον τρόπο που καθορίζεται η ικανοποίηση του πελάτη. Σε αρκετές περιπτώσεις χρησιμοποιείται για το

σκοπό αυτό η συνάρτηση Σίγμα (sigmoid function), που λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των χαμένων πακέτων [56].

- *Ανά μεταδιδόμενο πακέτο:* στην περίπτωση αυτή το ποσό των χρημάτων που πληρώνει ο πελάτης εξαρτάται από τον αριθμό των πακέτων που ανταλλάσσονται κατά τη διάρκεια της συνόδου. Η προσέγγιση αυτή ακολουθήθηκε και στο [57], όπου οι συγγραφείς διευκρινίζουν ότι αν χρειαστούν πολλές μεταδόσεις για ένα πακέτο τότε ο χρήστης υποχρεούται να πληρώσει πολλές φορές.

Εκτός φυσικά από το μοντέλο κοστολόγησης, πρέπει να καθοριστούν και ορισμένες παράμετροι οικονομικής φύσης, όπως η ποινή που καταβάλλεται από τους πελάτες για πρόωρο τερματισμό συμβολαίου και ο φόρος ανταλλαγής πελατών μεταξύ συνεργαζόμενων παρόχων. Ο φόρος αυτός μπορεί να είναι είτε σταθερός είτε ένα ποσοστό του εισοδήματος που λαμβάνει ο νέος πάροχος. Βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί επιλέγοντας κατάλληλες τιμές για αυτές τις παραμέτρους ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του ετερογενούς περιβάλλοντος που εξετάζεται.

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης χρησιμοποιούμε το δεύτερο από τα παραπάνω μοντέλα, με τη διαφορά ότι για την κοστολόγηση λαμβάνονται υπόψη μόνο τα ληφθέντα πακέτα αντί για όλα τα μεταδιδόμενα. Η υπόθεση αυτή αποθαρρύνει τους παρόχους από το να δέχονται όλες τις αιτήσεις υπηρεσιών, αφού η συμφόρηση μπορεί να προκαλέσει απώλεια πακέτων και συνεπώς μείωση εισοδήματος. Υποτίθεται επίσης ότι το κόστος μετάδοσης πακέτου γνωστοποιείται στα κινητά τερματικά κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ανακάλυψης δικτύων (network discovery). Το κόστος C_i για τον πελάτη i και το εισόδημα I_j για τον πάροχο j υπολογίζονται από τις εξισώσεις (2.9) και (2.10) αντίστοιχα.

$$C_i = \sum_{j=1}^{m} [r_{ij} \cdot t_j + p_{ij}] \tag{2.24}$$

όπου m είναι ο αριθμός των παρόχων, r_{ij} είναι ο αριθμός των πακέτων που μεταδίδονται από τον πάροχο j για τον πελάτη i, t_j είναι το κόστος ανά πακέτο για τον πάροχο j και p_{ij} είναι η συνολική ποινή που καταβάλλει ο πελάτης i στον πάροχο j.

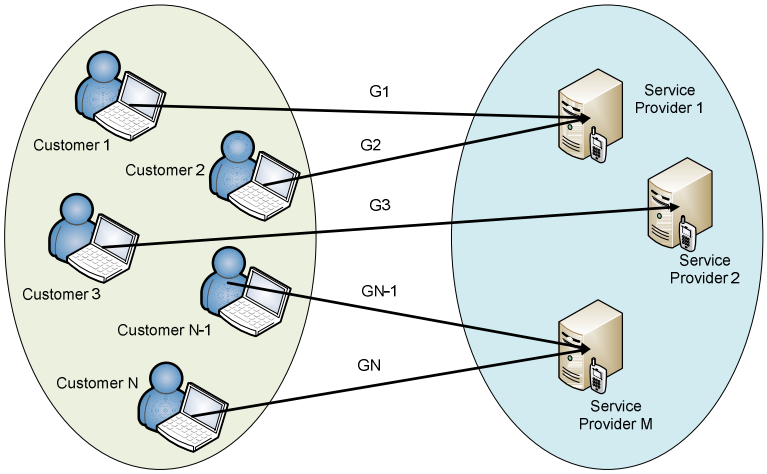
$$I_j = \sum_{i=1}^{n} [r_{ij} \cdot t_j + p_{ij} + \sum_{k=1, k \neq j}^{m} [f_{jk}^{i} - f_{kj}^{i}]] \tag{2.25}$$

όπου n είναι ο αριθμός των πελατών και f_{jk}^{i} είναι ο φόρος που καταβάλλει ο πάροχος k στον πάροχο j για την διαπομπή του πελάτη i.

2.5.3 Το Παίγνιο Ελέγχου Αποδοχής Κλήσεων

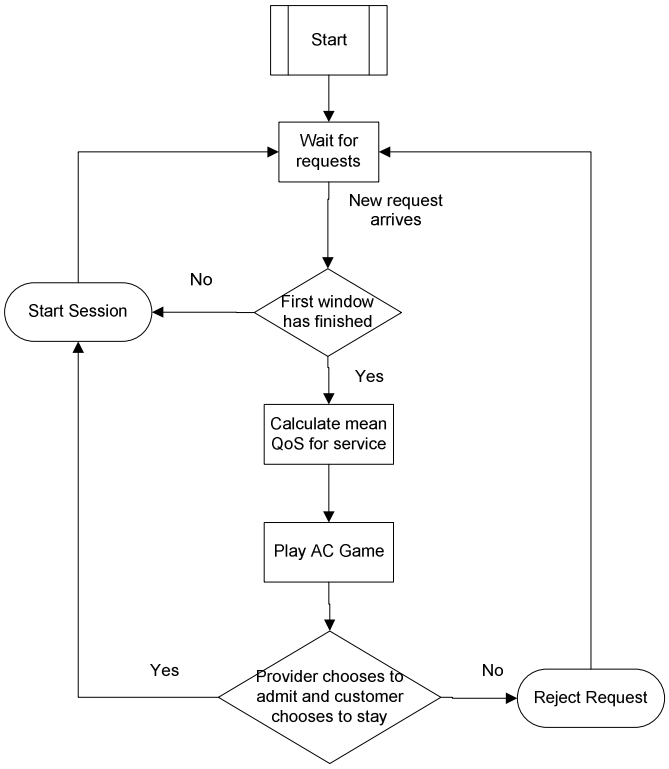
Στην παράγραφο αυτή αναλύουμε το σενάριο πελάτης εναντίον παρόχου ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο δύο παικτών. Στο προτεινόμενο παίγνιο θεωρούμε ότι κάθε πελάτης έχει

συμβόλαιο με ένα συγκεκριμένο πάροχο υπηρεσιών, ο οποίος είναι κατά συνέπεια ο προεπιλεγμένος (home) πάροχος. Ωστόσο, σε περίπτωση ανεπαρκών πόρων ο πελάτης είναι ελεύθερος να αναζητήσει καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας σε άλλον πάροχο, δεδομένου ότι υπάρχει κάποιου είδους συμφωνία ανάμεσα στους δύο παρόχους. Υποθέτουμε ότι υπάρχουν N χρήστες και M πάροχοι, το οποίο σημαίνει ότι ανά πάσα στιγμή υπάρχουν M^N συνδυασμοί, αφού κάθε πελάτης μπορεί να συσχετιστεί με οποιοδήποτε πάροχο. Επίσης, $n_i(t)$ είναι ο αριθμός των πελατών που είναι εγγεγραμμένοι στον πάροχο i τη χρονική στιγμή t, $1 \le i \le M$. Επιπλέον θεωρείται δεδομένο ότι ένας πελάτης δεν μπορεί να είναι εγγεγραμμένος ταυτόχρονα σε πολλούς παρόχους, γεγονός που συνεπάγεται $\sum_{i=1}^{M} n_i(t) = N$. Κάθε συνδυασμός πελάτη-παρόχου θεωρείται ως ένα παίγνιο με δύο παίκτες G_j, $1 \le j \le M$ (Εικόνα 2.13).



Εικόνα 2.13. Παίγνια μεταξύ πελατών και παρόχων

Ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων ενεργοποιείται κάθε φορά που λαμβάνεται μια νέα αίτηση υπηρεσιών και σκοπός του είναι να αποφανθεί κατά πόσο υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για να εξυπηρετηθεί ικανοποιητικά η νέα αίτηση. Η απόφαση βασίζεται σε μετρήσεις από συνόδους του ίδιου τύπου υπηρεσίας που εξυπηρετούνται από το συγκεκριμένο πάροχο. Συνεπώς, κάθε φορά που γίνεται μια νέα αίτηση παίζεται ένα τέτοιο παίγνιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.14. Υποθέτουμε ότι ο πάροχος έχει δύο επιλογές: είτε να αποδεχτεί (S_1) είτε να απορρίψει (S_2) τη νέα αίτηση. Παρόμοια, ο πελάτης μπορεί είτε να τερματίσει (C_1) είτε να διατηρήσει (C_2) το συμβόλαιό του με τον πάροχο. Συνεπώς συνολικά υπάρχουν 4 πιθανοί συνδυασμοί. Οι αποδόσεις των παικτών για όλους τους συνδυασμούς εκφράζονται από τους πίνακες A = $[a_{ij}]_{2x2}$ και B = $[b_{ij}]_{2x2}$. Ο Πίνακας 2.15 δείχνει σχηματικά τις σχέσεις μεταξύ των στρατηγικών και των αποδόσεων για κάθε παίκτη.



Εικόνα 2.14. Παίγνιο ελέγχου αποδοχής κλήσεων

	Customer Leaves (C_1)	**Customer Stays** (C_2)
Provider Admits (S_1)	a_{11}, b_{11}	a_{12}, b_{12}
Provider Rejects (S_2)	a_{21}, b_{21}	a_{22}, b_{22}

Πίνακας 2.12. Σχέση μεταξύ στρατηγικών και αποδόσεων

Ο πίνακας αποδόσεων του πελάτη ορίζεται ως

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 R - w_2 L_c & R \\ w_1 R_o - w_2 L_c & R_o \end{pmatrix} \tag{2.26}$$

Στη συνέχεια επεξηγείται ο κάθε όρος του πίνακα:

- Ο όρος $\boldsymbol{b_{21}}$ εκφράζει την περίπτωση που ο πελάτης αποφασίζει να φύγει, ενώ ο πάροχος επιλέγει να μην δεχτεί την αίτηση (στρατηγική S_2C_1). Στην περίπτωση αυτή ο πελάτης έχει ένα δεδομένο εισόδημα R_o και υποχρεούται να καταβάλει χρηματική ποινή L_c για πρόωρο τερματισμό του συμβολαίου του. Και οι δύο αυτοί όροι πολλαπλασιάζονται με κατάλληλα βάρη (w_1 και w_2 αντίστοιχα), τα οποία εκφράζουν την προτίμηση του πελάτη στο να εξοικονομήσει χρήματα ή να διεκδικήσει το βέλτιστο επίπεδο υπηρεσίας αντίστοιχα. Τα βάρη αυτά μπορούν να προσδιοριστούν μέσα από το προφίλ χρήστη και δείχνουν κατά πόσο ο χρήστης είναι αδιάφορος στον κίνδυνο (risk neutral), αναζητεί τον κίνδυνο (risk seeking) ή αποστρέφεται τον κίνδυνο (risk adverse).

- Παρόμοια, ο όρος $\boldsymbol{b_{22}}$ περιγράφει την κατάσταση όπου ο πάροχος απορρίπτει την αίτηση αλλά ο πελάτης επιθυμεί να παραμείνει και συνεπώς έχει μόνο το ελάχιστο όφελος R_o, η τιμή του οποίου είναι σταθερή.
- Ο όρος $\boldsymbol{b_{12}}$ ορίζεται ως το εισόδημα του πελάτη στην περίπτωση που επιθυμεί να παραμείνει και η αίτησή του γίνεται δεκτή από τον πάροχο.
- Τέλος, ο όρος $\boldsymbol{b_{11}}$ ορίζεται απλά ως το εισόδημα μείον την ποινή, και τα δύο πολλαπλασιαζόμενα με τα βάρη w_1 και w_2 αντίστοιχα.

Το εισόδημα του πελάτη εκφράζει σε χρηματική αξία την ποιότητα της υπηρεσίας που του προσφέρεται, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος, και εκφράζεται ως

$$R = QoS\left(\%\right)\cdot q - C_{cust} \tag{2.27}$$

όπου q είναι ένας σταθερός παράγοντας που μετατρέπει την τιμή QoS(%) σε χρηματική αξία, C_{cust} είναι το κόστος της υπηρεσίας από την πλευρά του πελάτη και η ποιότητα υπηρεσίας QoS (%) δίνεται από την εξίσωση (3). Η παραπάνω διαφορά είναι γνωστή στην μικροοικονομική θεωρία ως Consumer Surplus.

$$QoS(\%) = \sum_{i=1}^{4} w_i \cdot Parameter_i\% \tag{2.28}$$

Η τιμή QoS (%) εκφράζει το ποσοστό της ικανοποίησης του πελάτη, λαμβάνοντας υπόψη τις κανονικοποιημένες μέσες τιμές των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας, όπως η καθυστέρηση, το τρεμούλιασμα, η ρυθμοαπόδοση και η απώλεια πακέτων. Τα βάρη w_i, $1< i < 4$ διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο της υπηρεσίας και μπορούν να υπολογιστούν με βάση την απόδοση του δικτύου, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 1.3. Ο λόγος για την επιλογή αυτή είναι επειδή η ικανοποίηση του χρήστη είναι υποκειμενική και συνεπώς δύσκολη στον να χαρακτηριστεί μαθηματικά. Ως αποτέλεσμα, θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (2.13) για να υπολογίσουμε το επίπεδο της ικανοποίησης ή απογοήτευσης κάθε χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τέσσερις παραμέτρους. Αντίθετα, άλλες προσεγγίσεις, όπως στο [58], εξετάζουν μόνο την πιθανότητα απόρριψης κλήσεων. Θεωρούμε την προσέγγιση αυτή πιο σωστή, καθώς απεικονίζει επιτυχώς την τωρινή κατάσταση των δικτύων και δεν εξαρτάται από σταθερές, των οποίων οι βέλτιστες τιμές πρέπει να προσδιοριστούν.

Κάθε φορά που εκτελείται το παίγνιο ελέγχου αποδοχής κλήσεων εξάγονται στατιστικά για τα δεδομένα που στάλθηκαν και λήφθηκαν κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, το οποίο καλείται «*Παράθυρο Χρόνου*». Σημειώνεται ότι για αιτήσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια του πρώτου παραθύρου το παίγνιο δεν εκτελείται, αφού δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμη ένα παράθυρο χρόνου. Κατά συνέπεια, όλες αυτές οι αιτήσεις θα γίνονται δεκτές από το σύστημα. Στη συνέχεια ορίζουμε τον πίνακα αποδόσεων του παρόχου $A = [a_{ij}]_{2x2}$ ως

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_t + L_c + C - F - L & R_t + C - F \\ R_t + L_c - L & R_t \end{pmatrix} \tag{2.29}$$

Ακολουθεί η επεξήγηση των όρων του πίνακα:

- Ο όρος $\boldsymbol{a_{22}}$ αναπαριστά το συνολικό εισόδημα του παρόχου που προκύπτει από όλες τις τρέχουσες συνόδους. Με άλλα λόγια, δείχνει τι κερδίζει ο πάροχος στη στρατηγική S_2C_2.
- Παρόμοια, ο όρος $\boldsymbol{a_{21}}$ δείχνει το κέρδος του παρόχου αν ο πελάτης επιλέξει να φύγει. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να αφαιρέσουμε την απώλεια εισοδήματος L από το συνολικό εισόδημα και να προσθέσουμε την ποινή L_c.
- Ο όρος $\boldsymbol{a_{12}}$ δηλώνει την απόδοση του παρόχου στη στρατηγική S_1C_2. Εκ πρώτης όψεως θα ισχυριζόταν κανείς ότι η περίπτωση αυτή αποφέρει τη μέγιστη απόδοση στον πάροχο. Ωστόσο, σε ένα φορτωμένο σύστημα η εισαγωγή ενός νέου πελάτη μπορεί να μειώσει τους πόρους που διατίθενται στις τρέχουσες συνόδους, δηλαδή σε υποβάθμιση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσιών. Κατά συνέπεια, ορισμένοι πελάτες μπορεί να επιλέξουν να φύγουν και να προκληθεί έτσι σημαντική απώλεια εισοδήματος στον πάροχο. Η υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσιών μπορεί να προσδιοριστεί μέσα από παρατηρήσεις προσομοιώσεων σε πραγματικό χρόνο. Συνεπώς, το συνολικό εισόδημα του παρόχου ισούται με το εισόδημα από τις τρέχουσες συνόδους C συν το αναμενόμενο κέρδος από τη νέα σύνοδο μείον την πιθανή απώλεια εισοδήματος λόγω δυσαρεστημένων πελατών F.
- Όμοια, ο όρος $\boldsymbol{a_{11}}$ δείχνει την απόδοση του παρόχου στην περίπτωση που ο πελάτης αποφασίσει να φύγει. L είναι η απώλεια εισοδήματος και L_c είναι η ποινή που καταβάλλει ο πελάτης.

Δεδομένου ότι όσο πιο ικανοποιημένος είναι ο χρήστης, τόσο πιο απίθανο είναι να εγκαταλείψει τον πάροχο και ότι το ποσοστό *QoS(%)* εκφράζει την ικανοποίηση του χρήστη, μπορούμε να υπολογίσουμε την πιθανότητα αποχώρησής του ως

$$p_{leave} = 1 - \left(QoS\left(\%\right) / 100 \right) \tag{2.30}$$

Έτσι μπορούμε να ορίσουμε την αναμενόμενη συνολική απώλεια F σε χρηματική αξία ως

$$F = \sum_{i=1}^{n(t)} p_{leave_i} L_i \tag{2.31}$$

όπου p_{leave_i} είναι η πιθανότητα ο πελάτης i να αποφασίσει να φύγει και L_i είναι η αντίστοιχη απώλεια εισοδήματος για τον πάροχο.

Όσον αφορά την επίλυση του παιγνίου, διακρίνονται δύο περιπτώσεις. Υποθέτοντας ότι το σύστημα δεν είναι κορεσμένο, μια αίτηση γίνεται δεκτή και η πιθανότητα ένας πελάτης να φύγει p_{leave_i} είναι κοντά στο 0. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μια ισορροπία Nash στη

στρατηγική S_1C_2, δηλαδή όταν ο πάροχος αποδέχεται την αίτηση και ο πελάτης αποφασίζει να παραμείνει. Στην περίπτωση τώρα που το σύστημα έχει αρκετό φορτίο ή είναι κορεσμένο, η αίτηση μπορεί να μη γίνει δεκτή και η πιθανότητα ένας πελάτης να φύγει p_{leave_i} είναι μεγαλύτερη από το μηδέν. Ακόμη και στην περίπτωση αυτή υπάρχει μια ισορροπία Nash στη στρατηγική S_iC_j, η οποία εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ ορισμένων παραμέτρων στους πίνακες αποδόσεων. Η νέα αίτηση γίνεται δεκτή αν το αναμενόμενο κέρδος C είναι μεγαλύτερο από το την αναμενόμενη συνολική απώλεια εισοδήματος F. Ειδάλλως, ο πάροχος έχει συμφέρον να απορρίψει την αίτηση. Με βάση τις δύο αυτές αποδείξεις, η ύπαρξη ισορροπίας Nash είναι εγγυημένη και πάντα υπάρχει λύση στο προτεινόμενο παίγνιο.

$$i = \begin{cases} 1 & if\ a_{11} \geq a_{21} \\ 2 & if\ a_{11} < a_{21} \end{cases} \Rightarrow i = \begin{cases} 1 & if\ C \geq F \\ 2 & otherwise \end{cases} \tag{2.32}$$

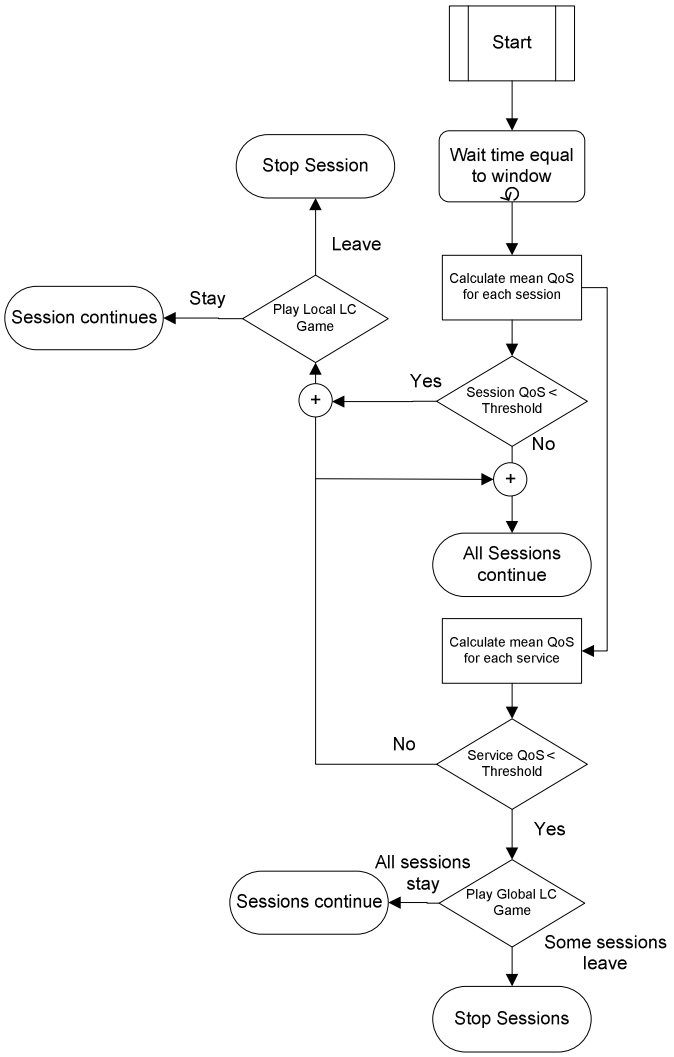
$$j = \begin{cases} 1 & if\ \{i = 1\ and\ b_{11} \geq b_{12}\}\ or\ \{i = 2\ and\ b_{21} \geq b_{22}\} \\ 2 & if\ \{i = 1\ and\ b_{11} < b_{12}\}\ or\ \{i = 2\ and\ b_{21} < b_{22}\} \end{cases} \tag{2.33}$$

2.5.4 Το Παίγνιο Ελέγχου Φορτίου

Το παίγνιο ελέγχου φορτίου παίζεται παρόμοια με το παίγνιο ελέγχου αποδοχής κλήσεων. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι το παίγνιο ελέγχου φορτίου παίζεται περιοδικά κατά τη διάρκεια εξυπηρέτησης των συνόδων. Μέσα από τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται ο τερματισμός συνόδων που καταναλώνουν άπληστα τους πόρους του δικτύου, προκαλώντας έτσι υποβάθμιση της προσφερόμενης ποιότητας υπηρεσιών στους υπόλοιπους πελάτες και μειώνοντας κατά συνέπεια το συνολικό εισόδημα του παρόχου. Επιπλέον, οι δυσαρεστημένοι πελάτες έχουν τη δυνατότητα να αναζητήσουν πιο αποτελεσματικά δίκτυα, με βάση τις προτιμήσεις τους. Για παράδειγμα, οι πελάτες που αποστρέφονται τον κίνδυνο ανέχονται χαμηλά επίπεδα QoS και προτιμούν να μείνουν στον ίδιο πάροχο προκειμένου να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος.

Διακρίνονται δύο τύποι του παιγνίου ελέγχου φορτίου: το *Τοπικό* και το *Καθολικό* Παίγνιο Ελέγχου Φορτίου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διαδικασία ελέγχου φορτίου επαναλαμβάνεται περιοδικά, ανεξάρτητα από τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων. Αναφερόμαστε στο χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων του παιγνίου ως *«Παράθυρο Χρόνου»,* δεδομένου ότι το παίγνιο ελέγχου φορτίου λαμβάνει υπόψη δεδομένα που προέρχονται κατά τη διάρκεια μόνο του τελευταίου παραθύρου χρόνου. Συνεπώς, η QoS που ανατίθεται σε μια σύνοδο ή υπηρεσία απεικονίζει μόνο την πιο πρόσφατη κατάσταση του δικτύου, επιτρέποντας έτσι στο σχήμα ελέγχου φορτίου να αντιδράσει γρήγορα σε περίπτωση υποβάθμισης της ποιότητας υπηρεσίας.

Στην αρχή κάθε γύρου του παιγνίου υπολογίζεται η μέση QoS για κάθε σύνοδο και η μέση QoS για κάθε τύπο υπηρεσίας. Το κατώφλι QoS είναι το ελάχιστο ανεκτό επίπεδο QoS. Αν το επίπεδο QoS τουλάχιστον ενός τύπου υπηρεσίας είναι μικρότερο από το κατώφλι QoS, τότε εκκινείται το καθολικό παίγνιο ελέγχου φορτίου, κατά το οποίο παίζονται παίγνια μεταξύ του παρόχου και όλων των τρεχόντων συνόδων. Ως αποτέλεσμα, μπορεί είτε απογοητευμένοι πελάτες να εγκαταλείψουν τον πάροχο ή ο πάροχος να τερματίσει συνόδους που δεν αποφέρουν το αναμενόμενο κέρδος. Αν έστω ένας παίκτης αποφασίσει ότι δεν τον συμφέρει να διατηρήσει τη σύνδεση, τότε πραγματοποιείται διαπομπή σε άλλον πάροχο. Ο πελάτης είναι υποχρεωμένος να καταβάλλει ποινή μόνο στην περίπτωση που αποφασίζει αυτόβουλα να εγκαταλείψει τον πάροχο. Από την άλλη πλευρά, αν δεν πραγματοποιηθεί το καθολικό παίγνιο και για κάποια σύνοδο διαπιστωθεί επίπεδο QoS χαμηλότερο από το κατώφλι QoS, τότε εκκινείται το τοπικό παίγνιο ελέγχου φορτίου. Το παίγνιο αυτό παίζεται μόνο μεταξύ του παρόχου και των συνόδων που το πυροδότησαν, ενώ οι υπόλοιπες σύνοδοι μένουν ανεπηρέαστες. Όλα τα παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 2.15.



Εικόνα 2.15. Παίγνιο Ελέγχου Φορτίου

2.5.5 Προσομοίωση Σεναρίου με Έναν Πάροχο

Ο προτεινόμενος μηχανισμός αποφυγής συμφόρησης προσομοιώθηκε στον προσομοιωτή δικτύων ns2, χρησιμοποιώντας και CBR και TCP κίνηση. Πιο συγκεκριμένα, η τηλεφωνία υλοποιήθηκε ως υπηρεσία CBR/UDP σύμφωνα με την κωδικοποίηση G.711, με μέγεθος πακέτων 120 bytes και μεσοδιάστημα 15 ms. Έπειτα υλοποιήθηκε η υπηρεσία FTP/TCP με μέγεθος πακέτων 512 bytes. Κάθε φορά που εκτελείται ένα παίγνιο, γίνεται επεξεργασία των αρχείων trace που παράγει το ns2 με χρήση ενός αρχείου awk και εξάγονται οι μέσες τιμές για τις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας.

Q	L_c	C_{cust}	C	L	R_0	W_1	W_2	window
0.03	0.3	1.32 for Voice 2.4 for FTP	3	1	0.1	0.6	0.4	10 sec

Πίνακας 2.13. Παράμετροι προσομοίωσης

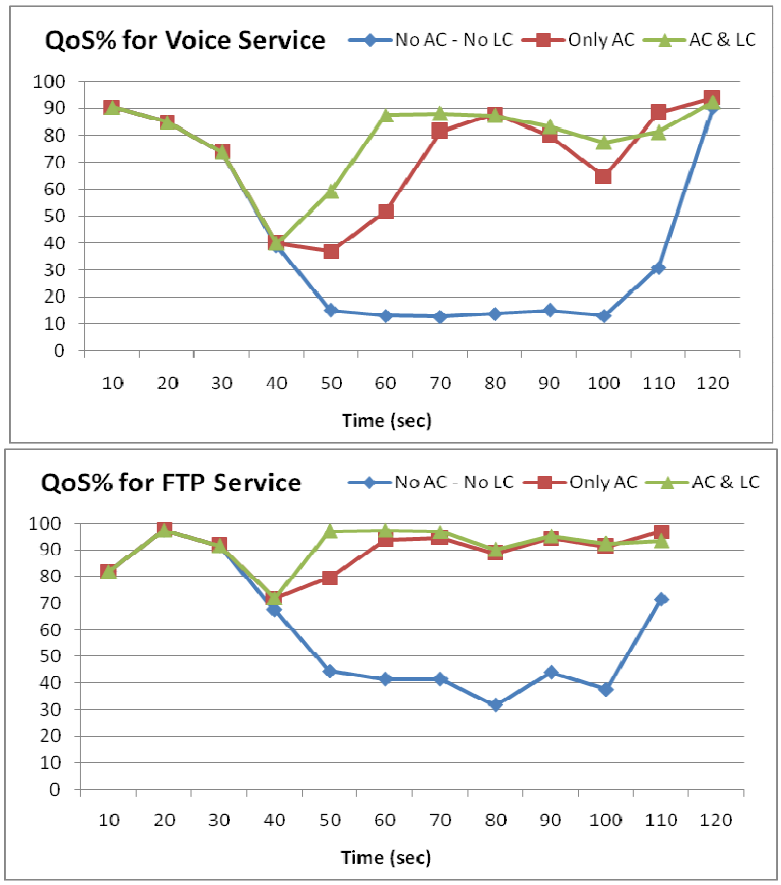
	Voice			FTP		
	Min	**Max**	**w**	**Min**	**Max**	**w**
Delay(ms)	10	60	0.4	10	50	0.2
Jitter(ms)	0	10	0.4	0	20	0.1
Thr/put(kbps)	10	65	0.1	10	100	0.7
P. Loss (%)	0	1	0.1	0	1	0.0

Πίνακας 2.14. Όρια κανονικοποίησης

Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές παραμέτρων που φαίνονται στον Πίνακα 2.13. Οι παράμετροι C_{cust}, L_c, c, L και R_o εκφράζουν χρηματική αξία που αναφέρεται στη συνολική διάρκεια μιας συνόδου. Οι τιμές αυτές μπορούν να εξαχθούν από τα στατιστικά του παρόχου. Από την άλλη πλευρά, η τιμή της παραμέτρου q αναφέρεται στη διάρκεια ενός μόνο παραθύρου χρόνου. Σημειώνεται ότι με βάση τις επιλεγμένες τιμές, το κατώφλι QoS υπολογίζεται ίσο με 40% για την τηλεφωνία και 70% για το FTP. Το ποσοστό QoS(%) υπολογίζεται μέσα από την κανονικοποίηση των μέσων τιμών παραμέτρων QoS, σε ένα διάστημα που καθορίζεται από τη χειρότερη και βέλτιστη απόδοση του συστήματος, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.14. Αυτό θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επεξήγηση των αποτελεσμάτων, αφού διαφορετικά διαστήματα κανονικοποίησης διαφοροποιούν το ποσοστό QoS(%) σε κάθε υπηρεσία.

Επιπλέον, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας για συνδέσεις CBR, μια νέα αίτηση FTP επιτρέπεται να συμμετάσχει στο παίγνιο ελέγχου αποδοχής κλήσεων μόνο αν η μέση ποιότητα υπηρεσίας QoS(%) για όλες τις τρέχουσες συνόδους είναι τουλάχιστον 60%. Η αναλογία υπηρεσιών ήταν 2:1, ενώ η διάρκεια της προσομοίωσης ήταν 120 δευτερόλεπτα. Ο χρόνος αυτός αποδείχτηκε αρκετός ώστε να παρατηρηθεί συμφόρηση

τουλάχιστον μία φορά στο σύστημα. Επίσης, για λόγους απλότητας, τα βάρη w_1 και w_2 θεωρήθηκαν ίδια για όλες τις αιτήσεις. Στην πραγματικότητα αυτές οι τιμές πρέπει να είναι διαφορετικές για κάθε χρήστη ώστε να αντικατοπτρίζουν τις προτιμήσεις του.



Εικόνα 2.16. Επίδραση των δύο παιγνίων στην ποιότητα υπηρεσίας α) για τηλεφωνία β) για FTP

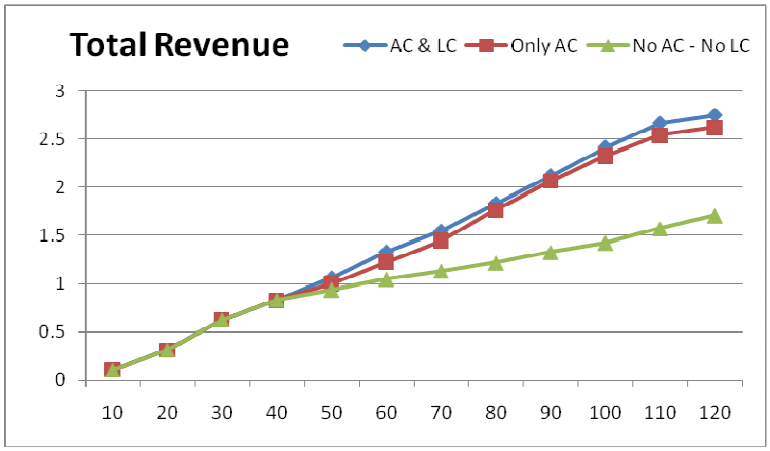
Προκειμένου να διαπιστωθεί η βελτίωση στη συνολικά προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας, πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις της προσομοίωσης. Αρχικά δεν εφαρμόστηκε κανένας έλεγχος αποφυγής συμφόρησης, γεγονός που συνεπάγεται ότι όλες οι αιτήσεις έγιναν δεκτές και καμία σύνοδος δεν τερματίστηκε. Στη δεύτερη επανάληψη εφαρμόστηκε μόνο ο έλεγχος αποδοχής κλήσεων, ενώ στο τέλος εφαρμόστηκαν και οι δύο έλεγχοι. Σε όλες τις περιπτώσεις καταγράφεται η μέση QoS και για τους δύο τύπους υπηρεσιών στο τέλος κάθε παραθύρου χρόνου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φαίνονται στην Εικόνα 2.16, όπου φαίνεται ότι η Τρίτη επανάληψη έδωσε τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η απουσία και των δύο ελέγχων κατέληξε σε σημαντική συμφόρηση του συστήματος, με συνέπεια ορισμένες σύνοδοι να μην μπορούν να εξυπηρετηθούν και να παρουσιάσουν μη αποδεκτά ποσοστά QoS(%). Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι περίπου μετά από 40 δευτερόλεπτα το σύστημα παρουσιάζει συμφόρηση. Κατά τη διάρκεια του αμέσως επόμενου παραθύρου χρόνου, οι εισερχόμενες αιτήσεις απορρίπτονται και ο έλεγχος φορτίου τερματίζει ορισμένες συνόδους. Το σύστημα

τότε επανέρχεται σε φυσιολογική λειτουργία, μέχρι που εμφανίζεται μια μικρότερη συμφόρηση, περίπου στα 100 δευτερόλεπτα.

Ο στόχος αυτής της δουλειάς είναι η παροχή ενός αλγορίθμου που θα μεγιστοποιεί όχι μόνο την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσίας στους πελάτες, αλλά και το κέρδος των παρόχων. Μέχρι τώρα δείξαμε ότι το πρώτο μέρος αυτού του στόχου επιτυγχάνεται, συνεπώς πρέπει να εξετάσουμε και κατά πόσο η διαδικασία αυτή συμφέρει τους παρόχους. Υποθέτουμε για το σκοπό αυτό ότι ο αλγόριθμος κοστολόγησης των παρόχων λαμβάνει υπόψη το ποσοστό QoS που προσφέρεται στους πελάτες. Το συνολικό εισόδημα του παρόχου υπολογίζεται ως

$$\mathrm{R}_{total} = \sum_{i=0}^{i=service_num} \sum_{k_i=0}^{k_i} \left(QoS_{k_i}(\%)/100 \right) \cdot w_{\cos t} \qquad (2.34)$$

όπου *service_num* είναι ο αριθμός των υπηρεσιών, *k* είναι ο αριθμός των ενεργών συνόδων για το συγκεκριμένο τύπο υπηρεσίας και w_{cost} είναι το κόστος ανά παράθυρο χρόνου για μία σύνοδο με 100% QoS. Με άλλα λόγια, w_{cost} είναι το μέγιστο ποσό που μπορεί να πληρώσει ένας πελάτης κατά τη διάρκεια ενός παραθύρου χρόνου. Καθώς μειώνεται το ποσοστό της προσφερόμενης QoS, μειώνεται και το ποσό που υποχρεούται να πληρώσει ο πελάτης. Η Εικόνα 2.17 δείχνει το συνολικό εισόδημα που προκύπτει και στις τρεις επαναλήψεις της προσομοίωσης. Όπως και με την ποιότητα υπηρεσίας, ο συνδυασμός των δύο παιγνίων προσφέρει το μέγιστο εισόδημα στον πάροχο, συνεπώς ο προτεινόμενος μηχανισμός προστατεύει τα συμφέροντα και των δύο πλευρών.



Εικόνα 2.17. Συνολικό εισόδημα παρόχου

2.5.6 Γενίκευση Αλγορίθμου και Προσομοίωση για Πολλούς Παρόχους

Στην παράγραφο αυτή εξετάζουμε μια γενικευμένη εκδοχή του προηγούμενου σχήματος σε ένα περιβάλλον ετερογενών δικτύων. Υποθέτουμε ότι κάθε πελάτης έχει συμβόλαιο με τον κοντινότερο πάροχο, αλλά σε περίπτωση έλλειψης πόρων ο πάροχος μπορεί να ανακατευθύνει τον πελάτη σε άλλον πάροχο. Με βάση αυτές τις υποθέσεις μπορούν να αναγνωριστούν τέσσερις περιπτώσεις:

- Και ο πελάτης και ο πάροχος είναι ικανοποιημένοι: στην περίπτωση αυτή εκκινείται/διατηρείται η σύνοδος.
- Μόνο ο πελάτης είναι ικανοποιημένος: γίνεται διαπομπή σε άλλον πάροχο χωρίς ποινή στον πελάτη.
- Μόνο ο πάροχος είναι ικανοποιημένος: γίνεται διαπομπή σε άλλον πάροχο και επιβάλλεται ποινή στον πελάτη.
- Ούτε ο πελάτης ούτε ο πάροχος είναι ικανοποιημένοι: όπως στην δεύτερη περίπτωση, γίνεται διαπομπή σε άλλον πάροχο χωρίς ποινή στον πελάτη.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στον ns2. Το σενάριο της προσομοίωσης περιλαμβάνει τρεις παρόχους (δίκτυα WLAN 802.11b) και 100 πελάτες τυχαία τοποθετημένους σε μια τοπολογία 500m x 500m, 1/3 από τους οποίους αιτούνται TCP υπηρεσίες και 2/3 αιτούνται CBR υπηρεσίες. Η διάρκεια των προσομοιώσεων είναι 300 δευτερόλεπτα. Υποθέτουμε ότι ένας πάροχος δέχεται μια νέα αίτηση μόνο αν το ποσοστό χρησιμοποίησης εύρους ζώνης βρίσκεται κάτω από το *κατώφλι αποδοχής*. Ένα παρόμοιο κατώφλι καθορίζεται και από την πλευρά του πελάτη ώστε να αντικατοπτρίζει τις απαιτήσεις του, σύμφωνα με το Service Level Agreement (SLA). Για όλους τους παρόχους το κατώφλι αποδοχής τίθεται ίσο με 80%, ενώ για τους πελάτες ποικίλει από 30 έως 80%. Επιπλέον, το παράθυρο χρόνο τίθεται ίσο με 20 δευτερόλεπτα, με βάση τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου συστήματος.

Αρχικά εξετάζουμε την επίδραση των δύο παιγνίων στην ποιότητα υπηρεσίας που προσφέρεται στους πελάτες. Όπως στην προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιούμε τρεις επαναλήψεις, όπου εφαρμόζουμε κανέναν, έναν ή δύο μηχανισμούς ελέγχου αντίστοιχα. Άλλο ένα θέμα που πρέπει να διερευνηθεί είναι ο τρόπος με τον οποίο ένας πάροχος αποφασίζει πού να προωθήσει μια αίτηση υπηρεσίας. Για λόγους απλότητας, υποθέτουμε ότι στην περίπτωσή μας τα οικονομικά κίνητρα είναι τα ίδια για όλους τους παρόχους, οπότε μόνο παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας λαμβάνονται υπόψη. Διακρίνονται τα τρία παρακάτω σενάρια διαπομπής:

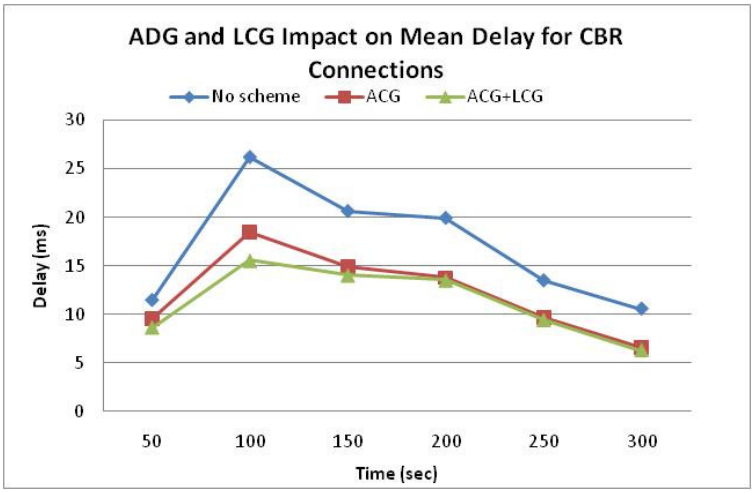
- Διαπομπή με βάση την απόσταση: διαπομπή στον κοντινότερο πάροχο.
- Διαπομπή με βάση τη ρυθμοαπόδοση: διαπομπή στον πάροχο με το χαμηλότερο ποσοστό χρησιμοποίησης εύρους ζώνης.
- Διαπομπή με βάση το παίγνιο: διαπομπή στον πάροχο που προσφέρει την υψηλότερη απόδοση με βάση τα προτεινόμενα παίγνια.

Παρόλα αυτά, ένας πάροχος μπορεί να εγγυάται υψηλά επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας για κοντινούς κόμβους, αλλά όχι και για μακρινούς. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση του *παράγοντα εγγύτητας (proximity factor - pf)*, ο οποίος εκφράζει την % υποβάθμιση της ποιότητας υπηρεσίας ως αποτέλεσμα της απόστασης μεταξύ του κόμβου-πελάτη και του

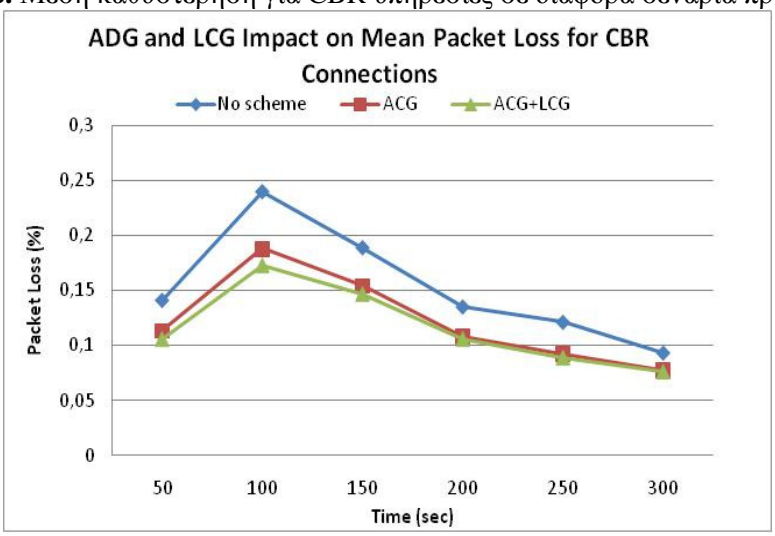
σημείου πρόσβασης-παρόχου. Συνεπώς, οι παράμετροι QoS που υπολογίζονται για κάθε πάροχο πρέπει να μειωθούν κατά ένα συγκεκριμένο ποσό το οποίο αυξάνεται ανάλογα με την απόσταση. Υποθέτοντας ότι *d* είναι η απόσταση (σε μέτρα) και *mp* είναι η τιμή % μιας παραμέτρου, η προσαρμοσμένη τιμή της παραμέτρου είναι

$$\mathrm{mp}_{\mathrm{new}} = \mathrm{mp} - \mathrm{pf} \cdot \mathrm{d} \tag{2.35}$$

Ορισμένες παράμετροι οικονομικής φύσης πρέπει επίσης να καθοριστούν. Υποθέτουμε ότι κάθε πάροχος χρεώνει διαφορετικά, από 0.0001 έως 0.0002 οικονομικές μονάδες ανά ληφθέν πακέτο, η ποινή των πελατών είναι 0.3 χρηματικές μονάδες και ο φόρος για τη διαπομπή είναι το 5% του εισοδήματος που θα κερδίσει ο νέος πάροχος.



Εικόνα 2.18. Μέση καθυστέρηση για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης

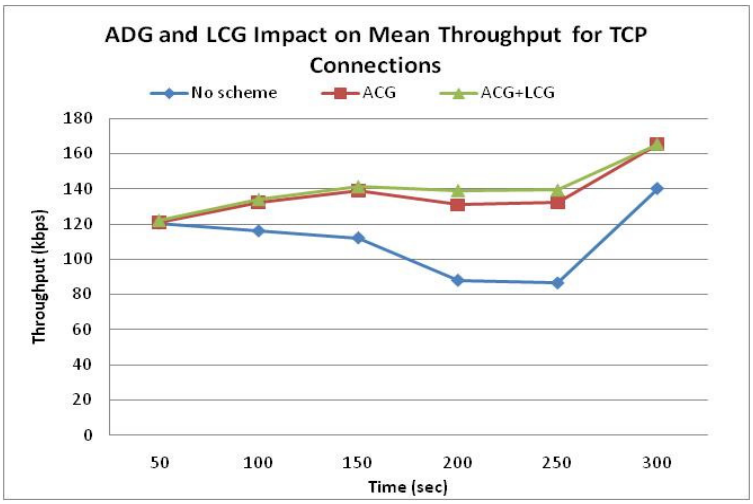


Εικόνα 2.19. Μέση απώλεια πακέτων για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης

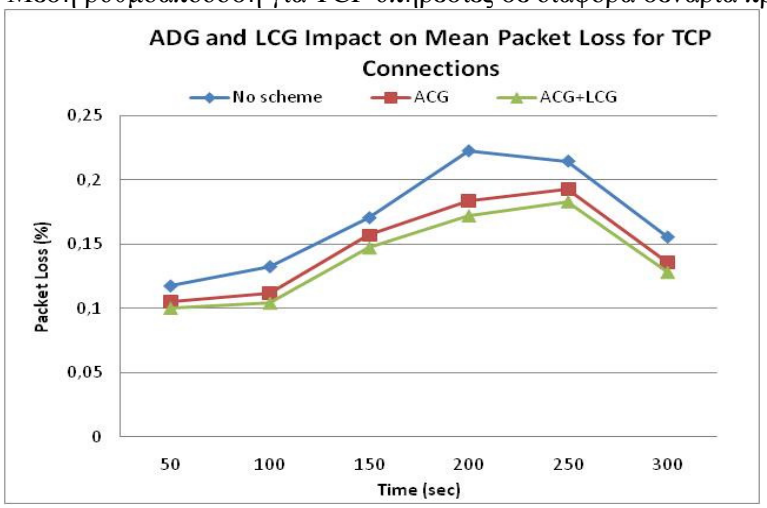
Στη συνέχεια ακολουθεί μια συζήτηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις. Οι επόμενες εικόνες δείχνουν ενδεικτικά αποτελέσματα για όλους τους παρόχους ώστε να φανεί πόσο αποτελεσματικά αντιμετωπίζεται η συμφόρηση σε κάθε περίπτωση. Πέραν από την επίδοση του αλγορίθμου όσον αφορά στην καταπολέμηση της

συμφόρησης εξετάζεται επίσης η επίδοσή του ως προς το κόστος για τους πελάτες και το εισόδημα για τους παρόχους, με βάση τις εξισώσεις (2.24) και (2.25).

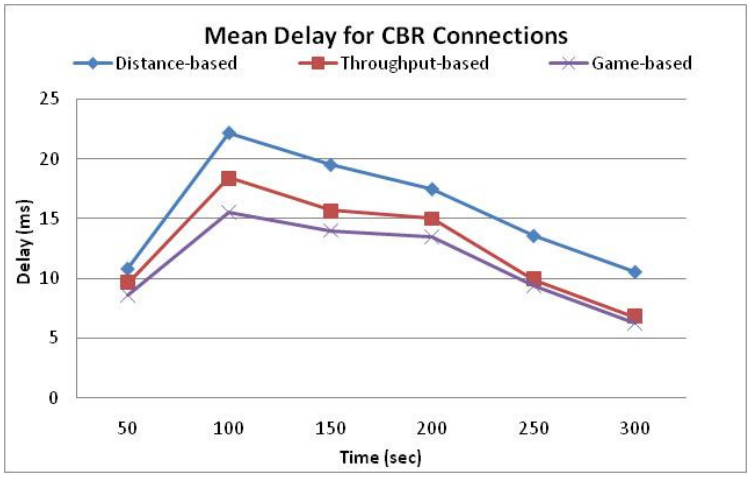
Οι Εικόνες 2.18-2.21 δείχνουν τις μέσες τιμές των κύριων παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας (Delay, Jitter, Packet Loss, Throughput) για τις CBR και TCP συνδέσεις. Σύμφωνα με τις εικόνες, το σύστημα εμφανίζει συμφόρηση για τις CBR συνδέσεις στα 100 δευτερόλεπτα, ενώ για τις TCP συνδέσεις στα 200-250 δευτερόλεπτα. Οι εικόνες αυτές δείχνουν επίσης ότι η εφαρμογή και των δύο ελέγχων αυξάνει την απόδοση του συστήματος μέχρι και 30%, μαζί με μια αύξηση 16% στο συνολικό κόστος. Παρόλο που υπάρχει μια αύξηση στο κόστος, προσφέρονται πιο ικανοποιητικές υπηρεσίες στους πελάτες και εξασφαλίζεται υψηλότερο εισόδημα για τους παρόχους, αφού τελικά εξυπηρετούνται όλες οι αιτήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που δεν εφαρμοστεί κανένας μηχανισμός ελέγχου (και άρα όχι συμφωνίες μεταξύ παρόχων), περίπου 10% των αιτήσεων δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν.



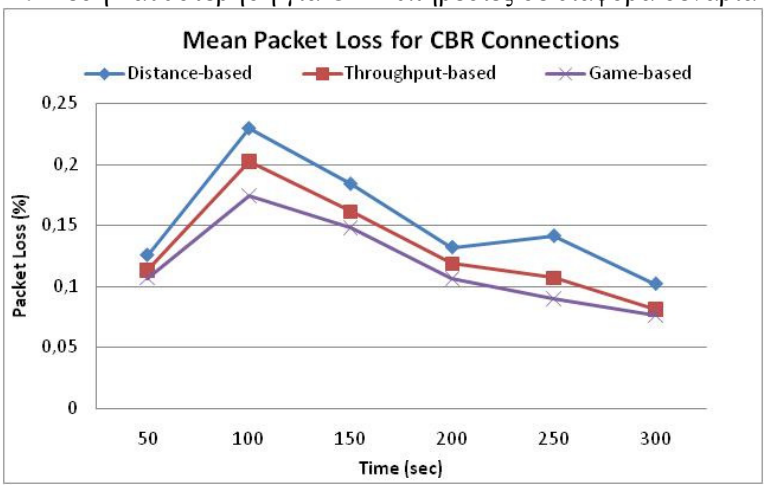
Εικόνα 2.20. Μέση ρυθμοαπόδοση για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης



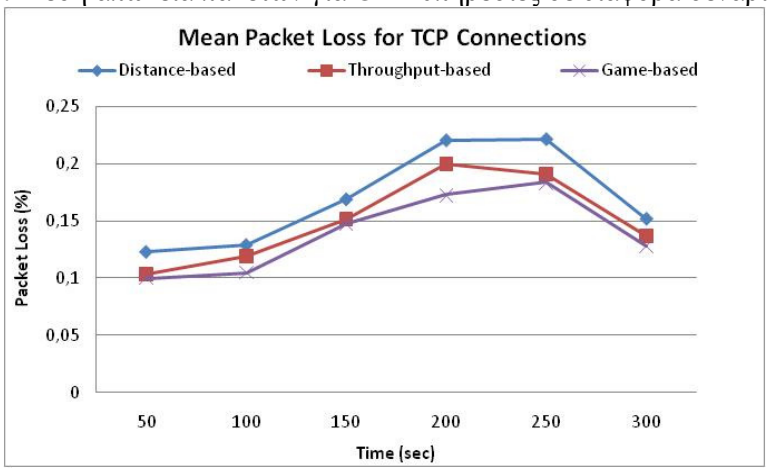
Εικόνα 2.21. Μέση απώλεια πακέτων για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια προσομοίωσης



Εικόνα 2.22. Μέση καθυστέρηση για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής



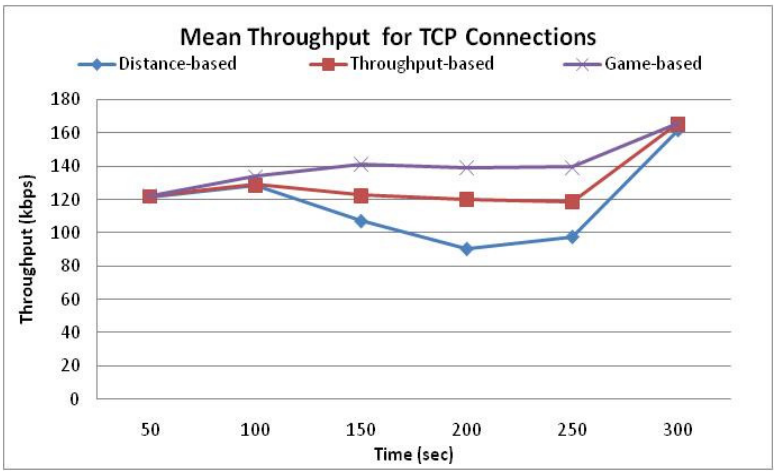
Εικόνα 2.23. Μέση απώλεια πακέτων για CBR υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής



Εικόνα 2.24. Μέση απώλεια πακέτων για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής

Συνεχίζοντας με την ανάλυση, εξετάζουμε πώς αποδίδει το κάθε σενάριο διαπομπής για το συνδυασμό του ελέγχου αποδοχής κλήσεων και του ελέγχου φορτίου. Όπως φαίνεται από τις Εικόνες 2.22-2.25, η διαπομπή με βάση τα παίγνια αποδίδει καλύτερα σε σχέση με τα άλλα σενάρια όσον αφορά την απόδοση σε QoS. Η ανωτερότητα αυτού του σεναρίου εξηγείται από το γεγονός ότι λαμβάνει υπόψη τέσσερις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας, ενώ τα άλλα σενάρια περιλαμβάνουν είτε μόνο τη ρυθμοαπόδοση είτε την απόσταση. Πιο

συγκεκριμένα, παρατηρείται μια αύξηση 27% και 32% στην ποιότητα υπηρεσίας για τις συνδέσεις CBR και TCP αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο ότι πραγματοποιούνται διαπομπές πιο συχνά σε σχέση με τα άλλα σενάρια. Η αύξηση αυτή συνοδεύεται με μια αύξηση κόστους 16% και 14% αντίστοιχα, που είναι αναλογικά μικρότερη.



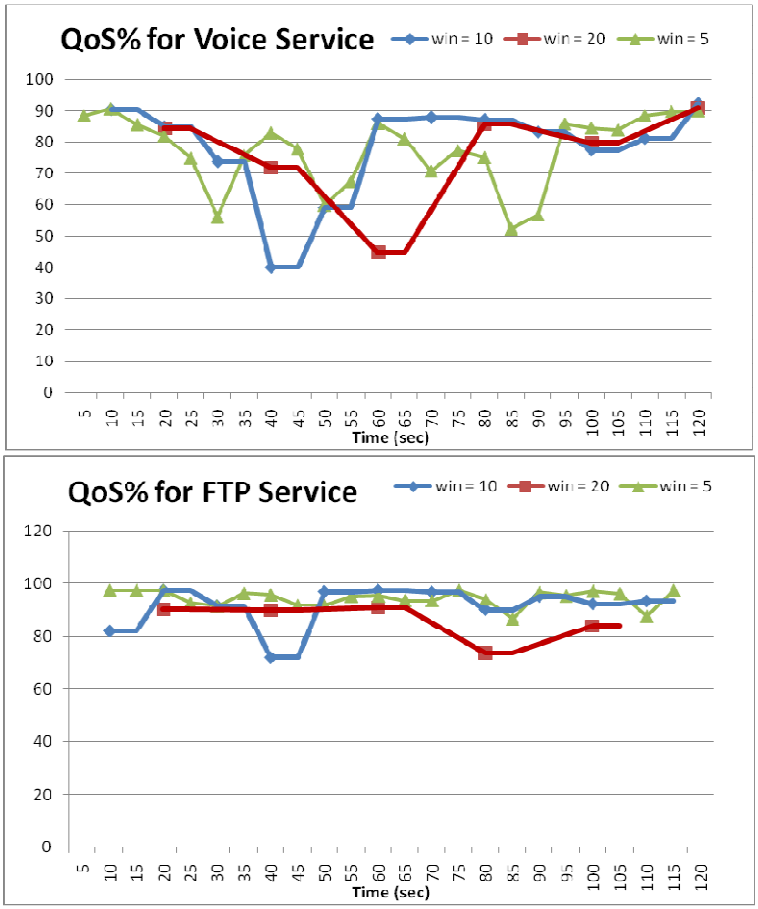
Εικόνα 2.25. Μέση ρυθμοαπόδοση για TCP υπηρεσίες σε διάφορα σενάρια διαπομπής

2.5.7 Επίδραση του Παραθύρου Χρόνου

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του παραθύρου χρόνου (time window). Η ανάλυση ξεκινάει από το σενάριο με έναν πάροχο. Η επιλογή του παραθύρου χρόνου είναι ζωτικής σημασίας, καθώς μια υπερβολικά μεγάλη τιμή μπορεί να μην επιτρέψει στο σύστημα να αντιδράσει γρήγορα σε περίπτωση συμφόρησης, ενώ μια υπερβολικά χαμηλή τιμή μπορεί να προσθέσει σημαντικό υπολογιστικό φόρτο και κατά συνέπεια να μειώσει την απόδοση του συστήματος. Για την προσομοίωση με έναν πάροχο επιλέχθηκε η τιμή των 10 δευτερολέπτων. Ωστόσο, η απόδοση του συστήματος καταγράφτηκε και για άλλες τιμές του παραθύρου χρόνου, στα 5 και 20 δευτερόλεπτα.

Η Εικόνα 2.26 απεικονίζει την απόδοση του συστήματος για τις διάφορες τιμές του παραθύρου χρόνου. Όταν το παράθυρο χρόνου τίθεται στα 20 δευτερόλεπτα η αντίδραση του συστήματος στη συμφόρηση είναι καθυστερημένη, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η ποιότητα των συνόδων τηλεφωνίας. Αυτό οφείλεται στο ότι το σύστημα δεν εντοπίζει εγκαίρως τη συμφόρηση και συνεπώς περισσότερες αιτήσεις γίνονται δεκτές σε σχέση με το παράθυρο των 10 δευτερολέπτων. Αντίθετα, όταν το παράθυρο είναι στα 5 δευτερόλεπτα το σύστημα γίνεται υπερβολικά αυστηρό και απορρίπτονται κάποιες αιτήσεις που θα μπορούσαν να εξυπηρετηθούν ικανοποιητικά μετά από λίγα δευτερόλεπτα. Στην Εικόνα 2.27 φαίνεται το συνολικό εισόδημα του παρόχου, το οποίο έχει σχεδόν ίδιες τιμές και στις τρεις περιπτώσεις. Δεδομένου όμως ότι ένας από τους στόχους των σύγχρονων μηχανισμών ελέγχου

συμφόρησης είναι η δικαιοσύνη (fairness), η τιμή των 10 δευτερολέπτων κρίνεται ως η πιο αποτελεσματική.

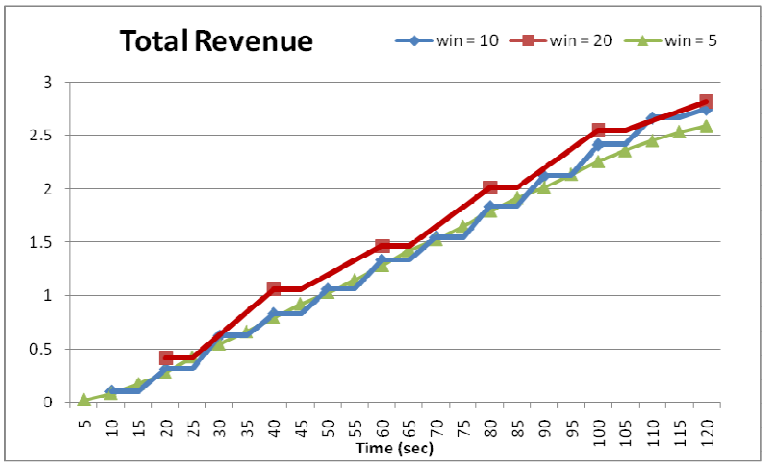


Εικόνα 2.26. Επίδραση του παραθύρου χρόνου στην ποιότητα υπηρεσίας α) για τηλεφωνία β) για FTP

Όσον αφορά το σενάριο προσομοίωσης με πολλούς παρόχους, παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα. Η επίδοση του συστήματος καταγράφηκε για διάφορες τιμές του παραθύρου χρόνου t_w από 10 έως 30 δευτερόλεπτα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για χαμηλές τιμές του παρατηρείται μια μικρή βελτίωση της τάξεως του 4% στις παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι λόγω του μικρότερου παραθύρου, πραγματοποιούνται έλεγχοι συμφόρησης πιο συχνά και απορρίπτονται ή τερματίζονται περισσότερες σύνοδοι. Παρόλα αυτά το κόστος αυξάνεται κατά 7%, που σημαίνει ότι το σύστημα γίνεται υπερβολικά αυστηρό και συνεπώς ακριβό για τους πελάτες. Αντιθέτως, μεγαλύτερες τιμές του παραθύρου χρόνου οδηγούν σε 4% μείωση της ποιότητας υπηρεσίας , που συνοδεύεται από μόνο 1.5% μείωση στο κόστος. Συνεπάγεται λοιπόν ότι για το συγκεκριμένο σύστημα, τα 20 δευτερόλεπτα είναι μια ικανοποιητική τιμή για το παράθυρο ελέγχου.

Αναμφίβολα η επιλογή του παραθύρου χρόνου παραμένει μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους του προτεινόμενου μηχανισμού και πρέπει να καθορίζεται ανάλογα με τα

χαρακτηριστικά του εκάστοτε σεναρίου προσομοίωσης. Επίσης, το μέγεθος του παραθύρου πρέπει να λαμβάνει υπόψη των αριθμών των τρεχουσών συνόδων, καθώς ένας μεγάλος αριθμός συνόδων αυξάνει την πολυπλοκότητα του μηχανισμού και συνεπώς απαιτείται περισσότερος χρόνος για τους υπολογισμούς. Ιδανικά, το μέγεθος του παραθύρου χρόνου θα πρέπει να έχει μια αρχική τιμή και στη συνέχεια να προσαρμόζεται δυναμικά ανάλογα με την κατάσταση του συστήματος.



Εικόνα 2.27. Επίδραση του παραθύρου χρόνου στο συνολικό εισόδημα παρόχου

2.5.8 Επίδραση του Κατωφλίου Αποδοχής

Άλλη μια παράμετρος που επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος είναι το κατώφλι αποδοχής (acceptance threshold). Χαμηλές τιμές χαρακτηρίζουν ένα αυστηρό σύστημα, ενώ υψηλές τιμές δείχνουν μεγαλύτερη ανεκτικότητα. Η απόδοση του συστήματος για το σενάριο με πολλούς παρόχους εξετάστηκε για μια ποικιλία τιμών μεταξύ 60% και 90%. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι χαμηλά κατώφλια μπορούν να οδηγήσουν σε μέχρι 5% βελτίωση της ποιότητας υπηρεσίας, με παράλληλη αύξηση έως 11% στο κόστος ωστόσο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα χαμηλά κατώφλια προκαλούν περισσότερα παίγνια ελέγχου φορτίου και συνεπώς περισσότερες διαπομπές. Από την άλλη πλευρά, υψηλές τιμές προκαλούν μέχρι 5% μείωση της ποιότητας υπηρεσίας, μαζί με μια αύξηση 3% του κόστους, η οποία δεν είναι επιθυμητή. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα, συνεπάγεται ότι για το συγκεκριμένο σύστημα ένα κατώφλι 80% μπορεί να δώσει βέλτιστα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.6: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΡΩΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ

2.6.1 Εισαγωγή στους Μηχανισμούς Κινήτρων

Οι μηχανισμοί κινήτρων στοχεύουν στην παροχή ενός πλαισίου που ωθεί τους παίκτες να συνεργαστούν για το κοινό όφελος όλων των συμμετεχόντων. Με άλλα λόγια, παρέχουν ένα κίνητρο ώστε κάθε οντότητα να προτιμάει να συνεργαστεί με άλλες οντότητες , ορισμένες φορές θυσιάζοντας τους δικούς της πόρους και άλλες φορές επωφελούμενη από τους πόρους των άλλων. Διακρίνονται δύο τύποι μηχανισμών κινήτρων:

- Οι *μηχανισμοί πίστωσης* (credit-based)
- Οι *μηχανισμοί φήμης* (reputation-based)

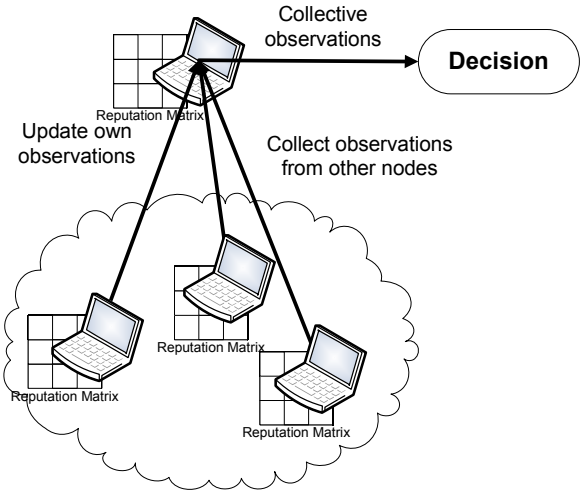
Η βασική ιδέα πίσω από τους μηχανισμούς πίστωσης είναι η χρησιμοποίηση των credits (χρηματικών ή όχι) ώστε να ξεπληρώνονται οι κόμβοι που προωθούν πακέτα άλλων κόμβων. Η πληρωμή αυτή λειτουργεί ως αποζημίωση για το κόστος μετάδοσης και μπαταρίας. Τα credits μπορούν να χρησιμοποιηθούν έπειτα από τους κόμβους για να προωθήσουν τα δικά τους πακέτα διαμέσου άλλων κόμβων, καταλήγοντας έτσι σε ένα μηχανισμό κινήτρων για λειτουργία relay. Οι κόμβοι που δε συνεργάζονται δε θα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο, αφού δε θα έχουν κερδίσει καθόλου credits. Σύμφωνα με το γενικό μηχανισμό των tokens, ο μετρητής token ενός χρήστη αυξάνεται κάθε φορά που ο τελευταίος προωθεί ένα πακέτο και μειώνεται ανάλογα με τον αριθμό των hops που χρειάζονται για να αποσταλεί ένα πακέτο του. Αυτό σημαίνει αναπόφευκτα ότι οι κόμβοι πρέπει να προωθούν περισσότερο από όσο στέλνουν, καθώς και ότι το ποσό της πληροφορίας που μπορεί να στείλει ένας κόμβος σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή περιορίζεται ανάλογα με τον αριθμό των tokens που διαθέτει.

Επιπλέον μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη μη συνεργαζόμενων κόμβων:

- Οι *κακόβουλοι κόμβοι*, οι οποίοι είτε είναι ελαττωματικοί και συνεπώς δεν μπορούν να ακολουθήσουν ένα πρωτόκολλο, είναι σκόπιμα κακοήθεις και προσπαθούν να επιτεθούν στο σύστημα.
- Οι *εγωιστές κόμβοι*, οι οποίοι έχουν ως στόχο να μεγιστοποιήσουν το δικό τους συμφέρον, το οποίο ορίζεται ως το κέρδος μείον το κόστος των πράξεών τους.

Για παράδειγμα, σε μερικές περιπτώσεις κάποιοι κόμβοι μπορεί να αρνηθούν να προωθήσουν πακέτα προκειμένου να διατηρήσουν τους περιορισμένους πόρους τους (π.χ. ενέργεια), προκαλώντας έτσι διαταραχή της κίνησης. Οι κόμβοι που επιδεικνύουν τέτοια συμπεριφορά αποκαλούνται εγωιστές. Η βασική ιδέα για τιμωρία κόμβων είναι ότι οι κόμβοι θα πρέπει είτε να ανταμείβονται είτε να τιμωρούνται με βάση τη συμπεριφορά τους. Οι

κόμβοι που προσφέρουν πόρους θα πρέπει να βοηθούνται. Από την άλλη πλευρά, οι εγωιστές κόμβοι θα πρέπει να απομονώνονται από το δίκτυο. Αυτό πρόκειται να συμβεί αν οι γειτονικοί κόμβοι αρνηθούν να προωθήσουν πακέτα που προέρχονται από εγωιστές κόμβους. Επιπρόσθετα, ορισμένα συστήματα μπορεί να τιμωρούν κόμβους που δε συμπεριφέρονται σωστά απομονώνοντάς τους από το δίκτυο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα προκειμένου να παρέχουν ένα κίνητρο συνεργασίας.



Εικόνα 2.28. Συγκεντρωτικές παρατηρήσεις σε μηχανισμούς φήμης

Τα συστήματα διαχείρισης φήμης διακρίνονται σε κεντροποιημένα και αποκεντροποιημένα, ανάλογα με το αν η φήμη υπολογίζεται σε μια κεντρική οντότητα ή σε κάθε κόμβο ξεχωριστά. Η φήμη είναι ένα δυναμικό μέγεθος που σχηματίζεται και ενημερώνεται συνεχώς μέσα από απευθείας παρατηρήσεις και από πληροφορίες που παρέχονται από άλλα μέλη της κοινότητας (Εικόνα 2.28).

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει όταν εξετάζεται η συμπεριφορά κόμβων είναι ότι, ορισμένες φορές, εξαιτίας συγκρούσεων πακέτων και παρεμβολών, οι συνεργατικοί κόμβοι ενδέχεται να θεωρηθούν λανθασμένα ως εγωιστές, γεγονός που προκαλεί μια κατάσταση εκδίκησης. Αυτή η λανθασμένη κρίση μπορεί να οδηγήσει τους κόμβους στο να μη συνεργάζονται και συνεπώς στην υποβάθμιση της απόδοσης του δικτύου. Με άλλα λόγια, κόμβοι που βρίσκονται σε μειονεκτική θέση και θεωρούνται ακούσια εγωιστές λόγω των συνθηκών, δε θα πρέπει να αποκλείονται από το δίκτυο με τα ίδια κριτήρια όπως οι κακόβουλοι κόμβοι. Επιπλέον, κόμβοι στα άκρα ενός δικτύου (απομακρυσμένοι κόμβοι) βρίσκονται σε μειονεκτική θέση εξαιτίας της τοποθεσίας τους. Κατά συνέπεια θα κερδίζουν σημαντικά λιγότερο από ότι οι κεντρικοί κόμβοι και θα τιμωρούνται για αυτό με χαμηλή QoS.

Σε αρκετές περιπτώσεις οι μηχανισμοί κινήτρων απαιτούνται όχι μόνο για να παρακινήσουν τους χρήστες να συνεργαστούν, αλλά και για να τους αποθαρρύνουν από το να

κλέψουν. Για παράδειγμα, οι κακόβουλοι κόμβοι μπορεί να αρνούνται να πληρώσουν. Για το λόγο αυτό πρέπει να θεωρηθούν και αντικίνητρα κατά του κλεψίματος.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο τύπων μηχανισμών κινήτρων.

Πλεονεκτήματα μηχανισμών φήμης	**Μειονεκτήματα μηχανισμών φήμης**
Υποκειμενικός τρόπος αξιολόγησης, αφού στηρίζεται σε παρατηρήσεις από πολλές πηγές	Κατανάλωση πόρων του συστήματος
Ανθεκτικοί απέναντι στη διάδοση ψευδών πληροφοριών από μικρές ομάδες κόμβων που ψεύδονται	Ευπαθείς σε διάδοση ψευδών πληροφοριών από μεγάλες ομάδες κόμβων που ψεύδονται
	Ανάγκη για τεχνικές ταυτοποίησης
	Σύνθετοι μηχανισμοί που απαιτούν πολύπλοκα συστήματα

Πίνακας 2.15. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανισμών φήμης

Πλεονεκτήματα μηχανισμών πίστωσης	**Μειονεκτήματα μηχανισμών πίστωσης**
Επιτυχείς στην υποκίνηση συνεργασίας	Αδυναμία εντοπισμού εγωιστών και κακόβουλων κόμβων
Χρήσιμοι σε multi-hop ασύρματα δίκτυα όπου η δράση και η αμοιβή δεν είναι ταυτόχρονες	Ο μέσος αριθμός των credits εντός του συστήματος πρέπει να διατηρείται σε λογικά επίπεδα ώστε να υπάρχουν κίνητρα
	Στις περισσότερες περιπτώσεις σύνθετοι αλγόριθμοι και δύσκολοι στην υλοποίηση
	Δύσκολη η δίκαιη χρέωση των χρηστών
	Κατανάλωση πόρων του συστήματος
	Άδικη κατανομή των credits, ιδιαίτερα για τους απομακρυσμένους κόμβους
	Ανάγκη για μηχανισμό ανακατανομής πλούτου
	Χρηματικές αμοιβές μπορεί να αποτελέσουν ισχυρό κίνητρο για απάτη

Πίνακας 2.16. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μηχανισμών πίστωσης

2.6.2 Μηχανισμοί Φήμης που Βασίζονται στη Θεωρία Παιγνίων

Θεωρούμε ότι έχουμε τρεις κόμβους, τους Α,Β και Γ. Ο Α θέλει να στείλει ένα πακέτο στον Γ. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω του Β, ο οποίος μπορεί να προωθήσει το πακέτο ή να το απορρίψει. Ο Α ακούει πάνω στην σύνδεση με τον Β και καταλαβαίνει αν ο Β προώθησε το πακέτο. Αν έγινε αυτό ο Β έχει κέρδος $\alpha \geq 1$ μονάδες που ονομάζεται κέρδος πακέτου (Packet Value) και χάνει 1 μονάδα -λόγω του ότι καταναλώνει τους ενεργειακούς πόρους του για να προωθήσει το πακέτο- που ονομάζεται κόστος πακέτου (Packet Cost). Η σύνδεση ανάμεσα σε δύο κόμβους είναι και προς τις δύο μεριές και έτσι ο ένας κόμβος πρέπει να προωθήσει τα πακέτα του άλλου. Μπορούμε να μοντελοποιήσουμε αυτή τη σύνδεση με ένα στρατηγικό παίγνιο δύο παικτών ανάμεσα στους δύο κόμβους, στο οποίο η στρατηγική του κάθε παίκτη είναι η πιθανότητα με την οποία απορρίπτει τα πακέτα. Συμβολίζουμε με i τον

ένα παίκτη και με *-i* τον αντίπαλό του. Με p_i συμβολίζουμε την πιθανότητα με την οποία ο κόμβος απορρίπτει τα πακέτα και η συνάρτηση απόδοσης του κόμβου δίνεται από τη σχέση: $u_i = p_i - a \cdot p_{-i}$. Αποδεικνύεται ότι αν και οι δύο παίκτες φέρονται εγωιστικά το κέρδος είναι 0 και για τους δύο. Το μόνο σημείο ισορροπίας κατά Nash είναι και οι δύο να φέρονται εγωιστικά, αν το παιχνίδι παιχτεί μια φορά. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες αν το παίγνιο επαναληφθεί μπορούμε να επιτύχουμε άλλο σημείο ισορροπίας [59].

2.6.2.1 Συνεργασία χωρίς Συγκρούσεις - Tit For Tat (TFT)

Αρχικά θα θεωρήσουμε την απλοϊκή περίπτωση που δεν υπάρχουν συγκρούσεις. Οι κόμβοι πρέπει να λάβουν υπόψη στην συμπεριφορά τους τις μελλοντικές επιπτώσεις των πράξεών τους. Με $p_i^{(k)}$ συμβολίζουμε την πιθανότητα να απορρίψει ο κόμβος το πακέτο στο *k*-οστό στάδιο και η σχέση που δίνει την πληρωμή σε αυτό το στάδιο είναι $u_i^{(k)} = p_i^{(k)} - a \cdot p_{-i}^{(k)}$. Το *δ (0<=δ<=1)* ονομάζεται παράμετρος απόρριψης και δείχνει την πιθανότητα να συνεχίσει το παιχνίδι μετά από κάθε στάδιο ο κάθε παίκτης. Είναι φανερό πως όσο μεγαλύτερο είναι το *δ* τόσο πιο πολύ θα κρατήσει το παιχνίδι (η σύνοδος για τα ad hoc δίκτυα) και αν *δ=0* τότε είναι μιας βαθμίδας. Η διάρκεια της συνόδου είναι ίση με *1/(1-δ).*

Σε αυτή την περίπτωση ο κόμβος αρχικά συνεργάζεται και τις επόμενες φορές κάνει ότι κάνει και ο άλλος κόμβος. Η πιθανότητα να απορριφθεί ένα πακέτο στο *k*-οστό στάδιο είναι ίση με:

$$\begin{cases} p_i^{(0)} = 0 \\ p_i^{(k)} = p_{-i}^{(k-1)} \quad \gamma\iota\alpha\ \kappa > 0 \end{cases} \tag{2.36}$$

Αυτό δείχνει ότι αν το *δ* είναι αρκετά μεγάλο τότε οι δύο κόμβοι δεν έχουν κάποιο λόγο να αποκλίνουν από την στρατηγική TFT και το αποτέλεσμα θα είναι η αμοιβαία συνεργασία. Παρόλα αυτά με αυτό το μοντέλο δεν λαμβάνεται υπόψη η φύση της μετάδοσης σε ασύρματα δίκτυα [36][59].

2.6.2.2 Συνεργασία με συγκρούσεις- Tit For Tat (TFT)

Αυτή η περίπτωση προσεγγίζει περισσότερο την πραγματικότητα αφού λαμβάνονται υπόψη οι συγκρούσεις. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί ταυτόχρονα με τον Β να προωθεί και ο Ε. Αυτό εμποδίζει τον Α να ακούσει ότι ο Β προώθησε το πακέτο και νομίζει ότι το απέρριψε. Μπορούμε να προσομοιώσουμε αυτή την περίπτωση με το δίλημμα του κρατούμενου με θόρυβο. Συμβολίζουμε με p_e την πιθανότητα να μετάδωσε το πακέτο ο κόμβος Β και να μην το παρατήρησε ο Α. Θεωρούμε ότι το πακέτο απορρίφθηκε αν πράγματι ο Β το απέρριψε ή ο

Β το προώθησε αλλά ο Α δεν το παρατήρησε [36]. Με αυτή τη λογική η αντιλαμβανόμενη λιποταξία του κόμβου *i* είναι ίση με $\hat{p}_i^{(k)} = p_e + (1 - p_e) * p_i^{(k)}$.

Τώρα τα πράγματα αλλάζουν και πρέπει να ορίσουμε εκ νέου τα δεδομένα για το TFT. Η συνολική απόδοση είναι $\widehat{U} = \sum_{k\geq 0} \delta^k * \hat{u}_i^{(k)}$ και στον τύπο για την πιθανότητα απόρριψης για το TFT βάζουμε όπου $p_{-i}^{(k-1)}$ το $\hat{p}_{-i}^{(k)}$. Πρέπει να σημειώσουμε ότι το p_e είναι σταθερό και δεν εξαρτάται από την πιθανότητα απόρριψης. Ο κάθε κόμβος παίζει ταυτόχρονα με όλους τους γείτονές του και διαλέγει ξεχωριστά την πιθανότητα απόρριψης για τον κάθε κόμβο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η επίδραση των συγκρούσεων είναι δραματική. Ακόμα και αν οι κόμβοι θέλουν να συνεργαστούν, μια αντιλαμβανόμενη λιποταξία μπορεί άδικα να τιμωρηθεί και το TFT να πυροδοτήσει μια διαδικασία αντιποίνων που θα οδηγήσει σε μηδενικό ρυθμό απόδοσης. Η αντιλαμβανόμενη πιθανότητα απόρριψης δίνεται σε αυτή την περίπτωση από τον τύπο $\hat{p}_i = 1 - (1 - p_e)^{k+1}$. Αυτό οδηγεί στο αυτή η πιθανότητα να τείνει στο 1. Άρα το TFT δεν μπορεί να διατηρήσει την αμοιβαία συνεργασία μεταξύ των κόμβων [36].

2.6.2.3 Generous Tit For Tat (GTFT)

Επειδή όπως είπαμε το TFT δεν μπορεί να διατηρήσει την αμοιβαία συνεργασία μεταξύ των κόμβων εισάγουμε μια νέα μέθοδος, την γενναιόδωρη TFT (GTFT). Αυτό γίνεται εισάγοντας στο TFT ένα κατώφλι ώστε το σύστημα να ανέχεται ένα μικρό αριθμό λιποταξιών χωρίς να τις τιμωρεί. Ορίζουμε το κατώφλι αυτό ως *g*. Τότε η πιθανότητα λάθους για να ισχύει το GTFT δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{cases} p_i^{(0)} = 0 \\ p_i^{(k)} = \max\left(\hat{p}_{-i}^{(k-1)} - g, 0\right) \quad \gamma\iota\alpha\ \kappa \geq 1 \end{cases} \tag{2.37}$$

Αν η τιμή της παραμέτρου απόρριψης για την στρατηγική GTFT είναι αρκετά μεγάλη μπορούμε να επιτύχουμε την συνεργασία των κόμβων. Μπορεί να αποδειχτεί ότι αν η τιμή του δ είναι αρκετά μεγάλη υπάρχει στρατηγική GTFT η οποία εξασφαλίζει την αμοιβαία συνεργασία. Στο παιχνίδι της επαναλαμβανόμενης αναμετάδοσης πακέτου είναι λογικό για τους παίκτες να χρησιμοποιούν την στρατηγική GTFT με g= p_e αν ισχύει η σχέση $\alpha \geq \frac{1}{(1-p_e)^2}$.

Οι κόμβοι δεν έχουν λόγο να λιποτακτήσουν από την στρατηγική GTFT ακόμα και αν με αυτό δεν πετυχαίνουν πλήρη συνεργασία. Παρατηρούμε ότι η επίδραση των συγκρούσεων οδηγεί στην αύξηση της παραμέτρου απόρριψης κατά ένα παράγοντα ίσο με $1/(1- p_e)^2$. Άρα όσο μεγαλύτερη είναι η κίνηση στο δίκτυο τόσο πιο μακριά πρέπει να βλέπουν οι κόμβοι για να διατηρήσουν την αμοιβαία συνεργασία [36][59].

2.6.2.4 Στρατηγικές Πυροδότησης (n-step Trigger και Grim Trigger)

Εκτός από το GTFT υπάρχουν και πιο αυστηροί μηχανισμοί τιμωρίας οι οποίοι ονομάζονται *n*-step Trigger και Grim Trigger. Αυτοί οι μηχανισμοί πυροδοτούν πλήρη τιμωρία με την κάθε αντιληπτή λιποταξία από την συνεργασία.

Όσον αφορά στο n-step Trigger (OT) ο κόμβος με αυτή τη στρατηγική δεν είναι αυτός που πρώτος θα λιποταχτήσει, τιμωρεί αμέσως αυτή την ενέργεια αλλά και είναι έτοιμος να επαναφέρει την συνεργασία μετά την τιμωρία μετά από *n* στάδια. Η πιθανότητα απόρριψης σε μια στρατηγική OT είναι ίση με:

$$\begin{cases} p_i^{(0)} = 0 \\ p_i^{(k)} = \begin{cases} 0, & if\ \hat{p}_{-i}^{(j)} \leq g \quad for\ all\ j \in (k-n, \dots, k+n) \\ 1 & , else \end{cases} \end{cases} \tag{2.38}$$

Είναι εύκολο να αποδειχτεί ότι αν ο κόμβος συνεργάζεται ισχύει η σχέση $\hat{p}_{-i}^{(k)} = p_e$. Η επιθυμητή τιμή είναι $g=p_e$. Όμως δεν είναι εύκολο να προσδιορίσουμε ακριβώς το p_e. Άρα οι κόμβοι είτε δε θα συνεργάζονται καθόλου είτε θα απορρίπτεται μέρος των πακέτων [36].

Όσον αφορά στην στρατηγική Grim Trigger, αν ο κόμβος αντιληφθεί λιποταξία μετά την τιμωρία τότε δεν αποκαθιστά την τιμωρία ποτέ. Η Grim Trigger έχει καλύτερη απόδοση από τις προηγούμενες μεθόδους. Η πιθανότητα απόρριψης δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{cases} p_i^{(0)} = 0 \\ p_i^{(k)} = \begin{cases} 0 & if\ \hat{p}_{-i}^{(j)} \leq g\ for\ all\ j < k \\ 1 & otherwise \end{cases} \end{cases} \tag{2.39}$$

2.6.2.5 Μειονεκτήματα

Όλες οι παραπάνω μέθοδοι έχουν κάποια μειονεκτήματα ή είναι ανεφάρμοστες στα πραγματικά ad hoc δίκτυα. Καταρχάς το TFT είναι ανεφάρμοστο σε πραγματικές συνθήκες που υπάρχουν συγκρούσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί όπως έχουμε πει παραπάνω ισχύει η σχέση για την αντιλαμβανόμενη πιθανότητα απόρριψης που οδηγεί σε πιθανότητα απόρριψης ίση με 1. Άρα οι κόμβοι δεν θα συνεργάζονται [60]. Το μεγάλο πρόβλημα όλων των υπόλοιπων στρατηγικών που αναφέρθηκαν είναι ότι για να επιτύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα πρέπει να επιτύχουμε ακριβή υπολογισμό του p_e, πράγμα αδύνατο σε πραγματικές συνθήκες λόγω των στοχαστικών διακυμάνσεων. Αυτό μπορεί να προκαλέσει αδικαιολόγητες τιμωρίες στους κόμβους.

2.6.3 CORE (Collaborative Reputation Mechanism)

2.6.3.1 Γενικά Στοιχεία του CORE και Είδη Φήμης

Ένας από τους πιο διαδεδομένους μηχανισμούς κινήτρων βασισμένος σε φήμη είναι το CORE (COllaborative REputation Mechanism). Σκοπός αυτού του μηχανισμού είναι μέσω της χρησιμοποίησης της φήμης να αναγκάσει τους κόμβους, που λόγω της διαθέσιμης ενέργειας τείνουν να συμπεριφέρονται εγωιστικά, να συνεργαστούν μεταξύ τους ώστε να έχει καλύτερη απόδοση το δίκτυο. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάθε λειτουργία του δικτύου όπως προώθηση πακέτων, δρομολόγηση κτλ. Αυτό γίνεται επιτρέποντας στους κόμβους που έχουν καλή φήμη να χρησιμοποιούν τους πόρους του δικτύου, ενώ αυτοί που έχουν κακή φήμη απομονώνονται από το δίκτυο. Ο κάθε κόμβος υπολογίζει την φήμη των άλλων κόμβων λαμβάνοντας υπόψη την ίδια του την εμπειρία και παρατηρήσεις από άλλους κόμβους του δικτύου. Επίσης, μέσω ακολουθιακών διαδικασιών είναι δυνατό να απομονωθούν οι κόμβοι του δικτύου που εμφανίζουν κακόβουλη συμπεριφορά (malicious nodes) διασπείροντας αρνητικές βαθμολογίες. Το σύστημα αυτό κάνει διάκριση ανάμεσα στους εγωιστικούς κόμβους και στους κακόβουλους κόμβους.

Υπάρχουν τρία είδη φήμης που χρησιμοποιούνται σε αυτό το σύστημα ώστε να υπολογιστεί η συνολική φήμη του κάθε κόμβου, ο υπολογισμός της οποίας ανανεώνεται συνεχώς και βασίζεται στις παρατηρήσεις του ίδιου του κόμβου και σε πληροφορίες άλλων κόμβων. Η συνολική φήμη είναι συνδυασμός και των τριών ειδών. Τα είδη της φήμης είναι:

- *Υποκειμενική (subjective) φήμη:* Το κομμάτι αυτό της φήμης προέρχεται από παρατηρήσεις του ίδιου του κόμβου για την συμπεριφορά των άλλων κόμβων. Έμφαση δίνεται σε παλιότερες παρατηρήσεις εις βάρος των πιο πρόσφατων. Όταν δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία η τιμή της υποκειμενικής φήμης τίθεται ίση με 0. Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε πως η υποκειμενική φήμη αφορά και μετριέται μόνο για τους γείτονες του κάθε κόμβου.
- *Έμμεση (indirect) φήμη:* Το κομμάτι αυτό της φήμης αφορά της παρατηρήσεις των άλλων κόμβων για τον κόμβο που θέλουμε να υπολογίσουμε την φήμη του. Η έμμεση φήμη παίρνει μόνο θετικές τιμές (από 0 ως 1) ώστε να αποφευχθούν τυχόν επιθέσεις από κακόβουλους κόμβους με διασπορά αρνητικών τιμών.
- *Λειτουργική (functional) φήμη:* Αφορά το συνδυασμό των δύο προηγούμενων φημών, της υποκειμενικής και της έμμεσης για διαφορετικές όμως διαδικασίες. Για παράδειγμα για τον υπολογισμό της συνολικής υποκειμενικής φήμης μπορεί να ληφθεί υπόψη και η φήμη από την δρομολόγηση και από την προώθηση πακέτων. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας διαφορετικά βάρη.

2.6.3.2 Αρχή λειτουργίας του CORE

Τα συστατικά μέρη του CORE είναι τρία:

- *Οντότητες του δικτύου:* Είναι οι κόμβοι του δικτύου. Η κάθε οντότητα περιέχει ένα αριθμό πινάκων φήμης και ένα μηχανισμό επιτήρησης.
- *Πίνακες φήμης:* Είναι μια λίστα δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για την συμπεριφορά των μελών του δικτύου.
- *Μηχανισμός επιτήρησης:* Είναι ένας μηχανισμός που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση κόμβων που δεν συνεργάζονται. Ο μηχανισμός αυτός συγκρίνει τα επιθυμητά αποτελέσματα με αυτά που παρατηρήθηκαν για μια διαδικασία.

Η αρχή λειτουργίας του πρωτοκόλλου του CORE αφορά τον πάροχο και τον αιτών και μαζί με τον μηχανισμό επιτήρησης δίνει αρνητική φήμη στους παρόχους που δεν συνεργάζονται και αν εμμένουν σε αυτή τη συμπεριφορά τους αποβάλει από το δίκτυο. Η ανανέωση των πινάκων φήμης με βάση το πρωτόκολλο του CORE γίνεται σε δύο περιπτώσεις: πρώτον κατά την αίτηση για την εκτέλεση μιας συνάρτησης *f* και δεύτερον κατά την φάση απάντησης του αποτελέσματος της εκτέλεσης της συνάρτησης *f*. Στην πρώτη περίπτωση ανανεώνεται μόνο η υποκειμενική φήμη. Αν ο πάροχος αρνηθεί να συνεργαστεί μειώνεται η φήμη του μέσω της αρνητικής βαθμολογίας που αποστέλλεται, ενώ αν συνεργαστεί δεν αλλάζουν οι πίνακες φήμης. Στη δεύτερη περίπτωση αλλάζει μόνο η έμμεση φήμη. Αν οι κόμβοι συνεργαστούν στέλνεται ένα μήνυμα που περιλαμβάνει όλους τους κόμβους που συνεργάστηκαν και θετικές τιμές φήμης για αυτούς και έτσι αυξάνεται η φήμη τους. Η διάδοση μόνο θετικών τιμών γίνεται για να αποφευχθούν τυχόν επιθέσεις από κακόβουλους κόμβους. Για την αποφυγή αποστολής μεγάλης ποσότητας πληροφορίας μόνο κατά την απάντηση στέλνονται οι τιμές της φήμης και ανανεώνονται οι πίνακες φήμης. Οι τιμές των πινάκων φήμης δεν παραμένουν σταθερές όταν είναι θετικές αλλά μειώνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ωσότου καταλήξουν στο 0. Έτσι αποφεύγονται τυχόν επιθέσεις από κακόβουλους κόμβους [61].

2.6.3.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Καταρχάς το CORE έχει υψηλή απόδοση αφού οι εγωιστικοί κόμβοι εντοπίζονται αμέσως. Αυτό γίνεται γιατί ο μηχανισμός επιτήρησης υπάρχει σε κάθε κόμβο και παρακολουθεί όλη τη διαδικασία προώθησης των πακέτων από κόμβο σε κόμβο. Ταυτόχρονα ο μηχανισμός αυτός επεμβαίνει μόνο όταν διαπιστωθεί η ύπαρξη εγωιστικού κόμβου. Έτσι και πόροι του δικτύου δεν σπαταλούνται και οι εγωιστικοί κόμβοι βρίσκονται αμέσως. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το ότι το CORE δεν επιτρέπει διασπορά αρνητικής βαθμολογίας και ούτε επιτρέπει στους αρνητικά βαθμολογημένους κόμβους να αποστέλλουν αιτήσεις για εξυπηρέτηση.

Από την άλλη βέβαια έχει και μειονεκτήματα. Πρώτον, το CORE είναι έτσι σχεδιασμένο ώστε να αντιμετωπίζει απολύτως αποτελεσματικά μόνο τους κόμβους που φέρονται

εγωιστικά, προκαλώντας μεγαλύτερη επιβάρυνση στους υπόλοιπους κόμβους και υποβαθμίζοντας ταυτόχρονα την απόδοση του δικτύου. Αντίθετα δε δίνει βάρος στους κακόβουλους κόμβους που έχουν ως στόχο να πλήξουν ίσως ανεπανόρθωτα το δίκτυο. Ακόμα ο μηχανισμός επιτήρησης αντιμετωπίζει προβλήματα εντοπισμού τον εγωιστικών κόμβων στις εξής περιπτώσεις [62]:

- Ασαφούς και μη προσδιορίσιμης συμφόρησης του δικτύου
- Σύγκρουσης πακέτων δεδομένων και άρα μη αποδοτική λειτουργία του δικτύου
- Μερικής καταστροφής του δικτύου, όπου δηλαδή ένα τμήμα του, έχει υποστεί βλάβες και το υπόλοιπο υπολειτουργεί
- Σε περιπτώσεις συνεννοήσεων μεταξύ κακόβουλων κόμβων για δόλια διασπορά θετικών αξιολογήσεων.
- Περιορισμοί της ενέργειας για το δίκτυο
- Λανθασμένη και όχι επικίνδυνη συμπεριφορά κάποιου κόμβου

Επίσης υποθέτει ότι οι συστάσεις είναι έμπιστες από όπου και να γίνονται. Έτσι δε διαθέτει καμιά προστασία απέναντι σε διασπορά ψευδών στοιχείων που είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα των ad hoc δικτύων [61]. Ακόμα οι πόροι ενός κόμβου με πολύ καλή φήμη (κοντά στο 1) μπορεί να σπαταληθούν και για αυτό να αναγκαστεί να φέρεται εγωιστικά ώστε να προστατέψει τους πόρους του. Τέλος, το γεγονός ότι το βάρος των συναρτήσεων για τον υπολογισμό της φήμης είναι καθορισμένο από πριν και ίδιο για όλους τους κόμβους κάνει το σύστημά αυτό ακατάλληλο για ετερογενή δίκτυα, στα οποία ο κάθε κόμβος μπορεί να δίνει διαφορετική βαρύτητα στην κάθε συνάρτηση [63].

2.6.4 CONFIDANT (Cooperation Of Nodes: Fairness In Dynamic Ad hoc NeTworks)

2.6.4.1 Δομή του CONFIDANT

Άλλο είδος μηχανισμού κινήτρων βασισμένο στη φήμη είναι το CONFIDANT, βασικές ιδέες του οποίου είναι οι εξής:

- Ο κάθε κόμβος παρακολουθεί τους άμεσους γείτονές του προκειμένου να αποφύγει κάποια δυσάρεστη εμπειρία από κάποιο επικίνδυνο κόμβο.
- Ο κάθε κόμβος μοιράζεται πληροφορίες για κακόβουλους κόμβους με φιλικούς προς αυτόν κόμβους. Ενημερώνει τους φιλικούς κόμβους και αντίστοιχα δέχεται πληροφορίες για κακόβουλους κόμβους.

Το CONFIDANT αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα: το μέρος της παρακολούθησης (monitor), το σύστημα της φήμης (reputation system), τη διαχείριση διαδρομών (path manager) και τη διαχείριση της εμπιστοσύνης (trust manager).

Παρακολούθηση (Monitor): Η εύρεση των αποκλινόντων κόμβων γίνεται είτε ακούγοντας

την μετάδοση των γειτόνων του κόμβου (παθητική γνώση) είτε παρακολουθώντας την συμπεριφορά του πρωτοκόλλου διαδρομής. Κρατώντας ένα αντίγραφο του πακέτου που φτάνει στον γείτονα μπορεί να ελέγξει αν έφτασε το ίδιο στον επόμενο κόμβο. Αν βρεθεί κάποια κακή συμπεριφορά αναφέρεται στο σύστημα φήμης.

Διαχείριση Εμπιστοσύνης (Trust Manager): Αυτό το κομμάτι αφορά την διαχείριση εισερχόμενων και εξερχόμενων μηνυμάτων ALARM. Ένας κόμβος στέλνει μήνυμα ALARM όταν διαπιστώσει την ύπαρξη κακόβουλου κόμβου. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε με προσωπική εμπειρία είτε με παρακολούθηση είτε έχοντας λάβει μήνυμα ALARM για κακόβουλο κόμβο. Κάθε κόμβος διατηρεί μια λίστα φίλων στους οποίους στέλνει μήνυμα ALARM αν διαπιστώσει την ύπαρξη κακόβουλου κόμβου. Τα εισερχόμενα μηνύματα ALARM μπορεί να προέρχονται είτε από φίλους είτε από άλλους κόμβους. Πριν ο κόμβος αναλάβει οποιαδήποτε δράση ελέγχει την αξιοπιστία του κόμβου-αποστολέα του ALARM. Ένας μηχανισμός παρόμοιος με τη διαχείριση εμπιστοσύνης χρησιμοποιείται για την εγκυρότητα και πιστοποίηση των κόμβων. Ο μηχανισμός αυτός ονομάζεται Pretty Good Privacy (PGP) και έχει τέσσερα επίπεδα εμπιστοσύνης. Αυτά είναι: άγνωστος (unknown), χωρίς σχόλια (none), οριακά αποδεκτός (marginal) και πλήρως αποδεκτός (complete).

Το Σύστημα Φήμης (Reputation System): Είναι το τμήμα εκείνο που υπολογίζεται η φήμη κάθε κόμβου. Ακολουθείται κατανεμημένη αρχιτεκτονική και ο κάθε κόμβος έχει λίστες με τις βαθμολογήσεις των άλλων κόμβων και/ή μαύρες λίστες με αναξιόπιστους κόμβους. Αυτές τις λίστες τις ανταλλάσει με τους γείτονές του. Πριν προωθήσει οτιδήποτε ο κάθε κόμβος κοιτάει στις μαύρες λίστες ώστε να μην προωθήσει οτιδήποτε σε κόμβους που υπάρχουν εκεί. Στις λίστες που περιλαμβάνουν κακόβουλους χρήστες, ελέγχεται συνεχώς η συμπεριφορά τους, ώστε αν υπάρχει κάποια λανθασμένη αξιολόγηση ή ακόμα και βελτίωση στη συμπεριφορά τους, ο κόμβος να επανακάμπτει στο δίκτυο.

Διαχείριση Διαδρομών (Path Manager): Ο κάθε κόμβος παρακολουθεί τους γείτονές του μέσω του monitor και όταν διαπιστώσει ότι κάποιο σημαντικό γεγονός έγινε το αναφέρει στο σύστημα της φήμης. Αυτό ελέγχει αν αυτό έχει γίνει περισσότερες φορές από κάποιο όριο, που ορίζεται από κάθε κόμβο ώστε να αντιμετωπίζονται οι κακόβουλοι κόμβοι. Αν αυτό συμβαίνει μειώνεται η τιμή της φήμης και αν πέσει κάτω από κάποιο όριο ειδοποιείται η διαχείριση διαδρομών ώστε να διαγράψει τον συγκεκριμένο κόμβο από όλες τις διαδρομές. Έπειτα, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, στέλνεται μήνυμα ALARM στους φίλους. Το σύστημα διαχείρισης εμπιστοσύνης των κόμβων που θα λάβουν το μήνυμα οφείλει να ελέγξει ότι ο αποστολέας είναι αξιόπιστος. Αν είναι, θεωρείται πως ο κόμβος που αναφέρεται είναι κακόβουλος και αποστέλλεται το μήνυμα στο σύστημα φήμης [64].

2.6.4.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Το CONFIDANT είναι αρκετά αποδοτικό έχοντας πολύ λιγότερες απώλειες πακέτων λόγω κακόβουλων κόμβων από ότι τα απλά ad-hoc δίκτυα. Επίσης το CONFIDANT είναι ανθεκτικό σε μεγάλο αριθμό κόμβων. Ούτε η προσθήκη ή η αύξηση των κακόβουλων κόμβων επηρεάζει σημαντικά το δίκτυο. Συγκεκριμένα ακόμα και αν πάνω από τους μισούς κόμβους είναι κακόβουλοι η απόδοση του δικτύου είναι αρκετά καλή, ενώ χωρίς αυτό ακόμα και μικρός αριθμός κακόβουλων κόμβων καταστρέφει το δίκτυο. Η αυξημένη κίνηση πακέτων ή μεγάλος αριθμός εφαρμογών δεν επηρεάζει σημαντικά το δίκτυο.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η κατανεμημένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιείται, ο κάθε κόμβος διαχειρίζεται μόνος του την φήμη των άλλων κόμβων, τα μηνύματα και τη λίστα με τους φίλους του χωρίς να χρειάζεται να έχει πρόσβαση σε ένα κεντρικό κόμβο. Έτσι το σύστημα είναι λιγότερο ευάλωτο σε επιθέσεις. Τέλος υπάρχει συνεχής έλεγχος για την ύπαρξη εγωιστικών και κακόβουλων κόμβων, όπως και για την επανένταξη στο δίκτυο κόμβων που είτε είχαν κριθεί λανθασμένα είτε έδειξαν καλή συμπεριφορά.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, το κυριότερο μειονέκτημα είναι η πολύ μέτρια απόδοση που έχει το CONFIDANT σε μεγάλη κινητικότητα των κόμβων. Ουσιαστικά δεν υπάρχει διαφορά σε αυτή τη περίπτωση αν δε χρησιμοποιηθεί. Επίσης η ύπαρξη τεσσάρων τμημάτων που συνεργάζονται για τον υπολογισμό της φήμης το καθιστά ευάλωτο σε τυχόν επιθέσεις. Τέλος υπάρχει μεγάλη ανταλλαγή μηνυμάτων (ALARM, συστάσεις, λίστες) ανάμεσα στους κόμβους. Αυτό το καθιστά ευάλωτο σε τυχόν επιθέσεις σε αυτά τα μηνύματα και ταυτόχρονα σπαταλούνται και πόροι του συστήματος [64]. Τέλος, αρνητικό είναι το γεγονός ότι δε διαφοροποιεί τη βαρύτητα που έχουν οι συστάσεις ανάλογα με το πόσο αξιόπιστος είναι ο κάθε κόμβος [63].

2.6.5 SORI (Secure and Objective Reputation-based Incentive)

2.6.5.1 Γενικά Στοιχεία του SORI

Τα μοναδικά χαρακτηριστικά του SORI είναι τα εξής:

- Η φήμη των κόμβων βγαίνει από αντικειμενικές μετρήσεις.
- Η διάδοση της φήμης γίνεται υπολογισμένα και αποτελεσματικά από μια διάταξη αυθεντικότητας βασισμένη σε μονομερή hash chain.
- Η φήμη των κόμβων διαδίδεται μόνο στους γείτονες και όχι σε όλο το δίκτυο, αφού η φήμη ενός κόμβου χρησιμοποιείται μόνο από τους γείτονές του. Έτσι μειώνεται η πληροφορία ελέγχου της επικοινωνίας.
- Η αποτελεσματική δρομολόγηση είναι εξασφαλισμένη.

Μαζί με το μηχανισμό φήμης υπάρχει και μια διάταξη τιμωρίας για την τιμωρία των εγωιστικών κόμβων. Για τη χρησιμοποίηση του συστήματος κάνουμε τις ακόλουθες παραδοχές:

- Έχουμε μόνο εγωιστικούς κόμβους και όχι κακόβουλους κόμβους που θέλουν να πλήξουν το δίκτυο.
- Δεν υπάρχει αλλαγή ταυτότητας των κόμβων.
- Ο κάθε κόμβος ακούει κάθε πακέτο που μεταδίδεται από τους γείτονές του και μπορεί να διαπιστώσει ποιος το μετάδωσε. Έτσι μπορεί να μάθει αν ένα πακέτο προορίζεται για αυτόν.

Η βασική δομή του SORI αποτελείται από τρία κομμάτια: παρακολούθηση γειτόνων, διάχυση της φήμης και τιμωρία. Αυτά τα αναλύουμε παρακάτω.

2.6.5.2 Παρακολούθηση Γειτόνων και Τιμωρία

Όπως είπαμε και προηγουμένως ο κάθε κόμβος παρακολουθεί τις μεταδόσεις των γειτόνων του. Έτσι ο κάθε κόμβος έχει μια λίστα με τους γείτονες NNL_N. Ταυτόχρονα κρατάει δύο αριθμούς για κάθε γείτονα. Αυτοί είναι:

- $RF_N(X)$: συνολικός αριθμός των πακέτων που έστειλε ο κόμβος στον Χ για προώθηση
- $HF_N(X)$: συνολικός αριθμός των πακέτων που στάλθηκαν από τον κόμβο στον Χ και προωθήθηκαν.

Η ανανέωση των αριθμών γίνεται ως εξής: κάθε φορά που ο κόμβος στέλνει ένα πακέτο στον Χ για προώθηση το $RF_N(X)$ αυξάνεται κατά ένα. Μετά ο κόμβος ακούει και αν μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ο Χ προωθήσει το πακέτο αυξάνεται το $HF_N(X)$ κατά ένα. Βέβαια η μη αύξηση του $HF_N(X)$ δεν οφείλεται πάντα σε εγωιστικό κόμβο αλλά μπορεί να οφείλεται σε κυκλοφοριακή συμφόρηση. Αλλά όπως θα πούμε και παρακάτω αυτό δε δημιουργεί πρόβλημα, εκτός βέβαια αν η συμφόρηση είναι μεγάλη όποτε τότε αντικειμενικά υπάρχει πρόβλημα.

Με βάση αυτές τις τιμές ο κόμβος φτιάχνει μια καταγραφή για τον Χ που ονομάζεται τοπικά υπολογισμένη καταγραφή ($LER_N(X)$). Αυτή υπολογίζεται με βάση δύο τιμές. Η πρώτη είναι το $G_N(X)$ που υπολογίζεται ως $G_N(X)= RF_N(X)/ HF_N(X)$. Η δεύτερη είναι το $C_N(X)$ που ονομάζεται εμπιστοσύνη και δείχνει πόση εμπιστοσύνη έχει στον υπολογισμό του ο κόμβος. Αυτή την τιμή την θέτουμε ίση με $RF_N(X)$, γιατί όσο περισσότερα πακέτα στείλει ο κόμβος τόσο πιο σίγουρος θα είναι για τη μέτρησή του.

Κάθε κόμβος ανανεώνει περιοδικά το $LER_N(X)$ με τις τιμές των $RF_N(X)$ και $HF_N(X)$. Αν η τιμή του $G_N(X)$ έχει αλλάξει σημαντικά τότε στέλνει τις καινούργιες τιμές του $LER_N(X)$ στους γείτονές του. Αυτοί με την σειρά τους χρησιμοποιούν το δικό του $LER_N(X)$ και το $LER_i(X)$

που στάλθηκε από το γείτονα (αυτός βέβαια πρέπει να υπάρχει στη λίστα του) για να υπολογίσει τη συνολικά υπολογισμένη καταγραφή για τον Χ ($OER_N(X)$).

Μετά τη μέτρηση του $OER_N(X)$, αν ο κόμβος διαπιστώσει πως το $OER_N(X)$ έπεσε κάτω από ένα κατώφλι μπορεί να τιμωρήσει τον Χ απορρίπτοντας με κάποια πιθανότητα τα πακέτα που του στέλνει για προώθηση. Η πιθανότητα απόρριψης είναι:

$$p = \begin{cases} q - \delta \, , q > \delta \\ 0 \end{cases} \tag{2.40}$$

όπου $q=1- OER_N(X)$ και το δ είναι ένα περιθώριο αφού η απόρριψη ενός πακέτου μπορεί να οφείλεται και σε άλλους λόγους όπως η συμφόρηση. Αυτό το περιθώριο έχει σχεδιαστεί για να αποφεύγονται καταστάσεις αντεκδίκησης ανάμεσα σε συνεργάσιμους κόμβους.

2.6.5.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Από προσομοιώσεις που έχουν γίνει φαίνεται ότι με τη χρησιμοποίηση του SORI οι συνεργάσιμοι κόμβοι έχουν πολύ μεγαλύτερο ρυθμό απόδοσης (ως και διπλάσιο για μεγάλο αριθμό συνδέσεων) από τους εγωιστικούς. Αυτό είναι φανερό ανεξαρτήτως του αριθμού συνδέσεων, του ρυθμού μετάδοσης και του ποσοστού εγωιστικών κόμβων. Είναι όμως πιο έντονο για πολλές συνδέσεις και μεγάλο αριθμό εγωιστικών κόμβων(πάνω από 50%). Η διάχυση της φήμης μόνο στους γείτονες , αφού χρησιμοποιείται μόνο από αυτούς, οδηγεί στη μείωση της πληροφορίας ελέγχου. Αυτό φαίνεται και από τις προσομοιώσεις που η διαφορά της πληροφορίας ελέγχου είναι μικρή σε σχέση με όταν δε χρησιμοποιούμε κανένα μηχανισμό κινήτρων.

Το πιο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι είναι προσανατολισμένη στην αντιμετώπιση των εγωιστικών κόμβων και έτσι κακόβουλοι κόμβοι μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα στο δίκτυο. Π.χ. θεωρείται δεδομένο ότι ένας κόμβος δε θα αλλάξει την ταυτότητά του και ότι δεν έχει σκοπό να κάνει επίθεση για να καταστρέψει το δίκτυο. Επίσης με τη χρησιμοποίηση των beacons έχουμε αύξηση της πληροφορίας ελέγχου και έχουμε και ενεργειακό κόστος [65].

2.6.6 RISM (Semi-distributed Reputation-based Intrusion Detection System)

2.6.6.1 Γενικά Στοιχεία και Δομή του RISM

Το σύστημα αυτό βασίζεται στο παράδειγμα φήμης και έχει ημικατανεμημένο χαρακτήρα, γιατί το περιεχόμενο του συστήματος παρατήρησης δεν περιορίζεται στον κόμβο που έκανε την παρατήρηση, αλλά ούτε αμέσως διαχέεται σε όλο το δίκτυο – όπως θα συνέβαινε σε ένα κατανεμημένο σύστημα. Το σύστημα κρατάει στη μνήμη την κίνηση που υπάρχει στο δίκτυο

και τους περιορισμούς όπως την ποσότητα της μπαταρίας και την υπολογισμένη ενέργεια που ο κάθε κόμβος έχει. Το μοντέλο του συστήματος αποτελείται από τέσσερα μέρη. Αυτά είναι τα: παρακολούθηση, σύστημα φήμης, διαχείριση διαδρομών, λύτρωση και υποχώρηση.

Παρακολούθηση: Το κομμάτι αυτό είναι υπεύθυνο για την παρακολούθηση των γειτόνων και χρησιμοποιεί τα PACKs (Passive Acknowledgements) που είναι χαρακτηριστικό του DSR πρωτοκόλλου. Κάθε κόμβος καταγράφει τα πακέτα που στάλθηκαν από τον γειτονικό κόμβο και τα συγκρίνει με αυτά που υπάρχουν στην ουρά. Μετά από καθορισμένο χρονικό διάστημα, γνωστό ως χρονικό παράθυρο, ο κάθε κόμβος καταγράφει τον αριθμό των πακέτων για τα οποία δεν έλαβε PACK και το στέλνει στο σύστημα φήμης. Το αν το σύστημα φήμης θα ανανεώσει τη φήμη του κόμβου εξαρτάται από την συνεργασία, απόδοση και την συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν την συγκεκριμένη χρονική στιγμή [63].

Σύστημα Φήμης: Το σύστημα φήμης υπολογίζει και διατηρεί την τιμή της φήμης των κόμβων η οποία κυμαίνεται από 0 ως την τιμή MaliciousThreshold. Η τιμή της φήμης κάθε κόμβου μπορεί να αλλάξει με τρεις τρόπους. Αυτοί είναι:

- παρατηρήσεις του κάθε κόμβου
- μηνύματα συναγερμού (alarm messages) που αποστέλλονται από γειτονικούς κόμβους
- λίστα αποφυγής (avoid list) που έχει προσαρτηθεί στην επικεφαλίδα του rreq/rrep.

Στον κάθε τρόπο φήμης δίνεται μια συγκεκριμένη βαρύτητα και η μεγαλύτερη βαρύτητα δίνεται στην παρακολούθηση του κάθε κόμβου. Η φήμη ανανεώνεται σε κάθε χρονικό παράθυρο και οι πληροφορίες αποστέλλονται σποραδικά στο δίκτυο μέσω των λιστών αποφυγής. Υπάρχουν τρεις κατηγορίες χαρακτηρισμού για τους κόμβους: φυσιολογικός, ύποπτος και κακόβουλος. Αυτό εξαρτάται από την φήμη κάθε κόμβου. Αρχικά ο κόμβος χαρακτηρίζεται φυσιολογικός και παίρνει τιμή φήμης 0. Αυτή η τιμή μπορεί να μειωθεί ή να αυξηθεί αν έχει φυσιολογική συμπεριφορά. Η απόλυτη τιμή της αρνητικής πτώσης είναι μεγαλύτερη από την θετική άνοδο. Η τιμή της φήμης δεν μπορεί να υπερβεί το 0 ώστε να αποφευχθεί η περίπτωση ένας κόμβος να λάβει θετική αξιολόγηση και έτσι να εξαντληθούν οι πόροι του από την υπερβολική προώθηση ή να απορρίπτει τα πακέτα έχοντας λάβει αρχικά μια θετική τιμή.

Κάθε φορά που ένας κόμβος χαρακτηρίζεται κακόβουλος ένα μήνυμα συναγερμού στέλνεται μόνο στους γειτονικούς κόμβους και έτσι αποφεύγεται η συμφόρηση. Οι υπόλοιποι κόμβοι θα ενημερωθούν με την αποστολή λίστας αποφυγής που ενσωματώνεται στην επικεφαλίδα του πακέτου που στέλνει ο κάθε κόμβος κατά την διαδικασία της εύρεσης δρομολόγησης. Όταν θα λάβουν αυτή τη λίστα οι άλλοι κόμβοι θα μειώσουν την τιμή της φήμης των κόμβων που συμπεριλαμβάνονται σε αυτή με βάση ένα συγκεκριμένο βάρος. Έπειτα θα βάλουν στην επικεφαλίδα την δικιά τους λίστα αποφυγής με τους κακόβουλους κόμβους και θα στείλουν το route request πακέτο.

Για την αποφυγή επιθέσεων από το δίκτυο ένας κόμβος χαρακτηρίζεται κακόβουλος μόνο έπειτα από δικιά του παρατήρηση. Με τα μηνύματα συναγερμού και τις λίστες αποφυγής το πολύ να μειωθεί η τιμή της φήμης ενός κόμβου ως το σημείο να χαρακτηριστεί ύποπτος. Αν ένας κόμβος δώσει σε ένα άλλο την κατηγορία ύποπτος μπορεί να διαγνώσει ότι είναι κακόβουλος μόνο από δικιά του παρατήρηση. Αν για ένα κόμβο που έχει χαρακτηριστεί ύποπτος ληφθεί είτε μήνυμα συναγερμού είτε λίστα αποφυγής τότε ο κόμβος που μετράει την φήμη του κάνει ένα τεστ κρούσης (knock test), το οποίο είναι σχεδιασμένο για να ελέγχει την αυθεντικότητα ενός κόμβου για τον οποίο έφτασε η συγκεκριμένη κατηγορία. Η διαδικασία του τεστ κρούσης είναι η εξής: αρχικά φτιάχνεται ένα αντίγραφό πακέτου δεδομένων και έπειτα αποστέλλεται στον κόμβο που θέλει να τεστάρει. Αν ο κόμβος προωθήσει το πακέτο παίρνει θετική αποτίμηση, πηγαίνει στη μέση του χαρακτηρισμού ως ύποπτου κόμβου και διαγράφεται η κατηγορία, αλλιώς χαρακτηρίζεται ως κακόβουλος κόμβος. Έπειτα ακολουθούν οι διαδικασίες που περιγράφτηκαν πιο πάνω(αποστολή μηνύματος συναγερμού κτλ.).Αυτό το τεστ μπορεί να γίνει μόνο στους ακριανούς κόμβους ή στους γειτονικούς. Το τεστ στηρίζεται στο ότι αν ο κόμβος είναι κακόβουλος θα απορρίψει το πακέτο. Ένας κόμβος μπορεί να αποτύχει στο τεστ λόγω της κυκλοφοριακής κίνησης και να χαρακτηριστεί κακόβουλος.

Για τους ύποπτους κόμβους το τεστ κρούσης είναι πολύ σημαντικό και μπορεί να αποτύχει για λόγους άσχετους με τους κόμβους όπως η συμφόρηση, η πτώση μιας σύνδεσης ή η επανατοποθέτηση μιας διεπαφής του δικτύου. Για αυτό είναι σημαντικό να έχουν την δυνατότητα να επανενταχθούν στο δίκτυο ώστε να απολαμβάνουν όλες τις δυνατότητες που αυτό δίνει [63][66]. Μετά από συγκεκριμένη χρονικά ανενεργή περίοδο η τιμή της φήμης του κόμβου αυξάνεται κατά μια συγκεκριμένη λυτρωτική τιμή και πηγαίνει στη μέση της κατηγορίας του ύποπτου. Δεν παίρνει όμως ουδέτερη τιμή για να μπορεί ο κόμβος που τον βαθμολογεί να τον ξαναχαρακτηρίσει ως κακόβουλο αν ξαναέχει κακή συμπεριφορά. Ανενεργή περίοδο εννοούμε ότι ο συγκεκριμένος κόμβος δεν εμφανίζεται σε μηνύματα συναγερμού και λίστες αποφυγής.

Διαχείριση Διαδρομών: Η κατάταξη των διαδρομών γίνεται σύμφωνα με τον τύπο της προτεραιότητας διαδρομής. Η ανανέωση των πινάκων των διαδρομών γίνεται σε διάφορες περιπτώσεις, όπως όταν ένας κόμβος χαρακτηρισθεί κακόβουλος ή ένας κακόβουλος κόμβος επιστρέψει στο δίκτυο. Στην εύρεση των διαδρομών προτιμούνται διαδρομές που περιέχουν μόνο φυσιολογικούς κόμβους. Αν ένας κόμβος χαρακτηριστεί ως κακόβουλος τότε όλα τα μονοπάτια που περιλαμβάνουν αυτό τον κόμβο διαγράφονται από τη μνήμη διαδρομών [63].

2.6.6.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Η απόδοση του RISM σε σχέση με το να μην χρησιμοποιήσουμε κάποιο μηχανισμό κινήτρων είναι πολύ καλύτερη ως και το 40% των κόμβων να είναι κακόβουλοι. Αλλά και μέχρι το 70% είναι αρκετά ικανοποιητική. Επίσης έχει αρκετά ικανοποιητική απόδοση στην κινητικότητα αφού η πτώση στην απόδοση δεν είναι μεγάλη. Όλα αυτά δείχνουν ότι ο μηχανισμός αυτός αντιμετωπίζει ικανοποιητικά και τους εγωιστικούς και τους κακόβουλους κόμβους. Επίσης η μη αύξηση πέρα από την τιμή 0 για τους κόμβους που χαρακτηρίζονται φυσιολογικοί δεν αφήνει τους κόμβους να αποκτήσουν πρώτα φήμη και μετά να κάθονται ή να υπάρχει υπερβολική χρήση αυτών για προώθηση με αποτέλεσμα την εξασθένιση των πόρων τους. Το σύστημα δίνει μεγαλύτερο βάρος στην εμπειρία του κάθε κόμβου και έτσι δεν μπορεί κάποιος κόμβος να χαρακτηριστεί κακόβουλους από μηνύματα άλλων κόμβων παρά μόνο αν αποτύχει στο τεστ κρούσης. Τέλος υπάρχει μηχανισμός για να γίνουν μέρος του δικτύου ξανά κόμβοι που είχαν χαρακτηριστεί κακόβουλοι. Αυτό βοηθάει στην επανένταξη τόσο κόμβων που είχαν χαρακτηριστεί άδικα ως κακόβουλοι όσο και αυτών που έδειξαν έπειτα μεταμέλεια και καλή συμπεριφορά. Μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι τα μηνύματα πληροφορίας είναι σημαντική ποσότητα. Αυτό βέβαια γίνεται επειδή κάθε φορά που ανιχνεύεται κακόβουλος κόμβος κόβεται κάθε σύνδεση αυτού.

2.6.7 OCEAN (Observation-based Cooperation Enforcement in Ad hoc Networks)

2.6.7.1 Βασικά Στοιχεία του OCEAN

Το OCEAN βασίζεται αποκλειστικά στην παρακολούθηση των γειτόνων κάθε κόμβου και δεν υπάρχει καμία μεταφορά πληροφορίας ανάμεσα στους κόμβους για την συμπεριφορά των άλλων κόμβων. Ακολουθεί η ανάλυση των βασικών στοιχείων του OCEAN [60].

Παρακολούθηση Γειτόνων: Αρχικά ο κόμβος αποθηκεύει το checksum του πακέτου και μετά το στέλνει στον γειτονικό κόμβο και το παρακολουθεί μέσω του ασύρματου καναλιού. Μετά περιμένει κάποιο συγκεκριμένο διάστημα (συνήθως 1ms). Αν ο γειτονικός κόμβος δεν το στείλει σε αυτό το διάστημα, καταγράφει ένα αρνητικό γεγονός για τον κόμβο αυτό και βγάζει το checksum από τον buffer του. Αν το στείλει ελέγχει αν ταιριάζει το checksum του πακέτου που στάλθηκε με αυτό που έχει αποθηκευμένο στον buffer και αν ταιριάζει τότε καταγράφει ένα θετικό γεγονός και βγάζει το checksum από τον buffer του. Αν δεν ταιριάζει θεωρεί ότι το πακέτο δεν προωθήθηκε. Η παρακολούθηση γειτόνων παρακολουθεί μόνο την συμπεριφορά του γειτονικού κόμβου. Έτσι δεν μπορεί να ξέρει για ποιο λόγο ο γειτονικός κόμβος δεν προώθησε το πακέτο. Π.χ. ο γειτονικός κόμβος μπορεί να απέτυχε να το προωθήσει στο επόμενο κόμβο, αλλά αυτό στον αρχικό κόμβο καταγράφεται σαν ο γειτονικός κόμβος να μην προώθησε το πακέτο.

Βαθμολόγηση Διαδρομών: Κάθε κόμβος κρατάει την βαθμολογία όλων των γειτόνων του. Η αρχική βαθμολογία του κάθε κόμβου είναι 0 και αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με τα αρνητικά ή θετικά γεγονότα που φτάνουν από την παρακολούθηση γειτόνων. Έχει αποδειχθεί ότι κατά απόλυτη τιμή πρέπει το αρνητικό γεγονός να βαθμολογείται περισσότερο από το θετικό. Αν η τιμή της βαθμολογίας ενός κόμβου πέσει κάτω από ένα κατώφλι – ελαττωματικό κατώφλι (Faulty Threshold) – τότε μπαίνει σε μια ελαττωματική λίστα. Στην ελαττωματική λίστα υπάρχουν όλοι οι κόμβοι που έχουν χαρακτηριστεί ως κόμβοι που δεν συμπεριφέρονται καλά. Μια διαδρομή χαρακτηρίζεται ως καλή ή κακή ανάλογα με το αν ο επόμενος κόμβος ανήκει στην ελαττωματική λίστα ή όχι. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στο OCEAN είναι:

- ουδέτερη βαθμολογία = 0
- θετικό βήμα = +1
- αρνητικό βήμα = -2
- ελαττωματικό κατώφλι = -40

Δρομολόγηση Διαδρομών Βασισμένη στη Βαθμολογία: Η δρομολόγηση διαδρομών βασισμένη στη βαθμολογία εφαρμόζει τις πληροφορίες από την παρακολούθηση γειτόνων στην πραγματική επιλογή διαδρομών. Λίστα αποφυγής είναι μια λίστα με κόμβους που ο αποστολέας επιθυμεί να αποφύγει σε μελλοντικές διαδρομές. Κάθε κόμβος που λαμβάνει ένα πακέτο ελέγχει τη λίστα αποφυγής. Αν ένας κόμβος που υπάρχει στη διαδρομή υπάρχει και στην λίστα αποφυγής τότε το πακέτο απορρίπτεται. Αλλιώς επαναμεταδίδεται ή απαντάει ο κόμβος με ένα DSR route-reply. Έτσι ο κάθε κόμβος επιλέγει τους γειτονικούς κόμβους που εμπιστεύεται και έχει τον έλεγχο τον διαδρομών που περνάνε από αυτόν.

Μηχανισμός Δεύτερης Ευκαιρίας: Ο μηχανισμός δεύτερης ευκαιρίας έχει σχεδιαστεί για να δίνει τη δυνατότητα στους κόμβους που έχουν χαρακτηριστεί ότι δεν συμπεριφέρονται καλά να ξαναγίνουν χρήσιμοι. Για αυτό μετά το πέρας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου που έχει μπει στην ελαττωματική λίστα ένας κόμβος βγαίνει από αυτή. Δεν του δίνεται όμως ουδέτερη βαθμολογία ώστε να γίνεται να ξαναμπεί στην ελαττωματική λίστα αν δεν συμπεριφέρεται σωστά.

2.6.7.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Καταρχάς η όλη διάταξη του OCEAN απαιτεί μια λιγότερο περίπλοκη δομή, πιο εύκολα υλοποιήσιμη και είναι λιγότερο ευπαθής σε επιθέσεις κακόβουλων κόμβων που σχετίζονται με την παραχάραξη των αξιολογήσεων ή των λιστών που ανταλλάσσονται στους άλλους μηχανισμούς κινήτρων φήμης. Επίσης απαιτεί λιγότερη ποσότητα πακέτων πληροφορίας. Επίσης το OCEAN έχει παρόμοια επίδοση με τους μηχανισμούς φήμης που δέχονται την ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στους κόμβους. Μάλιστα όσο λιγότερη είναι η

κινητικότητα των κόμβων και όσο μικρότερο είναι το κατώφλι για τους κακόβουλους κόμβους τόσο καλύτερα συμπεριφέρεται σε σχέση με τους μηχανισμούς αυτούς που βασίζονται στην ανταλλαγή πληροφοριών. Τέλος θετικό είναι ότι επιτρέπει σε κόμβους που είναι στην ελαττωματική λίστα να επανακάμψουν.

Ίσως το πιο σημαντικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν τιμωρεί τους κακόβουλους κόμβους όπως θα έπρεπε και έτσι κάποιες φορές έχουν καλύτερη επίδοση ακόμα και από τους κόμβους που συνεργάζονται. Οι άλλοι μηχανισμοί κινήτρων είναι πιο αποτελεσματικοί στην τιμωρία των κακόβουλων κόμβων. Όσον αφορά τους κακόβουλους κόμβους, αν και γενικά τους αντιμετωπίζει σωστά δεν υπάρχει προστασία απέναντι σε συνεργασία μεταξύ τους. Επίσης για θέματα όπως η αυθεντικότητα, η κρυπτογράφηση του μηνύματος και η ασφάλεια διαδρομών βασίζεται στους κατάλληλους μηχανισμούς που θα υπάρχουν στα πρωτόκολλα δρομολόγησης διαδρομών [60][67]. Τέλος λόγω του ότι βασίζεται σε πληροφορίες αποκλειστικά από δικές του παρατηρήσεις το κάνει να αντιμετωπίζει προβλήματα στον υπολογισμό της φήμης και στον εντοπισμό των κακόβουλων κόμβων σε περίπτωση μεγάλης κινητικότητας των κόμβων [63].

2.6.8 DARWIN (Distributed and Adaptive Reputation mechanism for WIreless ad-hoc Networks)

2.6.8.1 Περιγραφή Μηχανισμού DARWIN

Η λογική του συστήματος αυτού βασίζεται στη μέθοδο Contrite Tit For Tat (CTFT), σύμφωνα με την οποία ένας κόμβος που έκανε λάθος και άσκοπα λιποτάκτησε πρέπει να κάνει μετάνοια και να προσπαθήσει να διορθώσει το λάθος παρά να μπει σε κατάσταση αδράνειας. Η στρατηγική αυτή καθορίζεται ως εξής: αρχικά ένας παίκτης είναι πάντα σε καλή θέση και παραμένει εκεί για όσο συνεργάζεται όταν η στρατηγική CTFT του υποδεικνύει ότι πρέπει να συνεργαστεί. Αν κάποιος βρίσκεται σε κακή θέση, τότε μπορεί να επανέλθει σε καλή θέση με το να συνεργαστεί σε ένα στάδιο. Τότε η CTFT υποδεικνύει ότι ένας παίκτης πρέπει να συνεργαστεί αν είναι σε κακή θέση ή αν ο αντίπαλός του είναι σε καλή θέση, ειδάλλως θα πρέπει να αποκλίνει. Με βάση αυτό ορίζεται η πιθανότητα απόρριψης στο DARWIN σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tilde{p}_{iDARWIN}^{(k)} = \left[\gamma * (q_{-i}^{(k-1)} - q_i^{(k-1)})\right]_0^1 \ for\ k \geq 0 \tag{2.41}$$

$$q_i^{(k)} = \begin{cases} [\hat{p}_i^{(k)} - \tilde{p}_{iDARWIN}^{(k)}]_0^1 \ for\ k \geq 0 \\ 0 \ for\ k = -1 \end{cases} \tag{2.42}$$

$$[x]_0^1 = \begin{cases} 1 & if\ x \geq 1 \\ x & if\ 0 < x < 1 \\ 0 & if\ x \leq 0 \end{cases} \tag{2.43}$$

Το $\hat{p}_i^{(k)}$ είναι η αντιλαμβανόμενη πιθανότητα απόρριψης και το $\tilde{p}_{iDARWIN}^{(k)}$ είναι η πιθανότητα απόρριψης του DARWIN. Αν ισχύει $\hat{p}_i^{(k)} > \tilde{p}_{iDARWIN}^{(k)}$ τότε ο κόμβος αντιλαμβάνεται ότι χάνονται περισσότερα πακέτα από αυτά που έπρεπε λόγω του DARWIN. Το $q_i^{(k)}$ μετράει αυτή τη λιποταξία ή αλλιώς δείχνει την κατάσταση του κάθε κόμβου. Οι κόμβοι που είναι σε καλύτερη κατάσταση από αυτούς που συνεργάζονται τιμωρούν τον άλλο κόμβο με τη διαφορά της μεταξύ τους κατάστασης. Οι αντιλαμβανόμενες πιθανότητες απόρριψης των κόμβων ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων. Έχουμε κάνει την παραδοχή ότι οι πλειοψηφία των κόμβων δεν κλέβουν. Για αυτό βρίσκουμε την αντιλαμβανόμενη πιθανότητα ως τον μέσο όρο των λαμβανόμενων αντιλαμβανόμενων πιθανοτήτων απόρριψης και έτσι τα ψέματα έχουν μικρή επίδραση.

Καταρχάς παραδεχόμαστε ότι ισχύει $1<\gamma<p_e^{-1}$. Αποδεικνύεται ότι το DARWIN είναι εύρωστη στρατηγική και οι κόμβοι δεν έχουν λόγο για να λιποτακτήσουν από το την αμοιβαία συνεργασία σε μια μεγάλης διάρκειας αλληλεπίδραση. Για να ισχύει αυτό πρέπει το γ να παίρνει την μικρότερη τιμή του συναρτήσει των α και p_e. Το να εκτιμήσουμε το α είναι αδύνατο άρα η ζητούμενη τιμή του γ μπορεί να προσεγγισθεί από την σχέση $\gamma = \frac{1+\mathrm{pe}}{2*\mathrm{pe}}$. Όπως αποδεικνύεται διαφορετικές τιμές του α δεν έχουν μεγάλη επίδραση στην αποτελεσματικότητα του DARWIN.

Αποδεικνύεται με χρήση του ορισμού του DARWIN και της σχέσης $\hat{p}_i^{(k)} = p_e + (1-p_e) * p_i^{(k)}$ ότι αν οι δύο κόμβοι χρησιμοποιούν το DARWIN τότε η αμοιβαία συνεργασία επιτυγχάνεται στο μονοπάτι του σημείου ισορροπίας και έτσι ισχύει: $p_i^{(k)}=p_{-i}^{(k)}=0$ για κάθε $k \geq 0$. Αφού το DARWIN είναι καλύτερο από τις υπόλοιπες στρατηγικές πετυχαίνει και καλύτερη ανταμοιβή για τους κόμβους.

2.6.8.2 Εφαρμογή Αλγορίθμου

Συμβολίζουμε με $N_i^{(k)}$ τους άμεσους γείτονες του κόμβου το χρονικό διάστημα k. Ο κόμβος κρατάει δύο μετρητές για κάθε γείτονά του j στο χρονικό διάστημα k. Αυτοί είναι ο αριθμός των πακέτων που έστειλε για προώθηση ($S_{ij}^{(k)}$) και ο αριθμός των πακέτων που προωθήθηκαν ($F_{ij}^{(k)}$) στο χρονικό διάστημα k. Στο τέλος του χρονικού αυτού διαστήματος υπολογίζει για κάθε γείτονά του τον λόγο: $c_{ij}^{(k)} = \frac{F_{ij}^{(k)}}{S_{ij}^{(k)}}$. Αυτόν τον λόγο τον στέλνει σε όλους τους γείτονές του και υπολογίζει μέσω και τον λόγων που λαμβάνει από τους γείτονές του τον μέσο λόγο συνδεσιμότητας από τη σχέση:

$$\hat{c}_j^{(k)} = \frac{\sum_{m \in N_i^{(k)} \cup \{i\}, m \neq j} c_{im}^{(k)} * c_{mj}^{(k)}}{\sum_{m \in N_i^{(k)} \cup \{i\}, m \neq j} c_{im}^{(k)}} \tag{2.44}$$

όπου $c_{ii}^{(k)} = 1$ για όλα τα k. Στον υπολογισμό του μέσου λόγου συνδεσιμότητας η βαρύτητα με την οποία προσμετρείται η γνώμη του κάθε κόμβου είναι ο λόγος αυτού που μετράει ο κόμβος i. Έτσι δεν επιτρέπεται σε ένα κακόβουλο κόμβο με διασπορά ψευδών στοιχείων να αυξήσει τη φήμη ενός κόμβου του. Ισχύει $\hat{p}_j^{(k)} = 1 - \hat{c}_j^{(k)}$. Με βάση αυτή τη σχέση και τις σχέσεις που ορίζουν την πιθανότητα απόρριψης του DARWIN υπολογίζεται η πιθανότητα απόρριψης που θα χρησιμοποιεί για να προωθεί τα πακέτα του γείτονά του το επόμενο χρονικό διάστημα.

2.6.8.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Όπως αποδεικνύεται από προσομοιώσεις το DARWIN τιμωρεί τους εγωιστικούς κόμβους με αρκετά χειρότερο λόγω προώθησης απέναντι σε αυτούς που συνεργάζονται. Μάλιστα όσο αυξάνεται η πιθανότητα με την οποία απορρίπτουν τα πακέτα τόσο πέφτει η απόδοσή τους. Επίσης ακόμα και με 90% εγωιστικούς κόμβους η απόδοση των κόμβων που συνεργάζονται είναι καλύτερη από των εγωιστικών. Σε ποσοστά εγωιστικών κόμβων μέχρι 30% η διαφορά αυτή είναι πολύ μεγάλη. Ο λόγος προώθησης πακέτων παραμένει σχεδόν σταθερός ακόμα και σε υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, στους οποίους το p_e αυξάνεται με αποτέλεσμα να υπάρχουν λανθασμένες θετικές εκτιμήσεις. Έτσι φαίνεται ότι το σύστημα αυτό διατηρεί την ικανότητα να επαναφέρει την συνεργασία των κόμβων. Αυτό είναι λογικό αφού δεν χρειάζεται στο DARWIN ακριβής υπολογισμός του p_e για να επιτύχουμε πλήρη συνεργασία. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι ο μηχανισμός δεν είναι ευαίσθητος στις παραμέτρους του συστήματος. Τέλος αντιμετωπίζονται αποτελεσματικά τυχόν συμπαιγνίες κακόβουλων κόμβων [36].

2.6.9 Sprite (Simple Cheat Proof Credit Based System for Mobile Ad hoc Networks)

2.6.9.1 Αρχιτεκτονική του Sprite

Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί την έννοια της πίστωσης. Περιλαμβάνει μια υπηρεσία εξουσιοδότησης πιστώσεων (Credit Clearance Service - CCS) και ένα αριθμό κινητών κόμβων. Όταν ένας κόμβος λάβει ένα μήνυμα κρατάει μια απόδειξη και ανά τακτά χρονικά διαστήματα στέλνει τις αποδείξεις αυτές στο CCS για να δείξει τα μηνύματα που έλαβε/προώθησε. Το CCS καθορίζει την δαπάνη και δίνει κάποιους πόντους στους κόμβους που προώθησαν το μήνυμα ώστε να μπορούν αυτοί μετά να στείλουν τα δικά τους μηνύματα.

Αυτό γιατί η προώθηση περιλαμβάνει κάποιο κόστος για τους ενδιάμεσους κόμβους. Για την προστασία των κόμβων χρησιμοποιείται κρυπτογραφία δημόσιου κλειδιού [68][69].

Χρησιμοποιείται το DSR για να μπορεί η πηγή να έχει πλήρη γνώση της διαδρομής από την πηγή στον προορισμό. Ο κάθε κόμβος που προωθεί χάνει πόντους και αυτοί που προωθούν το μήνυμα κερδίζουν πόντους λόγου του κόστους της προώθησης και με σκοπό να αποκτήσουν τη δυνατότητα να στείλουν τα δικά τους μηνύματα αργότερα. Υπάρχουν δύο τρόποι ένας κόμβος να κερδίσει πόντους. Πρώτον, μπορεί να πληρώσει την χρέωσή του ή να αγοράσει κάποιους πόντους δίνοντας αληθινά λεφτά. Η αναλογία ανάμεσα στα αληθινά λεφτά και στους εικονικούς πόντους εξαρτάται από την απόδοση του δικτύου εκείνη τη στιγμή. Ο επικρατέστερος όμως τρόπος είναι με το να προωθεί τα μηνύματα των άλλων. Τις αποδείξεις που κρατάει ο κάθε κόμβος από την προώθηση των μηνυμάτων των άλλων κόμβων τις στέλνει περιοδικά στο CCS, όταν υπάρχει γρήγορη σύνδεση.

Διάταξη Πληρωμής: Καταρχάς μόνο η πηγή χρεώνεται για την αποστολή ενός μηνύματος. Αυτό γίνεται για να μην μπορεί ένας κόμβος να στείλει άχρηστα ή κακόβουλα μηνύματα. Από την άλλη, ο κόμβος που πρέπει να προωθήσει ένα μήνυμα θα λαμβάνει τους αντίστοιχους πόντους ανάλογα αν προώθησε ή όχι το μήνυμα. Σκοπός του όλου συστήματος είναι οι κόμβοι να συνεργάζονται και να αποτρέπονται πράξεις εξαπάτησης. Για αυτό οι ενδιάμεσοι κόμβοι παίρνουν λιγότερους πόντους από ότι πληρώνει η πηγή. Για να αποφευχθεί η μεγάλη εκροή πόντων από τους κόμβους στο CCS, περιοδικά το CCS δίνει στους κόμβους συγκεκριμένη ποσότητα πόντων.

Το CCS πληρώνει β πόντους τον τελευταίο κόμβο και α τους προηγούμενους κόμβους. Ισχύει $\beta<\alpha$. Οι επόμενοι κόμβοι δεν λαμβάνουν τίποτα. Το β πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το κόστος υποβολής της απόδειξης, το οποίο βέβαια είναι μικρό λόγω του μικρού μεγέθους της απόδειξης. Αυτό γίνεται για να έχει κίνητρο ο κόμβος να στείλει την απόδειξη. Αν ο προορισμός δεν αναφέρει την απόδειξη στο CSS, τότε αυτό χρεώνει την πηγή παραπάνω από ότι παίρνουν οι ενδιάμεσοι κόμβοι. Το συνολικό ποσό της χρέωσης της πηγής είναι μικρότερο κατά $k*\beta$ από αυτό όταν το μήνυμα φτάσει στον προορισμό του, όπου k είναι ο αριθμός των κόμβων που δεν έφτασε το μήνυμα. Για να αντιμετωπιστούν προβλήματα ,όπως οι ενδιάμεσοι κόμβοι – πιθανόν λόγω συμπαιγνίας μεταξύ τους- να προωθούν τις αποδείξεις αντί όλου του μηνύματος, αν ο προορισμός δεν αναφέρει την απόδειξη στο CSS, τότε το κέρδος των ενδιάμεσων κόμβων που έχουν στείλει την απόδειξη στο CSS μειώνεται. Συγκεκριμένα πολλαπλασιάζουμε τα κέρδη τους με μια τιμή, το $\gamma<1$. Επίσης από το συνολικό ποσό που χρεώνει το σύστημα αυτό την πηγή αν προώθησε αφαιρούμε $\gamma*k*\beta$. Αν και ο προορισμός είναι στην συμπαιγνία και αναφέρει ότι έλαβε το μήνυμα -αν και έλαβε την απόδειξη αυτού- ο καθορισμός των πόντων είναι σαν να έχει σταλθεί κανονικά το μήνυμα. Οι ενδιάμεσοι κόμβοι λαμβάνουν το κέρδος τους όταν στείλουν της αποδείξεις στο CSS. Αν ο

προορισμός του μηνύματος στείλει αργότερα την απόδειξη στο CSS ότι έλαβε το μήνυμα, οι ενδιάμεσοι κόμβοι παίρνουν την διαφορά αυτού που έπρεπε να πάρουν και αυτού που πήραν πριν.

Αυτό που μπορούμε να πούμε είναι ότι οι ενδιάμεσοι κόμβοι θα έχουν κέρδος αν προωθήσουν το μήνυμα ίσο με $p_2\ \alpha + (p_1 - p_2)\gamma\alpha + (1 - p_1)\gamma\beta - \gamma\beta$. Αυτό μπορούμε να το απλοποιήσουμε με την τιμή $p_2\ (1 - \gamma)\alpha + p_1\ \gamma(\alpha - \beta)$. Το p_1 είναι η πιθανότητα να προωθήσει το μήνυμα ο επόμενος κόμβος και p_2 η πιθανότητα να φτάσει το μήνυμα στον προορισμό. Αν αυτή η τιμή είναι μεγαλύτερη από το κόστος της προώθησης τότε συμφέρει τον κόμβο να προωθήσει το μήνυμα.

Πρωτόκολλο Προώθησης: Όταν η πηγή στείλει το μήνυμα για προώθηση στον επόμενο κόμβο στο μονοπάτι ενσωματώνει στο πακέτο τα πεδία $(m, p, seq_0(0, d), s)$ και τα στέλνει μαζί με το μήνυμα. Το *m* είναι μια συνάρτηση περίληψης του μηνύματος. Το *p* είναι το μονοπάτι που θα ακολουθήσει το πακέτο. Το *seq* είναι ένα sequence number που δίνεται από τον κάθε ενδιάμεσο κόμβο για το συγκεκριμένο μήνυμα. Το *s* είναι μια υπογραφή που βάζει ο κάθε κόμβος με βάση τα προηγούμενα τρία πεδία

Ο αποστολέας όταν θέλει να στείλει το μήνυμα αυξάνει πρώτα το *seq* και έπειτα στέλνει το μήνυμα. Ένας κόμβος όταν λαμβάνει ένα μήνυμα ελέγχει τρία πράγματα αν ισχύουν. Αυτά είναι:

- Ο κόμβος αυτός είναι στο μονοπάτι.
- Το *seq* του μηνύματος είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο αρχικό.
- Η υπογραφή είναι έγκυρη.

Αν κάποιο από αυτά δεν ισχύει τότε το πακέτο απορρίπτεται. Αλλιώς, σώζει το *(m, p, seq,* s) ως απόδειξη. Αν δεν είναι ο προορισμός και θέλει να προωθήσει το μήνυμα στέλνει μαζί με αυτό το *(m, p, seq, s)*. Το CSS όταν λάβει μια απόδειξη ελέγχει αν είναι έγκυρη με βάση το δημόσιο κλειδί.

2.6.9.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Καταρχάς από προσομοιώσεις φαίνεται ότι η απόδοση του δικτύου με βάση τον λόγο των πακέτων που προωθούνται είναι πολύ καλός και αν εξαιρέσουμε τα προβλήματα του δικτύου τείνει στο 1 εκτός από περιπτώσεις που οι πόροι του κόμβου – κυρίως η μπαταρία- είναι πολύ χαμηλοί. Επίσης και στην αύξηση των πακέτων που στέλνουν οι κόμβοι το Sprite συμπεριφέρεται πολύ καλά έχοντας λόγο προώθησης κοντά στο 1. Ακόμα και για μικρή ενέργεια μπαταρίας μέχρι ένα αρκετά σημαντικό αριθμό πακέτων η απόδοση του συστήματος είναι πολύ καλή. Το σύστημα είναι προστατευμένο και απέναντι σε συμπαιγνίες κόμβων. Τέλος δίνει κίνητρα στους κόμβους να συνεργάζονται και στην εύρεση των κατάλληλων

διαδρομών. Αυτό καθιστά το σύστημα πιο αποτελεσματικό στην εύρεση των πιο γρήγορων διαδρομών [68].

Ωστόσο, το σύστημα αυτό έχει ελαττώματα ως προς την ασφάλειά του. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ότι δεν προστατεύεται απέναντι σε ενεργές επιθέσεις στο δίκτυο(Denial of Service attacks). Επίσης υπάρχουν προβλήματα ως προς τις τοπολογικές απαιτήσεις του Sprite και ως προς τον μεγάλο αριθμό πληροφορίας ελέγχου που απαιτείται [17][18]. Αυτό οδηγεί και σε απαίτηση για περισσότερη ενέργεια που πρέπει να έχουν οι κόμβοι. Τέλος οι ακριανοί κόμβοι αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω του ότι δεν τους δίνεται η δυνατότητα να προωθήσουν πακέτα [67]. Τέλος η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος για την προώθηση του πακέτου θεωρείται ανάλογη της απόστασης. Αυτό όμως δε λαμβάνει υπόψη του τις διαλείψεις που συμβαίνουν σε ένα κανάλι [70].

2.6.10 Packet Purse Model (PPM) και Packet Trade Model (PTM)

Και οι δύο μηχανισμοί κινήτρων βασίζονται στο ότι όποιος κόμβος ζητάει μια υπηρεσία πρέπει να χρεώνεται για αυτήν και όποιος κόμβος την παρέχει να αμείβεται. Για αυτό εισάγεται ένα είδος νομίσματος που δεν έχει χρηματική αξία αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο από τους κόμβους. Αυτό το νόμισμα ονομάζεται nuglet [71][72][73].

2.6.10.1 Packet Purse Model (PPM)

Σε αυτό το μοντέλο πληρώνει ο αποστολέας του μηνύματος. Όταν ο αποστολέας θέλει να στείλει ένα πακέτο βάζει σε αυτό τόσα nuglets ώστε να μπορεί να φτάσει το πακέτο στον προορισμό. Κάθε ενδιάμεσος κόμβος παίρνει από το πακέτο 1 ή περισσότερα nuglets και έτσι αυξάνει το απόθεμά του. Ο αριθμός των nuglets που παίρνει κάθε κόμβος εξαρτάται από την σύνδεση που μεταδίδεται το πακέτο – για μεγαλύτερες αποστάσεις απαιτούνται περισσότερα nuglets. Αν τα nuglets δεν είναι αρκετά το πακέτο απορρίπτεται. Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε πως ο κάθε ενδιάμεσος κόμβος παίρνει ένα nuglet από το πακέτο για να το προωθήσει.

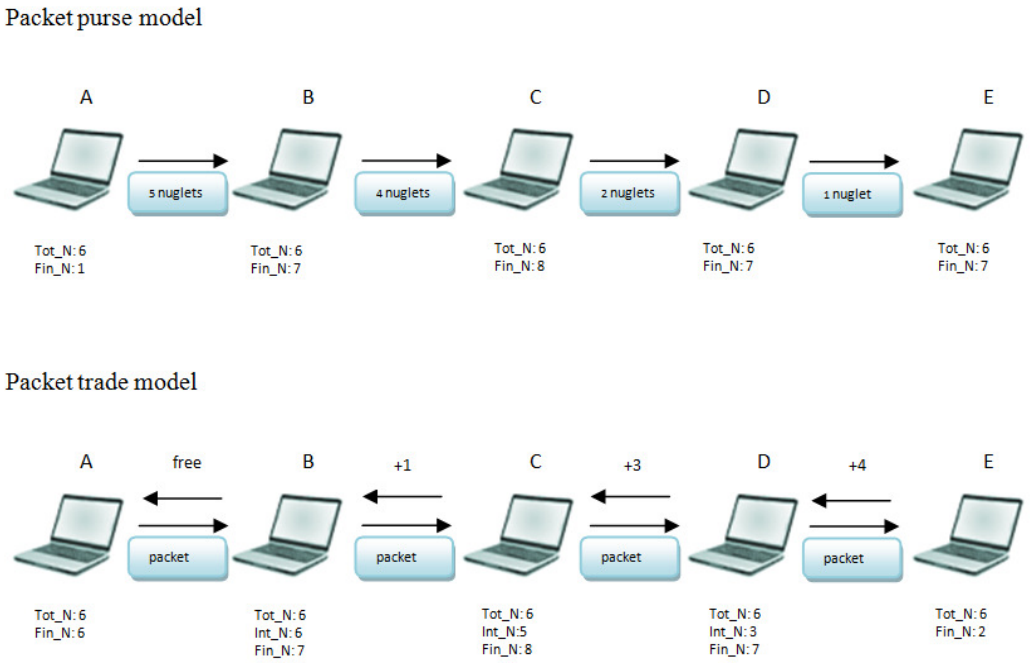
2.6.10.2 Packet Trade Model (PTM)

Στην περίπτωση αυτή πληρώνει ο παραλήπτης του πακέτου. Κάθε κόμβος αγοράζει το πακέτο από τον προηγούμενο κόμβο για κάποια nuglets και το πουλά για περισσότερα nuglets στον επόμενο κόμβο. Έτσι κάθε κόμβος κερδίζει κάποια nuggets για να καλύψει τις ανάγκες του και ο προορισμός πληρώνει τα nuglets που πήραν όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι. Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρούμε πως ο κάθε ενδιάμεσος κόμβος πουλάει το πακέτο στον επόμενο κόμβο ένα nuglet παραπάνω από ότι το αγόρασε από τον προηγούμενο κόμβο.

2.6.10.3 Διάταξη Ασφάλειας

Η διάταξη ασφάλειας αποθηκεύει και διαχειρίζεται κρίσιμα στοιχεία για τη σωστή συμπεριφορά του συστήματος. Τα στοιχεία που αποθηκεύονται σε αυτή τη διάταξη είναι:

- Ένα μοναδικό αναγνωριστικό για τον κάθε κόμβο. Ένα δημόσιο κλειδί και ένα ιδιωτικό κλειδί. Το ιδιωτικό κλειδί αποθηκεύεται σε αυτή τη διάταξη, ενώ το δημόσιο κλειδί δεν είναι ανάγκη να αποθηκευτεί εδώ και σώζεται κάπου αλλού. Το δημόσιο όμως κλειδί πρέπει να συσχετίζεται με το μοναδικό αναγνωριστικό του κόμβου από τις διατάξεις ασφάλειας των άλλων κόμβων. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της υποδομής δημόσιου κλειδιού που υπάρχει για να πιστοποιείται η γνησιότητα των κόμβων και να υπάρχουν ασφαλής συνδέσεις.
- Ο αριθμός των nuglets. Αυτός ο αριθμός αποθηκεύεται στην διάταξη ασφάλειας σαν μετρητής και δείχνει τον αριθμό των nuglets που έχει ο κάθε κόμβος.
- Μια λίστα με τους γειτονικούς κόμβους την κάθε χρονική στιγμή. Τα στοιχεία για τον κάθε γειτονικό κόμβο που υπάρχουν στην λίστα αυτή είναι: το μοναδικό αναγνωριστικό του, διαμοιραζόμενο μυστικό κλειδί, μετρητές για τα πακέτα που στάλθηκαν και λήφθηκαν και μετρητής καλής συμπεριφοράς(fine counter).



Εικόνα 2.29. Χρέωση με τα nuglets

Όταν δύο κόμβοι γίνονται γείτονες τότε δημιουργούν το διαμοιραζόμενο μυστικό κλειδί με τη βοήθεια του πρωτοκόλλου hello και της κρυπτογραφίας δημόσιου κλειδιού. Το πρωτόκολλο hello χρησιμοποιείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα για να βρίσκονται οι γείτονες του κόμβου. Το διαμοιραζόμενο μυστικό κλειδί συμβολίζεται ως $k_{SM,SM'}$ και είναι

γνωστό αποκλειστικά στους δύο αυτούς κόμβους ώστε να ασφαλίσουν την επικοινωνία τους. Ο μετρητής για τα πακέτα που στάλθηκαν συμβολίζεται ως $k_{SM\rightarrow SM'}$ και ο αντίστοιχος για αυτά που λήφθηκαν ως $k_{SM\leftarrow SM'}$. Αυτοί οι μετρητές χρησιμοποιούνται για να αναγνωρίσουν τυχόν επανάληψη του μηνύματος και αρχικοποιούνται και κάθε φορά που στέλνει μήνυμα ο κόμβος στέλνει μαζί με αυτόν το $k_{SM\rightarrow SM'}$ και έπειτα αυξάνει τον μετρητή. Όταν λάβει ένα μήνυμα από τον γείτονά του τότε ελέγχει αν η τιμή του μετρητή που περιέχεται στο μήνυμα είναι μεγαλύτερη από το $k_{SM\rightarrow SM'}$. Αν είναι μεγαλύτερη το αποδέχεται και αυξάνει τον μετρητή του σε αυτή τη τιμή, αλλιώς το απορρίπτει. Ο fine counter χρησιμοποιείται για να παρατηρεί τυχόν κακή συμπεριφορά του γείτονά του, συμβολίζεται ως $f_{SM,SM'}$ και έχει αρχική τιμή 0. Αν ο κόμβος δεν λάβει γνώση ότι ο γείτονάς του προώθησε το πακέτο αυξάνει αυτό τον μετρητή. Την επόμενη φορά στέλνει μαζί με το πακέτο και αυτό τον μετρητή και αν ο γείτονας συμπεριφερθεί καλά θα επαναφέρει στην αρχική τιμή των μετρητή. Αν λάβει το μήνυμα ο γείτονας θα μειωθούν τα nuglets του, αν όμως δεν τον λάβει θα αυξηθεί ο fine counter . Αν ο μετρητής περάσει ένα όριο τότε μπορεί να σταματήσει να στέλνει πακέτα σε αυτό τον κόμβο [71][72][73].

2.6.10.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Καταρχάς όσον αφορά και στα δύο συστήματα είναι αποδοτικά στο να παρακινούν τους χρήστες να συνεργάζονται, αφού αν δεν προωθούν δεν θα έχουν nuglets ώστε να μπορούν να στείλουν τα μηνύματά τους. Επίσης με τη χρήση του fine counter τα nuglets του κόμβου μειώνονται ακόμα περισσότερο αν δεν συνεργάζεται. Ακόμα αν συνεχιστεί αυτή η συμπεριφορά και το fine counter φτάσει σε ένα κατώφλι οι άλλοι κόμβοι δεν θα στέλνουν πακέτα πλέον από αυτό τον κόμβο. Επίσης έχουν αποτελεσματικούς μηχανισμούς απέναντι στην πλαστογράφηση των nuglets ώστε να μην μπορούν οι κόμβοι να τα πλαστογραφούν. Επίσης με τον έλεγχο για τυχόν επανάληψη του μηνύματος εξασφαλίζεται ότι οι κόμβοι δεν θα ξαναστείλουν το μήνυμα ώστε να κερδίσουν nuglets.

Από την άλλη βέβαια η επικεφαλίδα που προστίθεται στα πακέτα για την χρήση αυτών των μηχανισμών είναι αρκετά μεγάλη, προσθέτοντας έξτρα όγκο πληροφορίας για διακίνηση στο δίκτυο. Ακόμα το σύστημα κατά τη σχεδίασή του κάνει την παραδοχή ότι οι κόμβοι έχουν μικρή κινητικότητα ώστε να μπορεί με χρήση του πρωτοκόλλου hello να βρίσκει τους γείτονές του. Έτσι μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα όταν έχουμε μεγάλη κινητικότητα των κόμβων [71]. Επίσης η ενέργεια που καταναλώνει ένας κόμβος για την προώθηση του πακέτου παίρνεται ανάλογη της απόστασης. Αυτό όμως δεν παίρνει υπόψη του τις διαλείψεις που συμβαίνουν σε ένα κανάλι.

Όσον αφορά στο Packet Purse Model, έχει το πλεονέκτημα ότι οι κόμβοι αποθαρρύνονται να στέλνουν άχρηστα μηνύματα και έτσι να προκαλούν συμφόρηση στο δίκτυο, αφού έτσι θα μειώνονται τα nuglets του. Βέβαια λόγω του γεγονότος ότι είναι δύσκολο για ένα κόμβο να υπολογίσει από πριν πόσα nuglets χρειάζεται για να φτάσει στον προορισμό το πακέτο, μπορούν να δημιουργηθούν προβλήματα στους κόμβους.

Το Packet Trade Model έλυσε το πρόβλημα του PPM για τον υπολογισμό των nuglets, κάνοντας ταυτόχρονα δυνατή την broadcast μεταφορά πακέτου. Όμως έχει το μειονέκτημα ότι δεν μπορεί να εμποδίσει αποτελεσματικά ένα κόμβο από το να στείλει άχρηστα πακέτα και να συμφορήσει το δίκτυο [69][71]. Επίσης η ενέργεια που καταναλώνουν οι κόμβοι για να εφαρμόσουν αυτούς τους μηχανισμούς είναι μεγάλη και οι ακριανοί κόμβοι αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω του ότι δεν τους δίνεται η δυνατότητα να προωθήσουν πακέτα [67].

2.6.11 HEAD (A Hybrid Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks)

2.6.11.1 Μηχανισμός HEAD

Το HEAD βασίζεται στο μηχανισμό φήμης OCEAN. Ανακαλύπτει και τιμωρεί τους κακόβουλους κόμβους με χρήση της φήμης και αναγκάζει τους εγωιστικούς κόμβους να συνεργαστούν χρησιμοποιώντας μηχανισμό αμοιβής. Η φήμη του κάθε κόμβου προέρχεται αποκλειστικά από τις παρατηρήσεις του ίδιου του κόμβου. Ο μηχανισμός επιτήρησης του μηχανισμού διατηρεί δύο λίστες: ελαττωματική λίστα για τους κακόβουλους κόμβους και εγωιστική λίστα για τους εγωιστικούς κόμβους (δηλαδή για τους κόμβους που δεν έχουν αρκετά χρήματα για να στείλουν τα πακέτα τους). Κάθε φορά που ένας γειτονικός κόμβος κάνει αίτηση για να του προωθήσει ένα πακέτο του, ο κόμβος κοιτάει στις δύο αυτές λίστες και αν υπάρχει εκεί ο γείτονας απορρίπτει το πακέτο.

Κάθε κόμβος έχει ένα πίνακα φήμης που κάθε σειρά αντιστοιχεί σε ένα γειτονικό κόμβο. Η κάθε σειρά έχει πέντε στοιχεία. Αυτά είναι:ID του γειτονικού κόμβου, αξιολόγηση, chipcount, λίστα αποφυγής και λίστα nonchip. Η αξιολόγηση περιέχει την τιμή της φήμης του γειτονικού κόμβου που αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα αν συνεργάστηκε ή όχι αντίστοιχα ο γείτονας. Αν η τιμή αυτή πέσει κάτω από ένα κατώφλι ο κόμβος αυτός μπαίνει στην ελαττωματική λίστα. Το chipcount είναι το ίδιο όπως και στο OCEAN. Η λίστα αποφυγής και η λίστα nonchip περιέχουν τους κόμβους που θεωρούνται κακόβουλοι και εγωιστικοί αντίστοιχα από αυτό τον γείτονα.

Κάθε κόμβος μεταδίδει ανά χρονικές περιόδους μηνύματα προειδοποίησης, τα οποία περιέχουν την ελαττωματική και τη εγωιστική λίστα του, σε κάθε γείτονά του. Ο γείτονας με το που θα λάβει αυτό το μήνυμα ανανεώνει τις λίστες αποφυγής και nonchip. Επίσης το

HEAD διαθέτει μηχανισμό δεύτερης ευκαιρίας. Κάθε κόμβος που είναι στην ελαττωματική λίστα φεύγει από αυτή μετά από ένα χρονικό διάστημα ώστε να γίνει χρήσιμος ξανά. Παρόλα αυτά η τιμή της φήμης του δεν αλλάζει ώστε αν συνεχίσει την ίδια συμπεριφορά να ξαναμπεί στην ελαττωματική λίστα γρήγορα.

Κάθε φορά που λαμβάνει ένα πακέτο ένας κόμβος ελέγχει αν ο προηγούμενος και ο επόμενος κόμβος στην διαδρομή υπάρχει στην ελαττωματική λίστα του. Αν υπάρχει απορρίπτει το πακέτο, αλλιώς κοιτάει την εγωιστική λίστα για τον επόμενο κόμβο. Αν δεν βρίσκεται ο επόμενος κόμβος σε αυτή τη λίστα, μειώνει το chipcount του προηγούμενου κόμβου κατά ένα, αυξάνει το chipcount του επόμενου κόμβου κατά 1, ορίζει τον χρόνο παύσης και προωθεί το πακέτο. Έπειτα ελέγχει τις λίστες αποφυγής και nonchip του επόμενου κόμβου από τον πίνακα φήμης. Αν ο μεθεπόμενος κόμβος στη διαδρομή υπάρχει σε αυτές, αναβάλει το πακέτο. Ταυτόχρονα ο κόμβος παρατηρεί την συμπεριφορά του επόμενου κόμβου. Αν μέσα στο χρόνο παύσης ο επόμενος κόμβος προωθήσει το πακέτο, αυξάνει την φήμη του επόμενου κόμβου. Αλλιώς την μειώνει. Αν υπάρχει κοινός γείτονας Γ δύο συνεχόμενων κόμβων σε μία διαδρομή, ο κόμβος Γ παρακολουθεί αν θα προωθήσει το πακέτο ο δεύτερος κόμβος και τον βαθμολογήσει – όπως κάνει και ο πρώτος κόμβος [74].

2.6.11.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα

Ο μηχανισμός αυτός μέσω του μηνύματος προειδοποίησης βρίσκει γρήγορα και αντιμετωπίζει αποτελεσματικά τους κακόβουλους κόμβους. Επίσης χρησιμοποιώντας τα chipcount αναγκάζει τους εγωιστικούς κόμβους ανεξάρτητα την φήμη τους να συνεργάζονται. Ωστόσο επειδή βασίζεται στις παρατηρήσεις του κάθε κόμβου στον υπολογισμό της φήμης αντιμετωπίζει προβλήματα σε περίπτωση μεγάλης κινητικότητας των κόμβων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.7: ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΡΩΝ

2.7.1 Εισαγωγή στο ICARUS

Στο κεφάλαιο αυτό της διδακτορικής διατριβής περιγράφεται ένας υβριδικός μηχανισμός κινήτρων που εντοπίζει και τιμωρεί αποτελεσματικά τους εγωιστικούς κόμβους, ενώ παράλληλα προστατεύει και ανταμείβει τους κόμβους που συνεργάζονται. Ο μηχανισμός αυτός, που καλείται ICARUS (hybrId inCentive mechAnism for coopeRation stimUlation in ad hoc networks), βασίζεται στο μηχανισμό DARWIN, ο οποίος περιγράφηκε στην Ενότητα 2.6.8 της παρούσης διατριβής. Ο ICARUS επιπλέον υιοθετεί τη χρήση μιας κεντρικής οντότητας παρόμοια με το Sprite, έναν μηχανισμό που βασίζεται σε credits (Ενότητα 2.6.9). Ο στόχος είναι να βελτιωθεί η απόδοση του DARWIN χρησιμοποιώντας στοιχεία από τους credit-based μηχανισμούς.

N	A set containing all nodes
$\mathbf{N_c}$	A set containing only cooperating nodes
$edp_i^{(k)}$	Estimated dropping probability for node *i* in time slot *k*
$p_i^{(k)}$	Expected dropping probability of node *i* at time slot *k*
$N_i^{(k)}$	A set containing the neighbors of node *i* at time slot *k*
$S_{ij}^{(k)}$	Number of packets sent from node *i* to node *j* for forwarding until time slot *k*
$F_{ij}^{(k)}$	Number of packets forwarded from node *j* for node *i* until time slot *k*
$c_{ij}^{(k)}$	Forwarding ratio of node *j* at time slot *k*, as perceived by node *i*
$cp_j^{(k)}$	Average connectivity ratio of node *j* at time slot *k*
$p_{i,r}$	Packet sent from node *i* with index *r*
SBI_i	Selfish Behavior Index for node *i*
$cp_{ICAS,i}^{(k)}$	Forwarding ratio of node *i* at time slot *k*, as perceived by ICAS
$m_i^{(k)}$	The number of credits that node *i* possesses at time slot *k*
$r_{i,z}$	The reward (in credits) of node *i* for forwarding packet *z* at time slot *k*
$\cos t_{i,z}$	The total cost for a single packet *z* sent by node *i*
$rl_{i,z}$	A list of all the nodes that acted as relays for packet *z*
$S_i^{(k)}$	Total number of packets to node *i* for forwarding until time slot *k*

Πίνακας 2.17. Συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται στο ICARUS

2.7.2 Μοντέλο Δικτύου

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των μηχανισμών κινήτρων. Στον Πίνακα 2.17 συγκεντρώνονται οι συμβολισμοί όλων των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται.

2.7.2.1 Στρατηγικές και Αποδόσεις

Υποθέτουμε ότι ένας συγκεκριμένος αριθμός κόμβων δρα εγωιστικά και αρνείται να προωθήσει πακέτα. Κάθε ζευγάρι κόμβων εξετάζεται ως ένα παίγνιο δύο παικτών όπου ο ένας κόμβος συμβολίζεται με *i* και ο γείτονάς του με *–i*. Μια γενική υπόθεση είναι ότι οι κόμβοι στέλνουν πακέτα ο ένας στον άλλο και στη συνέχεια αποφασίζουν ταυτόχρονα για το αν θα προωθήσουν ή θα απορρίψουν πακέτα. Το παίγνιο αυτό επαναλαμβάνεται συνεχώς.

Η προώθηση πακέτων καταναλώνει πόρους, κατά συνέπεια ένας κόμβος πρέπει να αμείβεται όταν προωθεί ένα πακέτο. Η αμοιβή για προώθηση πακέτου είναι α (α ≥ 1), ενώ το κανονικοποιημένο κόστος προώθησης είναι 1. Ο πίνακας αποδόσεων φαίνεται στον Πίνακα 2.21, ενώ η κανονικοποιημένη μορφή του στον Πίνακα 2.22 [36][59]. Η κανονικοποίηση γίνεται ως εξής: αν v είναι μια τιμή του Πίνακα 2.21 και v_n η αντίστοιχη κανονικοποιημένη τιμή του Πίνακα 2.22, τότε $v_n = (v + a) / (2 \cdot a - 1)$.

		Node 2			
		Forward		Drop	
Node 1	Forward	α-1	α-1	-α-1	α
	Drop	α	-α-1	-α	-α

Πίνακας 2.18. Πίνακας αποδόσεων του παιγνίου προώθησης πακέτων

		Node 2			
		Forward		Drop	
Node 1	Forward	α-1	α-1	-α-1	α
	Drop	α	-α-1	-α	-α

Πίνακας 2.19. Κανονικοποιημένος πίνακας αποδόσεων του παιγνίου προώθησης πακέτων

Συμβολίζουμε ως $p_i^{(k)}$ την αναμενόμενη πιθανότητα απόρριψης του κόμβου *i* τη χρονοθυρίδα *k*. Ένα πακέτο θεωρείται απορριφθέν είτε αν ο *–i* το απορρίψει είτε αν δεν χαθεί αλλά ο *i* δεν ενημερωθεί ποτέ για τη μετάδοση. Με βάση τον Πίνακα 2.19, η μέση απόδοση $u_i^{(k)}$ του *i* τη χρονοθυρίδα *k* είναι [36][59]

$$\begin{aligned} u_i^{(k)} &= (1-p_i^{(k)})(1-p_{-i}^{(k)}) + \frac{2\cdot a}{2\cdot a-1}\cdot p_i^{(k)}\cdot(1-p_{-i}^{(k)}) - \frac{2\cdot a}{2\cdot a-1}\cdot(1-p_i^{(k)})\cdot p_{-i}^{(k)} = \\ &= 1 + \frac{1}{2\cdot a-1}\cdot p_i^{(k)} - \frac{2\cdot a}{2\cdot a-1}\cdot p_{-i}^{(k)} \end{aligned} \tag{2.45}$$

Κάθε κόμβος στέλνει πακέτα περιοδικά, ενώ ο αποστολέας καθορίζεται δυναμικά και αλλάζει ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οποτεδήποτε κάποιος κόμβος λαμβάνει ένα πακέτο

αποστέλλει ένα πακέτο επιβεβαίωσης (το οποίο θα αναφέρουμε ως ack), το οποίο ακολουθεί την ίδια διαδρομή ανάποδα μέχρι να φτάσει στον αποστολέα του πακέτου. Με τον τρόπο αυτό κάθε κόμβος ανανεώνει τα στατιστικά που κρατάει μόνο όταν λάβει ένα ack. Αυτό σημαίνει ότι, ακόμη κι αν ένα πακέτο φτάσει επιτυχώς στον προορισμό του, εάν για οποιαδήποτε λόγο χαθεί το ack τότε οι κόμβοι θα υποθέσουν ότι το πακέτο απορρίφθηκε από το γείτονά τους.

Μια σημαντική παραδοχή αυτής της εργασίας είναι ότι όλοι οι κόμβοι θα προωθούν πάντα τα acks, αφού το μικρό τους μέγεθος δεν απαιτεί πολλούς πόρους για την προώθηση. Η εκτιμώμενη πιθανότητα απόρριψης $u_i^{(k)}$ του κόμβου *i* τη χρονοθυρίδα *k* υπολογίζεται όπως στις αναφορές [36][59].

Συμβολίζουμε με $N_i^{(k)}$ τους γείτονες του *i* τη χρονοθυρίδα *k*. Ο κόμβος *i* κρατάει τα εξής στατιστικά για κάθε γείτονά του *j*:

- Τον αριθμό των πακέτων που στάλθηκαν στον *j* για προώθηση μέχρι τη χρονοθυρίδα *k*: $S_{ij}^{(k)}$.
- Τον αριθμό των πακέτων που προωθήθηκαν από τον *j* μέχρι τη χρονοθυρίδα *k*: $F_{ij}^{(k)}$.

Έπειτα ο *i* υπολογίζει το ποσοστό προώθησης του *j* ως

$$c_{ij}^{(k)} = \frac{F_{ij}^{(k)}}{S_{ij}^{(k)}} \tag{2.46}$$

το οποίο πρακτικά εκφράζει το κατά πόσο ένας κόμβος είναι συνεργάσιμος ή όχι. Το ποσοστό αυτό χρησιμοποιείται και στη δρομολόγηση, όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 2.3. Στη συνέχεια οι κόμβοι ανταλλάσσουν μεταξύ τους αυτή την πληροφορία και τελικά, όταν έχουν συγκεντρωθεί όλες οι τιμές, ο κόμβος *i* υπολογίζει το μέσο ποσοστό συνδεσιμότητας του *j* ως [36][59]

$$cp_j^{(k)} = \frac{\sum_{m \in N_i^{(k)} \cup \{i\}, m \neq j} c_{im}^{(k)} \cdot c_{mj}^{(k)}}{\sum_{m \in N_i^{(k)} \cup \{i\}, m \neq j} c_{im}^{(k)}} \quad \text{όπου } c_{ii}^{(k)} = 1 \tag{2.47}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο μέσος σταθμίζεται με την εκτιμώμενο ποσοστό συνδεσιμότητας που μετράει ο *i* για τον *m*. Αυτό μας βοηθάει στο να αποφύγουμε επιθέσεις και διάδοση ψευδούς πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό ελαχιστοποιούμε τη σημασία της πληροφορίας που προέρχεται από αναξιόπιστους κόμβους.

2.7.2.2 Δρομολόγηση

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε πώς πραγματοποιείται η δρομολόγηση στα πλαίσια αυτής της μελέτης. Ως βέλτιστη διαδρομή θεωρείται αυτή που περιέχει τον ελάχιστο αριθμό

ενδιάμεσων κόμβων. Στην περίπτωση που εντοπίζονται δύο ή περισσότερες διαδρομές με τον ίδιο αριθμό ενδιάμεσων κόμβων, τότε προτιμάται αυτή που αντιστοιχεί στη μικρότερη συνολική απόσταση. Η συνολική απόσταση υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους αποστάσεων όλων των βημάτων (hops). Κάθε κόμβος διατηρεί πληροφορία σχετικά το ποιος κόμβος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσος ανάλογα με τον εκάστοτε προορισμό. Με άλλα λόγια, οι κόμβοι δε γνωρίζουν ολόκληρη τη διαδρομή, αλλά μόνο το επόμενο βήμα.

Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί δύο είδη πινάκων. Ο πρώτος περιλαμβάνει μόνο τους γείτονες του κόμβου και περιέχει αναλυτικές πληροφορίες, όπως φήμη, στατιστικά, κτλ. Ο δεύτερος πίνακας περιλαμβάνει μόνο τους μη γειτονικούς κόμβους και περιέχει μόνο ελάχιστες πληροφορίες: ένδειξη για το ποιος γειτονικός κόμβος πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως ενδιάμεσος, συνολικός αριθμός απαιτούμενων βημάτων και συνολική απόσταση σε μέτρα.

Προκειμένου να αποφευχθεί απώλεια πακέτων και να απομονωθούν οι εγωιστικοί κόμβοι, υποθέτουμε ότι οι κόμβοι δε θα προωθούν πακέτα σε εγωιστικούς κόμβους ακόμη και αν θεωρούνται βέλτιστοι ενδιάμεσοι στις αποθηκευμένες διαδρομές. Ο κόμβος i θεωρεί τον κόμβο j εγωιστή αν το ποσοστό προώθησης $c_{ij}^{(k)}$ είναι μικρότερο από ένα προκαθορισμένο κατώφλι. Το $c_{ij}^{(k)}$ υπολογίζεται περιοδικά έτσι ώστε να εντοπίζονται αποδοτικά οι εγωιστικοί κόμβοι.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου δρομολόγησης είναι ότι οι κόμβοι δεν πρέπει να προωθούν πακέτα στους εγωιστικούς κόμβους. Αν το επόμενο βήμα της διαδρομής αντιστοιχεί σε εγωιστικό κόμβο, τότε πρέπει να βρεθεί εναλλακτική διαδρομή. Επιπλέον, προκειμένου να μειωθούν οι μη απαραίτητες αποστολές πακέτων και να αποφευχθεί το φαινόμενο του ping pong, θεωρούμε ότι ένα πακέτο δεν μπορεί να προωθηθεί σε έναν κόμβο από τον οποίο έχει ήδη περάσει. Επιπλέον, ο μέγιστος αριθμός επιτρεπόμενων βημάτων περιορίζεται σε h_{max}. Μετά από αυτό τον αριθμό βημάτων το πακέτο αυτόματα απορρίπτεται. Το h_{max} πρέπει να καθοριστεί από το σχεδιαστή του συστήματος, ανάλογα με την τοπολογία του δικτύου (αριθμός και πυκνότητα κόμβων), τον μέσο αριθμό απαιτούμενων βημάτων, τον αναμενόμενο αριθμό εγωιστικών κόμβων, κτλ.

Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος Α αναζητεί διαδρομή προς τον κόμβο Β. Ο ψευδοκώδικας της Εικόνας 2.30 επεξηγεί τη διαδικασία δρομολόγησης. Αν το επόμενο βήμα της διαδρομής που υποδεικνύουν οι πίνακες δρομολόγησης του Α δεν αντιστοιχεί σε εγωιστικό κόμβο ή σε κόμβο που υπάρχει ήδη στη διαδρομή, τότε το πακέτο προωθείται. Διαφορετικά αναζητείται εναλλακτική διαδρομή προς τον Β από τους εναπομείναντες γειτονικούς κόμβους του Α. Η βέλτιστη διαδρομή είναι αυτή που περιλαμβάνει τα λιγότερα βήματα και τη μικρότερη συνολική απόσταση. Εάν με αυτό τον τρόπο εντοπιστεί μια εναλλακτική διαδρομή προς τον Β, τότε το πακέτο προωθείται. Επιπλέον, εάν ο επόμενος κόμβος της παλιάς διαδρομής ήταν

εγωιστικός, τότε η νέα διαδρομή αποθηκεύεται, αντικαθιστώντας την παλιά. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση που δεν εντοπιστεί εναλλακτική διαδρομή, τότε το πακέτο προωθείται στον αρχικό του προορισμό, αρκεί αυτός να μην περιλαμβάνεται ήδη στο μονοπάτι της διαδρομής (ανεξαρτήτως του αν είναι εγωιστικός ή όχι). Αν ανήκει ωστόσο στο μονοπάτι, αναζητείται εναλλακτική στους γείτονες του A, αλλά αυτή τη φορά λαμβάνονται υπόψη και οι εγωιστικοί κόμβοι. Αν ο A αποτύχει πάλι να βρει άλλη διαδρομή, τότε το πακέτο τελικά απορρίπτεται.

```
next_node is specified by old route to B;
if (next_node is not selfish and next_node is not in the existing path) then
        send packet to next_node;
end if
else do
        for each neighbor j do
                if (j is not selfish and j is not in the existing path) then
                        if (proposed route to B is optimal) then
                                new route to B has been found;
                        end if
                end if
        end for
        if (a new route to B has been found) then
                new_next_node is specified by new route;
                send packet to new_next_node;
                if (next_node is selfish) then
                        A stores new route to B;
                end if
        end if
        else do
                if (next_node is not in the existing path) then
                        send packet to next_node;
                end if
                else do
                        search all neighbors that are not in the existing path to find new route to B;
                        if (a new route to B has been found) then
                                new_next_node is specified by new route;
                                send packet to new_next_node;
                        end if
                        else do
                                drop the packet;
                        end else
                end else
        end else
end else
```

Εικόνα 2.30. Ψευδοκώδικας για δρομολόγηση

2.7.2.3 Συμπεριφορά Εγωιστικών Κόμβων

Ένα συγκεκριμένο ποσοστό κόμβων θεωρείται εγωιστικό. Οι κόμβοι αυτοί αρνούνται να προωθήσουν πακέτα όσο αντιλαμβάνονται ότι μπορούν να χρησιμοποιούν τους πόρους του δικτύου προς όφελός τους. Μόλις ωστόσο αντιληφθούν ότι τα πακέτα τους πλέον δεν προωθούνται, θεωρούν τον εαυτό τους απομονωμένο και αρχίζουν να προωθούν μέχρι την

άρση της απομόνωσης. Με άλλα λόγια, η απομόνωση από το δίκτυο αποτελεί κίνητρο για «μεταστροφή» και κατά συνέπεια μη εγωιστική συμπεριφορά.

Ως απομόνωση θεωρούμε την κατάσταση όπου ένας κόμβος αποτυγχάνει να έχει έστω και ένα προωθημένο πακέτο του για ένα συγκεκριμένο διάστημα. Ο συνολικός αριθμός των πακέτων που πρέπει να απορριφθούν προτού ένας εγωιστής κόμβος θεωρήσει τον εαυτό του απομονωμένο συμβολίζεται ως *IFN (Isolation Flag Number).*

Υποθέτοντας ότι όλα τα πακέτα που αποστέλλονται από τον κόμβο *i* συμβολίζονται ως $p_{i,index}$ και ότι *f* είναι ο αριθμός των πακέτων που προωθούνται με σειριακό αριθμό index ανάμεσα στο διάστημα $r - IFN \leq index \leq r$, τότε ο δείκτης *SBI (Selfish Behavior Index)* για τον κόμβο *i* αφότου έχει σταλεί το πακέτο με σειριακό αριθμό *r*, ορίζεται ως

$$SBI_i^{(r)} = f \tag{2.48}$$

Με βάση την προηγούμενη σχέση, οι εγωιστικοί κόμβοι θα ξεκινήσουν να συνεργάζονται μόνο όταν $SBI_i = 0$. Διαφορετικά, αν έστω και ένα πακέτο τους έχει προωθηθεί επιτυχώς και συνεπώς $SBI_i > 0$, θα συνεχίσουν να κλέβουν. Η στρατηγική επομένως των εγωιστικών κόμβων συνοψίζεται ως

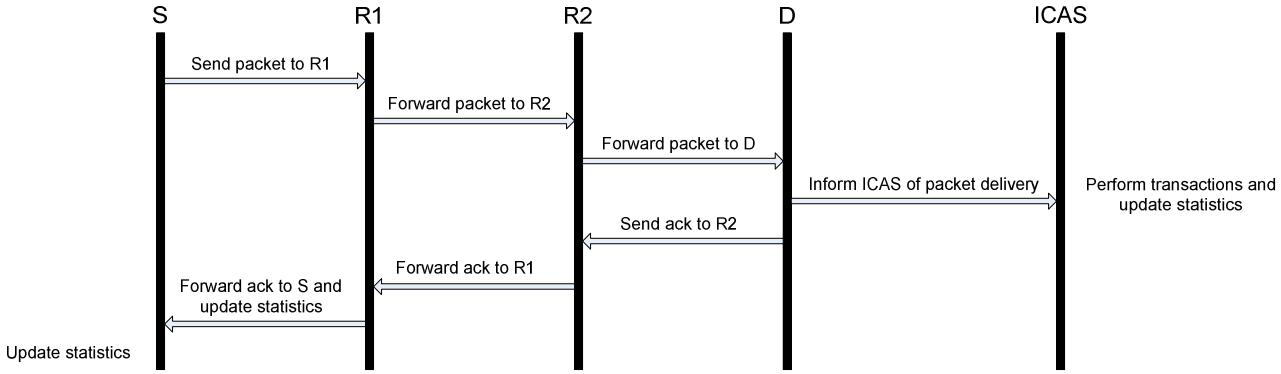
- Απόρριψη πακέτων, αν $SBI_i > 0$
- Εφαρμογή μηχανισμού κινήτρων (δηλαδή συμπεριφορά συνεργατικού κόμβου) αν $SBI_i = 0$

2.7.3 Συνεργασία Κόμβων στο ICARUS

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τον προτεινόμενο υβριδικό μηχανισμό κινήτρων ICARUS, που βασίζεται πάνω στο DARWIN όσον αφορά την εκτίμηση της πιθανότητας απόρριψης πακέτων και του ποσοστού συνδεσιμότητας. Στο ICARUS ωστόσο εκμεταλλευόμαστε τη φήμη για να ελέγχουμε την ανταλλαγή των credits. Όλες οι συναλλαγές πραγματοποιούνται από μια ανεξάρτητη οντότητα που καλείται *ICAS (ICARUS Credit Accounts Service).* Οι κύριοι στόχοι του ICARUS συνοψίζονται ως:

- Ταχύτερη και αυστηρότερη τιμωρία εγωιστικών κόμβων
- Βελτίωση QoS για μη εγωιστικούς κόμβους
- Κίνητρα για συνεργαζόμενους κόμβους ώστε να συνεχίσουν να προωθούν πακέτα
- Δικαιοσύνη για μακρινούς κόμβους
- Αποκλεισμός της πιθανότητας οι εγωιστικοί κόμβοι να εκμεταλλευτούν μια μακρινή θέση για να πλουτίσουν
- Προστασία του συστήματος από κακόβουλους κόμβους που διαδίδουν ψευδείς πληροφορίες.

Η Εικόνα 2.31 απεικονίζει τις δράσεις που λαμβάνουν χώρα μέχρι να παραδοθεί ένα πακέτο από την πηγή (**S**) στον προορισμό του (**D**) με δύο ενδιάμεσους κόμβους (**R1**, **R2**). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, κάθε κόμβος ανανεώνει τα στατιστικά του μόλις λάβει την επιβεβαίωση ότι ο επόμενος κόμβος έχει συνεργαστεί.



Εικόνα 2.31. Παράδειγμα προώθησης πακέτου με δύο ενδιάμεσους κόμβους στο ICARUS

2.7.3.1 Λειτουργίες του ICAS

Το ICAS έχει πρακτικά το ρόλο της τράπεζας, πραγματοποιώντας όλες τις ανταλλαγές credits (πληρωμές, κοστολόγηση, αμοιβές, κτλ) ως ένας αντικειμενικός παρατηρητής του δικτύου. Αυτό γίνεται προκειμένου να αποφευχθεί η κλοπή credits ή η διάχυση ψευδών πληροφοριών από κακόβουλους κόμβους. Οι κύριες λειτουργίες του ICAS είναι οι παρακάτω:

- Το ICAS διατηρεί τα credits κάθε κόμβου.
- Το ICAS αναθέτει ένα μικρό αριθμό credits m_0 σε όλους τους καινούριους κόμβους
- Όταν λαμβάνεται επιβεβαίωση λήψης πακέτου, το ICAS υπολογίζει τις αμοιβές για όλους τους ενδιάμεσους κόμβους και το κόστος για τον αποστολέα κόμβο. Τα ποσά αυτά ανταλλάσσονται στη συνέχεια μεταξύ των συμβαλλόμενων κόμβων.
- Το ICAS επιτρέπει ή απαγορεύει στους κόμβους να στείλουν πακέτα ανάλογα με τον αριθμό των credits που διαθέτουν.
- Το ICAS βοηθάει τους απομακρυσμένους κόμβους αν χρειάζεται

Οι επόμενες ενότητες επεξηγούν τις λειτουργίες του ICAS. Κάθε κόμβος υπολογίζει το ποσοστό προώθησης $c_{ij}^{(k)}$ για όλους τους γείτονές του, με βάση την εξίσωση (2.47). Το ποσοστό αυτό το προωθούν στο ICAS, το οποίο στη συνέχεια υπολογίζει το μέσο ποσοστό συνδεσιμότητας $cp_{ICAS,i}^{(k)}$ κάθε κόμβο, με βάση τη συγκεντρωτική πληροφορία. Υποθέτοντας ότι N είναι το σύνολο των κόμβων και $\mathrm{N_c} \in \mathrm{N}$ είναι ένα υποσύνολο που περιέχει μόνο τους συνεργάσιμους κόμβους,

$$cp_{ICAS,i}^{(k)} = \frac{\sum_{j \in N_c}^{\text{cardinality}\{N\}} c_{ji}^{(k)}}{\text{cardinality}\left\{N_c\right\}} \tag{2.49}$$

Αν το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο από ένα συγκεκριμένο κατώφλι $cp_{ICAS,th}$, τότε το ICAS θεωρεί τον κόμβο *i* εγωιστή

$$i = \begin{Bmatrix} \text{selfish, if } cp_{ICAS,i}^{(k)} < cp_{ICAS,th} \\ \text{non selfish, if } cp_{ICAS,i}^{(k)} \geq cp_{ICAS,th} \end{Bmatrix} \tag{2.50}$$

Ως μέτρο ασφαλείας το ICAS αγνοεί τις παρατηρήσεις των κόμβων που έχουν μαρκαριστεί ως εγωιστές. Αφού λοιπόν συγκεντρώνεται πληροφορία μόνο από αξιόπιστους κόμβους, είναι αδύνατο για τους κακόβουλους κόμβους να διαδώσουν ψευδή πληροφορία. Ακόμα κι αν λίγοι κόμβοι διαδώσουν ψευδή πληροφορία, το ICAS δε θα επηρεαστεί σημαντικά. Προβλήματα φυσικά θα παρουσιαστούν στην περίπτωση που ο αριθμός των κόμβων που ψεύδονται είναι υπερβολικά μεγάλος (π.χ. > 50%).

2.7.3.2 Τιμολόγηση στο ICARUS

Οι κόμβοι διαφοροποιούνται σε τρεις διακριτές καταστάσεις ανάλογα με τον αριθμό των credits που διαθέτουν. Αν ο αριθμός των credits που έχει ο κόμβος *i* τη χρονοθυρίδα *k* είναι $m_i^{(k)}$ και το κατώφλι των credits είναι S_t, τότε οι καταστάσεις ορίζονται ως

- Κατάσταση 0 – Ο κόμβος μπορεί να στείλει πακέτα οπουδήποτε: αν $m_i^{(k)} \geq S_t$.
- Κατάσταση 1 – Ο κόμβος μπορεί να στείλει πακέτα μόνο στους γείτονές του: αν $m_i^{(k)} < S_t$.
- Κατάσταση 2 – Ο κόμβος δεν μπορεί να στείλει πακέτα πουθενά : αν $m_i^{(k)} < 0$.

Σύμφωνα με τις παραπάνω καταστάσεις, ένας κόμβος χωρίς credits δεν έχει το δικαίωμα να αποστείλει πακέτα. Το ICAS είναι υπεύθυνο για να καταγράφει τα credits κάθε κόμβου και κατά συνέπεια να προσδιορίζει σε ποια κατάσταση βρίσκεται. Σε αυτό το σημείο γίνεται η παραδοχή ότι χωρίς εξουσιοδότηση από το ICAS οι κόμβοι δεν μπορούν να στείλουν πακέτα.

Η τιμολόγηση στο ICARUS βασίζεται στη φήμη κάθε κόμβου. Οι αμοιβές βασίζονται στο εκτιμώμενο μέσο ποσοστό συνδεσιμότητας των κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, η αμοιβή $r_{i,z}$ (σε credits) του κόμβου *i* για την προώθηση του πακέτου *z* τη χρονοθυρίδα είναι

$$r_{i,z} = a + b \cdot \left[cp_i^{(k)} \right]^2 \tag{2.51}$$

όπου *a*, *b* είναι σταθερές. Για το συγκεκριμένο σύστημα που εξετάζεται επιλέξαμε $a = 0.5$ και $b = 2.3$. Αφού ο αποστολέας υποχρεούται να ανταμείψει όλους τους κόμβους που λειτούργησαν ως ενδιάμεσοι, το συνολικό κόστος $\cos t_{i,z}$ για το πακέτο *z* που στάλθηκε από τον κόμβο *i* υπολογίζεται ως

$$\cos t_{i,z} = \sum_{j \in N, j \in rl_{i,z}} r_{i,z} \tag{2.52}$$

όπου $rl_{i,z}$ είναι μια λίστα όλων των κόμβων που προώθησαν το πακέτο *z*. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.31, όλες οι ανταλλαγές credits γίνονται αφού ένα πακέτο φτάσει στον προορισμό του και ο παραλήπτης ενημερώσει το ICAS. Κατά συνέπεια, αν το πακέτο δεν φτάσει στον προορισμό του, τότε το ICAS δεν ενημερώνεται ποτέ και όσοι κόμβοι προώθησαν ήδη το πακέτο δεν αμείβονται. Παρόλα αυτά, η ενημέρωση του ICAS από τον παραλήπτη θεωρείται ως η πιο ασφαλής προσέγγιση, αφού έτσι κακόβουλοι κόμβοι δεν μπορούν να ισχυριστούν για τον εαυτό τους ψευδώς ότι προώθησαν κάποιο πακέτο, ούτε απαιτούνται υπερβολικοί πόροι για την εξακρίβωση του κάθε ισχυρισμού.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που επίσης αντιμετωπίζεται από το ICARUS είναι η συσσώρευση υπερβολικού αριθμού credits σε συνεργαζόμενους κόμβους. Για το λόγο αυτό οι «πλούσιοι» κόμβοι θα χρεώνονται επιπλέον από το ICAS. Όμοια με τις αμοιβές, η επιπλέον χρέωση εξαρτάται από το τετράγωνο του *cp* και η χρέωση προσαρμόζεται ως

$$r_{i,z}^{adj} = \begin{Bmatrix} 1.3 \cdot r_{i,z}, \; m_i^{(k)} > 2.5 \cdot m_o \\ 4.6 \cdot r_{i,z}, \; m_i^{(k)} > 5.7 \cdot m_o \end{Bmatrix} \tag{2.53}$$

2.7.3.3 Εντοπισμός Εγωιστικών Κόμβων

Ο μηχανισμός ICARUS χρησιμοποιεί ένα παρόμοιο μηχανισμό απόρριψης πακέτων με το DARWIN, σύμφωνα με τον οποίο αν ο κόμβος *j* θεωρείται εγωιστής από τον κόμβο *i*, τότε ο τελευταίος απορρίπτει πακέτα με βάση την εκτιμώμενη πιθανότητα απόρριψης $edp_i^{(k)}$ [36][59]. Αν ο *j* δε θεωρείται εγωιστής, τότε ο *i* προωθεί πάντα τα πακέτα του. Ο εντοπισμός των εγωιστικών κόμβων επιτυγχάνεται με τους ακόλουθους τρόπους:

- Το ICAS μεταδίδει περιοδικά μια καθολική λίστα με όλους τους αναγνωρισμένους κακόβουλους κόμβους. Αν ένας κόμβος εντοπίσει κάποιον γείτονά του σε αυτή τη λίστα, τότε τον προσθέτει στην δική του τοπική λίστα.
- Για κάθε κόμβο, αν η εκτιμώμενη πιθανότητα απόρριψης $edp_i^{(k)}$ του γείτονά του ξεπερνάει ένα προκαθορισμένο κατώφλι $edp_i^{(k)}$, τότε τον προσθέτει στην τοπική του λίστα.

Με βάση τα παραπάνω, ο μόνος τρόπος για να αφαιρεθεί ένας κόμβος από μια τοπική λίστα, είναι να ικανοποιεί και τις δύο παραπάνω απαιτήσεις.

2.7.3.4 Απομακρυσμένοι Κόμβοι

Οι περισσότεροι μηχανισμοί κινήτρων πάσχουν από το πρόβλημα της ανισότητας όσον αφορά τους απομακρυσμένους κόμβους, οι οποίοι λόγω της θέσης τους δεν μπορούν να συγκεντρώσουν αρκετά credits ή να βελτιώσουν τη φήμη τους προκειμένου να μπορούν να αποστέλλουν τα δικά τους πακέτα. Ένας δίκαιος μηχανισμός θα έπρεπε να επιτηρεί και ενισχύει αυτούς τους κόμβους. Ο ICARUS ωστόσο δεν ακολουθεί ακριβώς αυτή την προσέγγιση, αφού έτσι οι απομακρυσμένοι κόμβοι θα μπορούσαν δυνητικά να συγκεντρώσουν υπερβολικά πολλά credits χωρίς να προωθήσουν ποτέ κανένα πακέτο.

Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, οι απομακρυσμένοι κόμβοι ενισχύονται από το δίκτυο και εν τέλει τους επιτρέπεται να στέλνουν πακέτα δωρεάν. Αυτό ωστόσο συμβαίνει μόνο στην περίπτωση της ολικής «χρεωκοπίας» τους. Με άλλα λόγια, τους επιτρέπεται να στέλνουν πακέτα δωρεάν, αλλά όχι να «πλουτίσουν» μέσω αυτής της διαδικασίας. Έτσι εξασφαλίζουμε ότι κακόβουλοι κόμβοι δε θα εκμεταλλευτούν τη θέση τους για δικό τους όφελος.

Στο ICARUS η βοήθεια που αναφέραμε παρέχεται από το ICAS. Οι απομακρυσμένοι κόμβοι εντοπίζονται από τον αριθμό των πακέτων που τους έχει ζητηθεί να προωθήσουν στο παρελθόν. Αν ο αριθμός αυτός είναι πολύ μικρός και η φήμη του κόμβου είναι καλή, τότε το ICAS αποφασίζει να τους ενισχύσει. Η ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται αρχικά με ένα μικρό αριθμό από επιπλέον credits, ο οποίος εξαρτάται από μια σταθερή τιμή $m_{e,0}$ και την τιμή cp του κόμβου. Τα επιπλέον credits προσφέρονται περιοδικά μέχρι τα συνολικά credits του κόμβου να φτάσουν το όριο $m_{e,th}$. Θεωρούμε ότι

$$m_{e,th} = m_0 \cdot \left[cp_i^{(k)} \right]^2 \tag{2.54}$$

if (i not selfish && $m_i^{(k)} \le m_{e,th}$ && $S_i^{(k)} \le k \cdot pf_2 \cdot cp_i^{(k)}$ && i not allowed to send packets for free) **then**
  if ($S_i^{(k)} \le k \cdot pf_1 \cdot cp_i^{(k)}$) **then**
    $m_i^{(k)} += 1.5 + m_{e,0} \cdot \left[cp_i^{(k)} \right]^2$;
  end if
  else do
    $m_i^{(k)} += 2 + m_{e,0} \cdot \left[cp_i^{(k)} \right]^2$;
  end else
end if
If (i not selfish && i in State 0 && $S_i^{(k)} \le k \cdot pf_2 \cdot cp_i^{(k)}$ && $m_i^{(k)} < 0$) **then**
  i is allowed to send packets for free;
end if

Εικόνα 2.32. Ψευδοκώδικας για ενίσχυση απομακρυσμένων κόμβων

Η Εικόνα 2.32 περιγράφει με ψευδοκώδικα το πώς ενισχύεται ένας απομακρυσμένος κόμβος i. Με $S_i^{(k)}$ συμβολίζουμε το συνολικό αριθμό πακέτων που έχουν σταλεί στον i για

προώθηση μέχρι τη χρονοθυρίδα *k*. Προφανώς $S_i^{(k)} = \sum_{\forall j \in N_i} S_{ji}^{(k)}$. Ο υποστηρικτικός μηχανισμός του ICARUS ξεχωρίζει δύο κατηγορίες κόμβων: αυτούς που χρειάζονται ενίσχυση για να αποκτήσουν τον απαιτούμενο αριθμό credits και αυτούς που δε διαθέτουν καθόλου credits, οπότε χρειάζονται δωρεάν αποστολή πακέτων. Η διαφοροποίηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω δύο κατωφλίων pf_1 και pf_2.

Η πρώτη κατηγορία κόμβων ικανοποιεί τη συνθήκη $S_i^{(k)} \le k \cdot pf_1 \cdot cp_i^{(k)}$ και λαμβάνει επιπλέον credits μέχρι να εισέλθει στην κατάσταση 1 ή 2. Στην περίπτωση αυτή το ICAS επιτρέπει δωρεάν αποστολή πακέτων. Η δεύτερη κατηγορία απομακρυσμένων κόμβων, για την οποία ισχύει $S_i^{(k)} > k \cdot pf_1 \cdot cp_i^{(k)}$, λαμβάνει περισσότερα credits αλλά δεν της επιτρέπεται να στείλει πακέτα δωρεάν.

2.7.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

2.7.4.1 Σενάριο Προσομοίωσης

Προκειμένου να συγκριθεί η απόδοση του ICARUS σε σχέση με αυτή του DARWIN πραγματοποιήθηκε μια σειρά προσομοιώσεων. Το σενάριο προσομοίωσης περιλαμβάνει 50 κόμβους τυχαία τοποθετημένους σε μια τοπολογία 400x400 m^2, από τους οποίους το 6% είναι εγωιστές. Περίπου 30% των κόμβων θεωρούνται απομακρυσμένοι, ενώ υποθέτουμε ότι κάθε κόμβος μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με όλους τους κόμβους σε ακτίνα 60m (και συνεπώς τους θεωρεί γείτονές του). Η πιθανότητα να χαθεί ένα πακέτο ή ένα ack εξαιτίας των φαινομένων διάδοσης είναι 0.2% και 0.02% αντίστοιχα. Η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης είναι 1000 δευτερόλεπτα. Ο Πίνακας 2.20 συγκεντρώνει τις τιμές όλων των παραμέτρων της προσομοίωσης.

Variable	Value	Description
m_0	220	Number of credits assigned to each node initially
pf_1	1.1	1st threshold used to assist distant nodes
pf_2	4	2nd threshold used to assist distant nodes
$cp_{ICAS,th}$	0.5	Threshold used by ICAS to determine if a node is selfish
S_t	4	Credit threshold to determine node state
IFN	5	Number of packets that must be dropped before a selfish begins cooperating
edp_{th}	0.85	Threshold used by nodes to determine if another node is selfish
$m_{e,0}$	28	Initial amount of credits that are given to distant nodes
h_{max}	15	Maximum number of hops allowed per packet

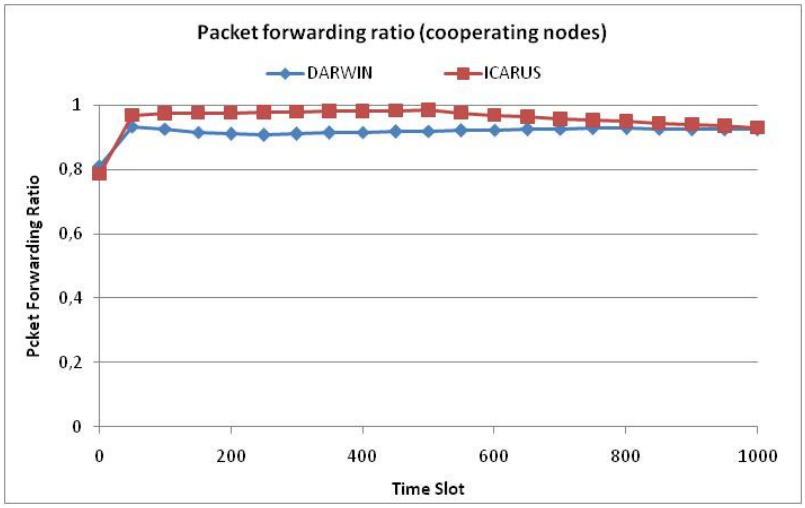
Πίνακας 2.20. Παράμετροι προσομοίωσης

2.7.4.2 Σύγκριση του ICARUS με το DARWIN

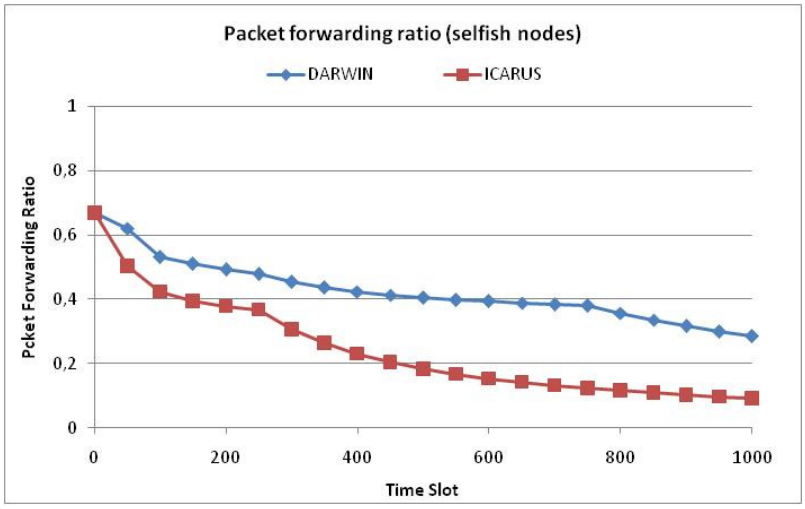
Συγκρίνεται η απόδοση του ICARUS και του DARWIN με βάση την παρακίνηση της συνεργασίας και τον εντοπισμό της εγωιστικότητας. Για το λόγο αυτό καταγράφεται το μέσο

ποσοστό προώθησης για όλους τους κόμβους, που ορίζεται ως ο λόγος του αριθμού των πακέτων που μεταδόθηκαν επιτυχώς ως προς τον αριθμό των πακέτων που αποστάλθηκαν.

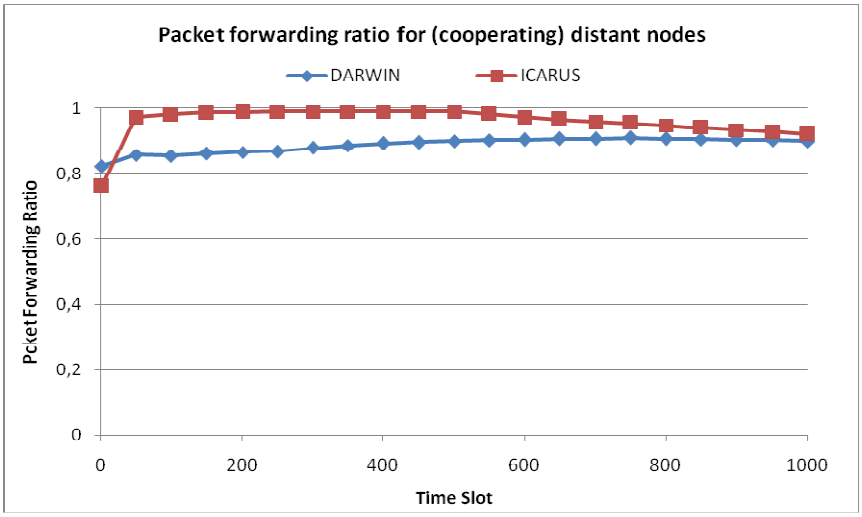
Οι Εικόνες 2.33 και 2.34 απεικονίζουν τα ποσοστά προώθησης πακέτων για συνεργατικούς και εγωιστικούς κόμβους. Σύμφωνα με την Εικόνα 2.33, ο ICARUS αποδίδει ελαφρώς καλύτερα (μέχρι 7%) για τους συνεργατικούς κόμβους, ιδιαίτερα κατά το πρώτο μισό της προσομοίωσης. Η διαφορά με το DARWIN μειώνεται σταδιακά, έως ότου η απόδοση των δύο αλγορίθμων εξισώνεται προς το τέλος της προσομοίωσης. Ωστόσο η διαφορά είναι αρκετά μεγάλη όσον αφορά τους εγωιστικούς κόμβους, όπως φαίνεται από την Εικόνα 2.34. Ο ICARUS τιμωρεί τους εγωιστικούς κόμβους πολύ πιο αυστηρά από το DARWIN, αφού το ποσοστό προώθησής τους μειώνεται από 10 έως 25% κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το γεγονός ότι το μέσο ποσοστό προώθησης των εγωιστικών κόμβων μειώνεται περίπου κατά 42% στο ICARUS αποδεικνύει ότι οι εγωιστές εντοπίζονται πολύ πιο γρήγορα και τιμωρούνται πολύ πιο αποτελεσματικά.



Εικόνα 2.33. Ποσοστό προώθησης πακέτων για συνεργατικούς κόμβους

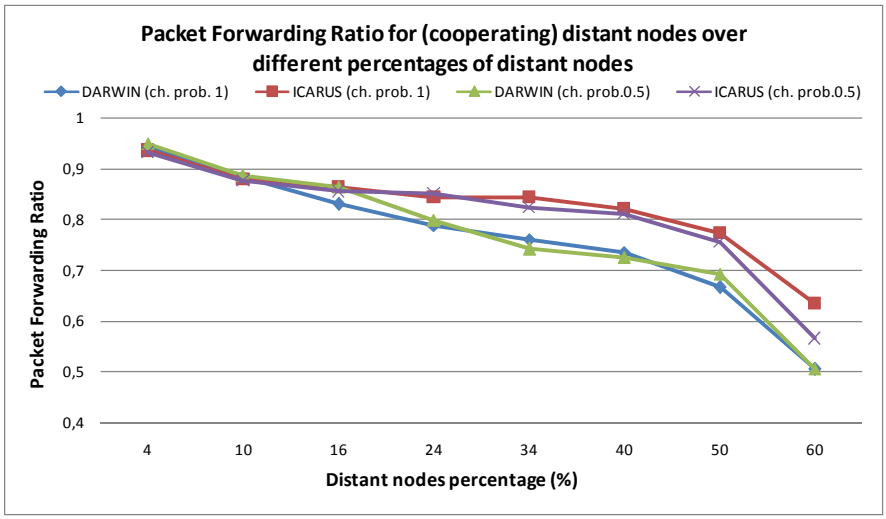


Εικόνα 2.34. Ποσοστό προώθησης πακέτων για εγωιστικούς κόμβους



Εικόνα 2.35. Ποσοστό προώθησης πακέτων για απομακρυσμένους κόμβους

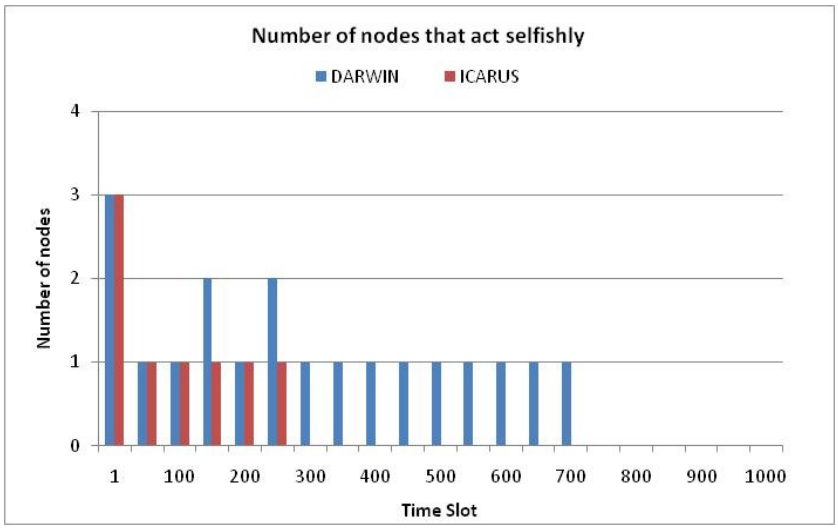
Στη συνέχεια εξετάζουμε την απόδοση του ICARUS για τους απομακρυσμένους κόμβους. Τα αποτελέσματα της Εικόνας 2.35 παράχθηκαν με την υπόθεση ότι 34% των κόμβων είναι απομακρυσμένοι και ότι οι εγωιστικοί κόμβοι πάντα θα απορρίπτουν πακέτα (πιθανότητα εξαπάτησης 1). Και οι δύο μηχανισμοί αποδίδουν ικανοποιητικά, αφού το ποσοστό προώθησης των απομακρυσμένων κόμβων είναι πρακτικά ίσο με αυτό των συνεργατικών, γεγονός που υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει διάκριση. Ο ICARUS αποδίδει ελαφρώς καλύτερα κατά το πρώτο μισό της προσομοίωσης, που επεξηγείται από το ότι βοηθάει αρχικά τους απομακρυσμένους κόμβους αλλά εν τέλει η κίνησή τους επηρεάζεται από τη δράση των εγωιστικών κόμβων, οδηγώντας σε σύγκλιση των δύο μηχανισμών. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι δεν επιτρέπεται στους απομακρυσμένους κόμβους να πλουτίσουν μέσα από τη βοήθεια που τους παρέχεται, ώστε να μην την εκμεταλλεύονται αλλάζοντας συνεχώς θέση.



Εικόνα 2.36. Ποσοστό προώθησης πακέτων για απομακρυσμένους κόμβους με διαφορετικές πιθανότητες εξαπάτησης

Η Εικόνα 2.36 παρέχει συγκριτικά αποτελέσματα για διαφορετικά ποσοστά εγωιστικών κόμβων στην τοπολογία και για δύο διαφορετικές πιθανότητες εξαπάτησης (0.5 και 1). Η απόδοση των ICARUS και DARWIN εξετάζεται για μια ποικιλία ποσοστών απομακρυσμένων κόμβων από 4% ως 60%. Η υπεροχή του ICARUS γίνεται αντιληπτή καθώς το ποσοστό αυξάνει, ιδιαίτερα για ποσοστά >25%. Για ποσοστά μεταξύ 30% και 60% ο ICARUS αποδίδει περίπου 16% και 11% καλύτερα από το DARWIN για πιθανότητες εξαπάτησης 0.5 και 1 αντίστοιχα. Σα συμπέρασμα, ο ICARUS αποδίδει καλύτερα για υψηλές πιθανότητες εξαπάτησης, αφού θεωρείται ένας αυστηρός μηχανισμός, ενώ για μικρές πιθανότητες δεν υπάρχει σημαντική διαφορά με το DARWIN.

Η σύγκριση ολοκληρώνεται με την ικανότητα του προτεινόμενου μηχανισμού να αναγκάζει τους εγωιστές να «μετανοούν». Η Εικόνα 2.37 δείχνει πόσοι κόμβοι δρουν εγωιστικά κάθε στιγμή και για τους δύο μηχανισμούς. Ο αριθμός αυτός μπορεί να είναι μικρότερος ή ίσος από τον αρχικό αριθμό των εγωιστικών κόμβων. Είναι φανερό ότι ο ICARUS αναγκάζει τους εγωιστές να συνεργαστούν πολύ πιο γρήγορα, αφού χρειάζεται μόλις 300 δευτερόλεπτα για να τους αναγκάσει όλους, ενώ το DARWIN χρειάζεται 750 δευτερόλεπτα.

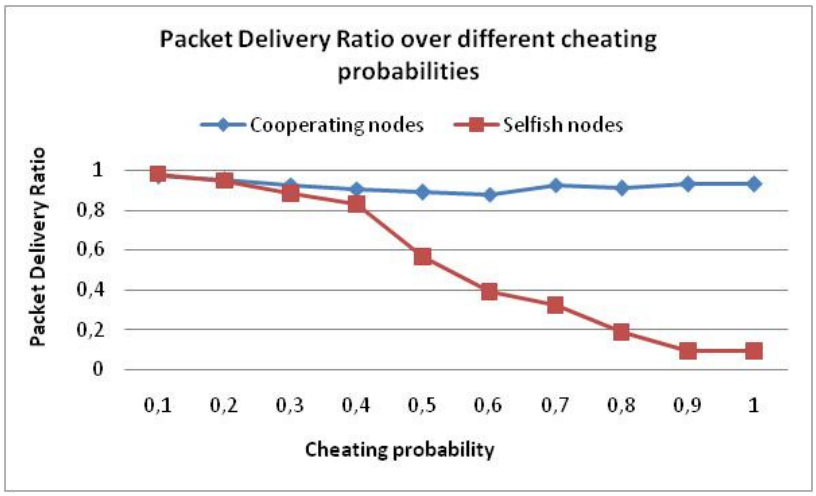


Εικόνα 2.37. Αριθμός κόμβων που δρουν εγωιστικά

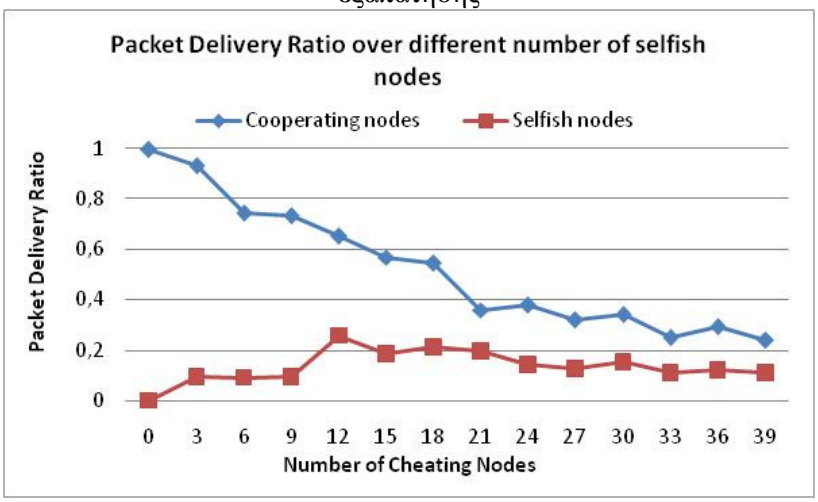
2.7.4.3 Εξέταση της Απόδοσης του ICARUS

Η απόδοση του ICARUS εξετάζεται για μια πληθώρα σεναρίων. Αρχικά τροποποιείται η πιθανότητα εξαπάτησης των εγωιστικών κόμβων, όπου μια τιμή ίση με 1 σημαίνει ότι οι κόμβοι αυτοί θα απορρίπτουν πάντα τα πακέτα. Η Εικόνα 2.38 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα, από τα οποία παρατηρούμε ότι για τους μη εγωιστικούς κόμβους δε σημειώνεται ιδιαίτερη διακύμανση, ενώ για τους εγωιστικούς η απόδοση του ICARUS μειώνεται δραστικά για πιθανότητες εξαπάτησης μικρότερες του 0.6. Στην περίπτωση αυτή ο ICARUS δεν μπορεί να ανιχνεύσει αποτελεσματικά τους εγωιστικούς κόμβους, αφού η

συμπεριφορά τους εναλλάσσεται. Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από το γεγονός ότι ο ICARUS είναι ένας σχετικά «αυστηρός» μηχανισμός.



Εικόνα 2.38. Ποσοστό παράδοσης πακέτων στο ICARUS για διαφορετικές πιθανότητες εξαπάτησης



Εικόνα 2.39. Ποσοστό παράδοσης πακέτων στο ICARUS για διαφορετικό αριθμό εγωιστικών κόμβων

Ο αριθμός των εγωιστικών κόμβων είναι επίσης ζωτικός για την απόδοση οποιουδήποτε μηχανισμού κινήτρων. Παρόλο που μερικοί μηχανισμοί παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, όταν ο αριθμός των εγωιστικών κόμβων αυξάνεται αρκετά τότε αδυνατούν να αποδώσουν αποτελεσματικά.

Η απόδοση του ICARUS εξετάστηκε για μια ποικιλία αριθμών εγωιστικών κόμβων, ξεκινώντας από 0 και φτάνοντας μέχρι 39 (που αντιστοιχεί σε ποσοστό 78% των συνολικών κόμβων!). Σύμφωνα με την Εικόνα 2.39 ο ICARUS παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα μέχρι το ποσοστό 18% (δηλαδή 9 εγωιστικοί κόμβοι). Το ποσοστό προώθησης των συνεργατικών κόμβων διατηρείται πάνω από το 0.5 μέχρι να υπάρξουν 21 εγωιστικοί κόμβοι (ποσοστό 42%).

2.7.5 Συζήτηση για την απόδοση του ICARUS

2.7.5.1 Σύγκριση του ICARUS με Υπάρχοντες Υβριδικούς Μηχανισμούς

Στην παράγραφο αυτή συζητούνται οι παραδοχές και οι κυριότερες διαφορές μεταξύ του ICARUS και των υπαρχόντων μηχανισμών κινήτρων, ARM (Account-based Hierarchical Reputation Management System) [75][76][77] και HEAD (Hybrid Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks) [74].

ARM	**ICARUS**	**Πλεονεκτήματα του ICARUS**
Ως στρατηγική αλληλεπίδρασης των κόμβων χρησιμοποιείται το Tit For Tat (TFT)	Ο ICARUS βασίζεται στο DARWIN, που είναι επέκταση του Contrite Tit For Tat (CTFT).	Η στρατηγική CTFT επιτρέπει στους παίκτες που έκαναν λάθος να επανορθώσουν αντί να τους εκδικείται απευθείας.
Κόμβοι με υψηλότερη φήμη πληρώνουν λιγότερα.	Το ίδιο ισχύει και στο ICARUS, αλλά λαμβάνεται υπόψην και ο αριθμός των credits που έχουν οι κόμβοι	Αν οι κόμβοι συγκεντρώσουν υπερβολικά πολλά credits τότε τα προνόμιά τους μειώνονται.
Το ARM επιλέγει στάσιμους κόμβους για να διαχειρίζονται τη φήμη (Global Reputation Management System - GRMS).	Όλοι οι κόμβοι είναι ίσοι, εκτός αν θεωρούνται εγωιστές. Το ICAS λαμβάνει πληροφορία από όλους τους κόμβους.	Όλες οι κρίσιμες διαδικασίες πραγματοποιούνται από μια έμπιστη οντότητα, το ICAS, αντί από μια ομάδα κόμβων, που μπορεί να αποδειχθεί κακόβουλη.
HEAD	**ICARUS**	**Πλεονεκτήματα του ICARUS**
Το HEAD βασίζεται στο OCEAN, που χρησιμοποιεί Dynamic Source Routing (DSR).	Χρησιμοποιείται τροποποιημένος αλγόριθμος δρομολόγησης	Αποφεύγονται οι εγωιστικοί κόμβοι κατά τη δρομολόγηση πακέτων.
Μετά από μια περίοδο αδράνειας οι εγωιστικοί κόμβοι αφαιρούνται από τη λίστα	Η φήμη αυξάνεται μόνο εάν οι εγωιστικοί κόμβοι αρχίσουν να συνεργάζονται.	Οι εγωιστικοί κόμβοι αναγκάζονται να συνεργαστούν προκειμένου να χρησιμοποιήσουν τους πόρους του συστήματος.
Κάθε κόμβος διατηρεί δύο λίστες: για προβληματικούς και εγωιστικούς κόμβους	Οι κόμβοι μαρκάρονται είτε ως συνεργατικοί είτε ως εγωιστικοί.	
Οι συναλλαγές πραγματοποιούνται μετά από κάθε hop.	Οι συναλλαγές πραγματοποιούνται μαζικά μετά την άφιξη του πακέτου στον προορισμό του.	Μειώνεται το overhead της επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων. Ωστόσο αν το πακέτο δε φτάσει στον προορισμό του, οι συνεργαζόμενοι κόμβοι δεν αμείβονται. Ο ICARUS όμως εκμεταλλεύεται αυτό το γεγονός για να εντοπίσει τους εγωιστές ακόμη πιο γρήγορα!
ARM / HEAD	**ICARUS**	**Πλεονεκτήματα του ICARUS**
Δεν υπάρχει κεντρική οντότητα για να διαχειρίζεται τις συναλλαγές.	Το ICAS διαχειρίζεται όλες τις συναλλαγές, συγκεντρώνει παρατηρήσεις και μοιράζει τα credits.	Το ICAS είναι μια έμπιστη ανεξάρτητη οντότητα. Οι κακόβουλοι κόμβοι δεν μπορούν να ωφεληθούν διαχέοντας ψευδή πληροφορία.
Δεν υπάρχει μέριμνα για απομακρυσμένους κόμβους.	Οι απομακρυσμένοι κόμβοι ενισχύονται.	Το σύστημα είναι πιο δίκαιο.

Πίνακας 2.21. Σύγκριση μεταξύ του ICARUS και των υπαρχόντων υβριδικών μηχανισμών

2.7.5.2 Περιορισμοί του ICARUS

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα του ICARUS σε σύγκριση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις και αποδείχτηκε η αποτελεσματικότητά του σε σχέση με το DARWIN. Ωστόσο το ICARUS παρουσιάζει κάποιους περιορισμούς, οι οποίοι προέρχονται από το γεγονός ότι προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η δικαιοσύνη πρέπει να διατηρείται και ανταλλάσσεται περισσότερη πληροφορία. Οι κυριότεροι περιορισμοί του ICARUS είναι:

- Overhead μηνυμάτων: η ανταλλαγή πληροφορίας φήμης μεταξύ κόμβων και ICAS αυξάνει την κίνηση του δικτύου.
- Τοπική μνήμη: κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί στατιστικά και τιμές φήμης για όλους τους γείτονές του.
- Πίνακες δρομολόγησης: κάθε κόμβος πρέπει να διατηρεί πίνακες δρομολόγησης που υποδεικνύουν το επόμενο hop για κάθε μη γειτονικό κόμβο του δικτύου.
- Overhead λόγω ICAS: το δίκτυο επιβαρύνεται με επιπλέον κίνηση καθώς οι κόμβοι πρέπει α) να ενημερώνουν το ICAS μετά από κάθε λήψη πακέτου β) να ζητάνε εξουσιοδότηση από το ICAS για να στείλουν πακέτα.
- Ο ICARUS βασίζεται στην παραδοχή ότι οι κόμβοι πάντα θα προωθούν τα πακέτα ack.

Οι παραπάνω περιορισμοί αντισταθμίζονται μέχρις ενός βαθμού ρυθμίζοντας κατάλληλα τα χαρακτηριστικά του συστήματος, ώστε η ανταλλαγή πληροφορίας να πραγματοποιείται όσο το δυνατόν πιο αραιά, διατηρώντας παράλληλα ικανοποιητική απόδοση με το ελάχιστο overhead. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί, η ανταλλαγή πληροφορίας (για φήμη κόμβων, δρομολόγηση, κτλ) πραγματοποιείται περιοδικά. Η περίοδος πρέπει να προσαρμόζεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως πυκνότητα κόμβων, αριθμός κόμβων, μέσος αριθμός εγωιστικών κόμβων, κτλ, προκειμένου το σύστημα ναι μεν να μπορεί να αντιδρά εγκαίρως αλλά χωρίς υπερβολικό overhead.

Το μεγαλύτερο overhead προκαλείται από τη χρήση του ICAS, το οποίο ωστόσο αποτελεί και ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του ICARUS. Το κατά πόσο η βελτίωση της απόδοσης δικαιολογεί την επιπλέον κίνηση εξαρτάται από την αρχιτεκτονική και τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

[1] Robert Gibbons, "Εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων, εκδόσεις Gutenberg, 2009.

[2] Stackelberg H., "Marktform und Gleichgewicht" Βιέννη : Julius Springer.

[3] Von Neumann J., "Zur Theorie der Gesellschaftesspiele", Mathematische Annalen, v.100, 1928, pp. 295-320.

[4] Von Neumann J., Morgenstern O., "Theory of Games and Economic Behavior", Princeton University Press, 1944 (second edition, 1947. Third edition 1953).

[5] Harsanyi, J.1973, "Games with Randomly Disturbed Payoffs : A New Rationale for Mixed Strategy Equilibrium Points", International Journal of Game Theory 2 : 1-23.

[6] R. B. Myerson, Game Theory, "Analysis of Conflict", Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, Sep. 1991.

[7] Saad W., Zhu Han, Debbah M., Hjorungnes A., Basar T., "Coalitional game theory for communication networks", IEEE Signal Processing Magazine, Issue 5, pp. 77-97, September 2009.

[8] G. Owen, "Game Theory", 3rd edition. London, UK: Academic Press, Oct. 1995.

[9] R. Trestian, O. Ormond and G-M. Muntean, "Game Theory-based Network Selection: Solutions and Challenges", IEEE Communication Survey and Tutorials, accepted 2012.

[10] K. Fahimullah and S. Hassan, "Game-Theory based Wireless Access Point Selection scheme," in IEEEP SilverJubilee International Multi-topic Symposium (SIMTS), 2010.

[11] F. Fu and M. van der Schaar, "Noncollaborative Resource Management for Wireless Multimedia Applications Using Mechanism Design," IEEE Transactions on Multimedia, vol. 9, no. 4, pp. 851-868, 2007.

[12] S. Frattasi and H. Fathi and F.H.P. Fitzek, "4G: A User-Centric System ", 2006. Kluwer - Wireless Personal Communications Journal (WPC) - Special Issue on Advances in Wireless Communications: Enabling Technologies for 4G.

[13] Josephine Antoniou, Ioannis Z. Koukoutsidis, Eva Jaho, Andreas Pitsillides, Ioannis Stavrakakis, "Access network synthesis game in next generation networks", Elsevier Computer Networks, Vol. 53, Issue 15, pp. 2716-2726, 2009.

[14] M. A. Khan et al., "Game-Theory Based User Centric Network Selection with Media Independent Handover Services and Flow Management," in Eighth Annual Research Conference on Communication Networks and Services (CNSR), 2010.

[15] D. Niyato and E. Hossain, "A Noncooperative Game-Theoretic Framework for Radio Resource Management in 4G Heterogeneous Wireless Access Networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, no. 3, 2008.

[16] D. Goodman and M. Mandayam, "Power control for wireless data," in IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications, 1999, pp. 55–63.

[17] J.E. Suris, L.A. DaSilva, Z. Han, A.B. MacKenzie, "Cooperative Game Theory for Distributed Spectrum Sharing", IEEE International Conference on Communications, 2007.

[18] Allen B. MacKenzie, Stephen B. Wicker, "Game Theory in Communications: Motivation, Explanation and Application to Power Control", IEEE Global Telecommunications Conference, 2001.

[19] S. Gunturi, F. Paganini, T. Instruments, I. Bangalore, "Game theoretic approach to power control in cellular CDMA", Vehicular Technology Conference, 2003.

[20] Zhu Han, Zhu Ji, and K. J. Ray Liu, "Non-Cooperative Resource Competition Game by Virtual Referee in Multi-Cell OFDMA Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Volume 25, Issue 6, pp: 1079 – 1090, August 2007.

[21] Lan Wang, Yisheng Xue, Egon Schulz, "Resource allocation in multi-cell OFDM systems based on non-cooperative game", The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006.

[22] Dusit Niyato, Ekram Hossain, "Competitive Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Dynamic Game Approach", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 7, Issue 7, July 2008.

[23] Zhu Ji and K. J. Ray Liu, "Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview", IEEE Communications Magazine, vol. 45, no. 5, pp. 88–94, May 2007.

[24] A. Leshem and E. Zehavi, "Cooperative game theory and the Gaussian interference channel," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 26, pp. 1078–1088, September 2008.

[25] Dusit Niyato, Ekram Hossain, "Competitive Pricing for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: Dynamic Game, Inefficiency of Nash Equilibrium, and Collusion", IEEE Journal on Selected Areas of Communications, Vol. 26, no. 1, January 2008.

[26] Mehdi Bennis, Juan Lara, "Non-Cooperative Operators in a Game-Theoretic Framework", IEEE 19th International Symposium on Personal Indor Mobile Radio Communications (PIMRC), September 2008.

[27] C. Liang, K. R. Dandekar, "Power management in MIMO ad hoc networks: a game-theoretic approach", IEEE Trans.actions on Wireless Communications, Vol. 6 (4), pp. 2839-2848, April 2007.

[28] Gesualdo Scutari, Daniel P. Palomar, Sergio Barbarossa, "Competitive Design of Multiuser MIMO Systems Based on Game Theory: A Unified View", IEEE Journal on Selected Areas In Communications, Vol. 26 (7), pp. 1089-1103, September 2008.

[29] Yingda Chen, Shalinee Kishore, "A game-theoretic analysis of decode-and-forward user cooperation", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, (5), pp. 1941–1951, 2008.

[30] Allen B. MacKenzie, Luiz A. DaSilva, "Game Theory for Wireless Communications", Morgan and Claypool Publishers, 2006.

[31] Allen B. MacKenzie and Stephen B. Wicker, "Game Theory and the Design of Self-Configuring, Adaptive Wireless Networks", IEEE Communications Magazine, November 2001, pp. 126-131.

[32] Simeone O., Bar-Ness Y., "A Game-Theoretic View on the Interference Channel with Random Access", 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007.

[33] Fotini-Niovi Pavlidou, Georgios Koltsidas, "Game Theory for Routing Modeling in Communication Networks - A Survey", Journal of Communications and Networks, Vol. 10 (3), pp. 268-286, September 2008.

[34] V. Srivastava, J. A. Neel, A. B. MacKenzie, J. E. Hicks, L. A. DaSilva, J. H. Reed, and R. P. Gilles, "Using Game Theory to Analyze Wireless Ad Hoc Networks," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 7, no. 5, Fourth Quarter 2005.

[35] Luiz A. DaSilva and Vivek Srivastava, "Node Participation in Ad Hoc and Peer-to-Peer Networks: A Game-Theoretic Formulation" in Workshop on Games and Emergent Behavior in Distributed Computing Environments, Birmingham, U K, September 2004.

[36] Juan Jos Jaramillo, R. Srikant, "DARWIN: distributed and adaptive reputation mechanism for wireless ad-hoc networks", 13th ACM international conference on Mobile computing and networking, 2007.

[37] Lin Gao, Youyun Xu, Xinbing Wang, and Athanasios V. Vasilakos, "A Game Approach for Cell Selection and Resource Allocation in Heterogeneous Wireless Networks", IEEE/ACM Transactions on Networking (accepted, revisions) .

[38] Ηλίας Ζ. Τράγος, «Υβριδική αρχιτεκτονική διαχείρισης ασύρματων πόρων σε ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών 4ης γενιάς με έμφαση στην διαχείριση κινητικότητας για την διασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών», Διδακτορική Διατριβή, Ιούλιος 2008.

[39] M. Ahmed, "Call admission control in wireless networks: a comprehensive survey", IEEE communications surveys and tutorials, Vol. 7, Issue 1, pp. 51-69, 2005.

[40] Z. Liu, M. Zarki, "SIR-based Call Admission Control for DS-CDMA Cellular Systems", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 12, Issue 4, pp. 638–44, 1994.

[41] M. Kim, B. Shin, D. Lee, "SIR-Based call admission control by intercell interference prediction for DS-CDMA systems", IEEE communications letters, Vol. 4, Issue 1, pp. 29-31, 2000.

[42] S. Singh, V. Krisnamurthy, H. Poor, "Integrated voice / data call admission control for wireless DS-CDMA systems", IEEE transactions on signal processing, Vol. 50, Issue 6, pp. 1483-95. 2002.

[43] G. Razzano, A. Curcio, "Performance Comparison of Three Call Admission Control Algorithms in a Wireless Ad Hoc Network", Proceeding of International Conference Communications Technology 2, pp. 1332–36, 2003.

[44] Y. Dong, D. Makrakis, T. Sullivan, "Effective Admission Control in Multihop Mobile Ad Hoc Networks", Proceeding of International Conference Communications Technology 2, pp. 1291–94. 2003.

[45] D.Gu, J. Zhang, "A New Measurement-Based Admission Control Method for IEEE802.11 Wireless Local Area Networks", 14th IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2003.

[46] S. AlQahtani, A. Mahmoud, "Performance analysis of two throughput-based call admission control schemes for 3G WCDMA wireless networks supporting multiservices", Computer Communications, Vol. 31, Issue 1, pp. 49-57, 2008.

[47] L. Jing, F. Chen, Y. Dacheng, Jian, "UMTS soft handover algorithm with adaptive thresholds for load balancing", IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, Vol. 4, pp. 2508–12, 2005.

[48] Z. Meng, C. Tao, H. Jiancun, "Throughput-based and power-based load control", International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing 2, pp. 969–73, 2005.

[49] Dimitris Charilas, Ourania Markaki, Elias Tragos, "A Theoretical Scheme for applying game theory and network selection mechanisms in access admission control", International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC) 2008, May 2008, Santorini, Greece.

[50] Dimitris E. Charilas, Ourania I. Markaki, Panagiotis Vlacheas, "Admission Control as a Non-cooperative Multi-Stage Game between Wireless Networks", 16th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP'09), June 2009, Chalkida, Greece.

[51] Antoniou Josephina, Pitsillides Andreas, "4G Converged Environment: Modeling Network Selection as a Game", 16th IST Mobile and Wireless Communications Summit, 2007.

[52] Ourania Markaki, Dimitris Charilas, Dimitris Nikitopoulos, "Enhancing Quality of Experience in Next Generation Networks through Network Selection Mechanisms", Mobile Terminal Assisted Enhanced Services Provisioning in a B3G Environment Workshop, PIMRC, September 2007.

[53] Dimitris Charilas, Ourania Markaki, Dimitris Nikitopoulos and Michael Theologou, "Packet-Switched Network Selection with the Highest QoS in 4G Networks", Elsevier Computer Networks, Volume 52, Issue 1, 18 January 2008, Pages 248-258.

[54] Pohjola O. 2003. Game analysis: Roaming agreements. Nokia Research Center.

[55] Hou J., Yang J., and Papavassiliou S., "Integration of Pricing with Call Admission Control to Meet QoS Requirements in Cellular Networks", IEEE Transactions on parallel and distributed systems 13(9): 898-910, 2002.

[56] Das S., Lin H., and Chatterjee M., "An Econometric Model for Resource Management in Competitive Wireless Data Networks", IEEE Network 18(6) 20-26, 2004.

[57] Maille P. and Tuffin B., "Price War in Heterogeneous Wireless Networks", COST IS0605 (Econ@tel) meeting, 2009.

[58] H. Lin et al.,:ARC: An Integrated Admission and Rate Control Framework for Competitive Wireless CDMA Data Networks Using Noncooperative Games", IEEE Trans. Mobile Comp., vol. 4, no. 3, May–June 2005, pp. 243–58.

[59] F. Milan, J. J. Jaramillo, R. Srikant, "Achieving cooperation in multihop wireless networks of selfish nodes", Workshop on Game Theory for Networks (GameNets 2006), 2006.

[60] Sorav Bansal, Mary Baker, "Observation-based Cooperation Enforcement in Ad hoc Networks", Stanford Technical Report, 2003.

[61] Jinshan Liu, Valerie Issarny , "Enhanced Reputation Mechanism for Mobile Ad Hoc Networks", Second International Conference, 2004.

[62] P. Michiardi, R. Molva, "Core: A cooperative reputation mechanism to enforce node cooperation in mobile ad hoc networks," , Communications and Multimedia Security Conference (CMS), 2002.

[63] Animesh Kr Trivedi, Rajan Arora, Rishi Kapoor, Sudip Sanyal, Sugata Sanyal, "A Semi-distributed Reputation-based Intrusion Detection System for Mobile Adhoc Networks", Journal of Information Assurance and Security 1 , 2006.

[64] S. Buchegger , J.-Y. L. Boudec, "Performance analysis of the CONFIDANT protocol: Cooperation of nodes - fairness in dynamic ad-hoc networks", IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC), 2002.

[65] Qi He, Dapeng Wu, Pradeep Khosla , "A Secure Incentive Architecture for Ad-hoc Networks", Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 6, no. 3, pp. 333–346, 2006.

[66] Animesh Kr Trivedi, Rishi Kapoor, Rajan Arora, Sudip Sanyal, Sugata Sanyal, "RISM - Reputation Based Intrusion Detection System for Mobile Adhoc Networks", CODEC'06, 2006.

[67] Elgan Huang, Jon Crowcroft, Ian Wassell, "Rethinking Incentives for Mobile Ad Hoc Networks", Proceedings of the ACM SIGCOMM workshop on Practice and theory of incentives in networked systems, 2004.

[68] S. Zhong, J. Chen, Y. R. Yang, "Sprite: A Simple, Cheat-Proof, Credit-Based Systemfor Mobile Ad-Hoc Networks", INFOCOM ,2003.

[69] Dimitris E. Charilas, Stavroula G. Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Cooperation Incentives in 4G Networks", published in "Game Theory for Wireless Communications and Networking", CRC Press, pp. 295-314, June 2011.

[70] Shastry N., Adve R.S., "Stimulating Cooperative Diversity in Wireless Ad Hoc Networks through Pricing", IEEE International Conference on Communications, 2006.

[71] L. Buttyan , J. P. Hubaux, "Enforcing service availability in mobile ad-hoc WANs,", IEEE/ACM Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHOC), 2000.

[72] M. Jakobsson, J. P. Hubaux, L. Buttyan, "A micropayment scheme encouraging collaboration in multi-hop cellular networks,", Proceedings of Financial Crypto 2003, 2003.

[73] L. Buttyan , J. P. Hubaux, "Stimulating Cooperation in self-organizing mobile ad hoc networks," , ACM/Kluwer MONET, vol. 8, pp. 579 - 592, October 2003.

[74] Guo Jianl, Liu Hongwei, Dong Jian, Yang Xiaozong, "HEAD: A Hybrid Mechanism to Enforce Node Cooperation in Mobile Ad Hoc Networks", Tsinghua Science and Technology, pp. 202-207,Volume 12, 2007.

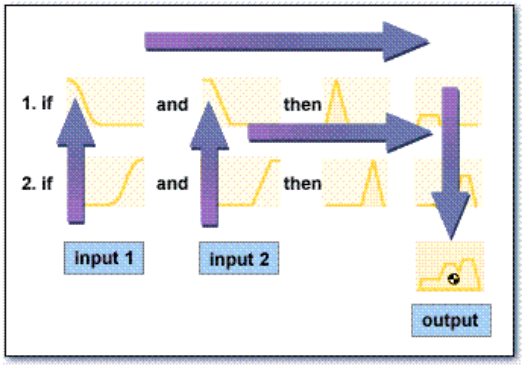
[75] Ze Li, Haiying Shen, "Analysis of a Hybrid Reputation Management System for Mobile Ad hoc Networks", Proceedings of 18th International Conference on Computer Communications and Networks, 2009.

[76] H. Shen and Z. Li, "Arm: An account-based hierarchical reputation management system for wireless ad hoc networks", in in Proceedings of WISP 2008.

[77] Z. Li and H. Shen, "Analysis the cooperation strategies in mobile ad hoc networks", Proceedings of WSNS 2008.

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ:

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΣΑΦΟΥΣ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΟΥ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.1: ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ

3.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η Λογική της Ασάφειας, ως επιστήμη και ως μέθοδος προσεγγίζει με αληθοφάνεια τις συνθήκες του πραγματικού κόσμου. Μπορεί να ερμηνεύσει και συνεχείς, μη γραμμικές ή κατηγοριοποιημένες ιδιότητες δεδομένων, καθώς και δεδομένα με διαφορετικές κλίμακες μέτρησης όπως ποιοτική και ποσοτική.

Στις αρχές του 20ου αιώνα ο B. Russel, έθεσε τα θεμέλια της αόριστης - ασαφούς σήμερα λογικής. Στη συνέχεια ο Heisenberg ανακάλυψε στην κβαντική φυσική την αρχή της αβεβαιότητας, σύμφωνα με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε κάποια πράγματα με πολύ μεγάλη ακρίβεια, αλλά δεν μπορούμε να μετρήσουμε ταυτόχρονα κάποια άλλα πράγματα με την ίδια ακρίβεια. Η αρχή αυτή δηλώνει ότι στην πραγματικότητα ασχολούμαστε με τη λογική τριών τιμών: οι προτάσεις είναι αληθείς, ψευδείς ή ακαθόριστες, Ο Πολωνός Lukasiewitz τεμάχισε το ακαθόριστο σε πολλαπλά κομμάτια, εισάγοντας την πολύτιμη ή πλειότιμη λογική και στη συνέχεια όρισε στην ακαθοριστία ένα συνεχές σύνολο.

Η ασαφής λογική επινοήθηκε από τον L. Zadeh, στα μέσα της δεκαετίας του 1960. Σύμφωνα με τον Zadeh, η ασαφής λογική παρέχει μια μέθοδο εξήγησης και ταυτόχρονα μείωσης της πολυπλοκότητας των ασαφών συστημάτων. Κατά τον Zadeh, μεγάλο μέρος της πολυπλοκότητας των ασαφών συστημάτων προέρχονταν από τον τρόπο που αναπαρίστανται και χρησιμοποιούνται οι μεταβλητές, καθώς μπορούσαν να αναπαραστήσουν την κατάσταση ενός φαινομένου, είτε ως υπάρχουσα, είτε ως μη υπάρχουσα, με αποτέλεσμα οι μαθηματικοί υπολογισμοί για την εκτίμηση πράξεων σε οριακές καταστάσεις να γίνονται ιδιαίτερα πολύπλοκοι. Την παραπάνω διαπίστωση τη δήλωσε με την αρχή της ασυμβατότητας: «...καθώς η πολυπλοκότητα ενός συστήματος αυξάνεται, η ικανότητα για ακριβείς και ταυτόχρονα σημαντικές δηλώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά του μειώνεται, μέχρι ένα σημείο πέρα από το οποίο η ακρίβεια και η σημαντικότητα αποτελούν σχεδόν αμοιβαία αποκλειόμενα χαρακτηριστικά..»

Κάτω από αυτό το πρίσμα μοντελοποίησης συστημάτων, οι βασικοί μηχανισμοί αναπαρίστανται με γλωσσικές και όχι μαθηματικές μεταβλητές. Σύμφωνα με τον Zadeh, οι άνθρωποι επικοινωνούν χρησιμοποιώντας ασαφείς όρους και όχι σύμβολα ή αριθμούς. Οι ασαφείς αυτοί όροι αναπαριστούν γενικές κατηγορίες και όχι καθορισμένα εκ των προτέρων σύνολα. Η μετάβαση από μια κατηγορία – έννοια, ιδέα ή κατάσταση προβλήματος – στην επόμενη είναι σταδιακή, με κάποιες καταστάσεις να έχουν μεγαλύτερη ή μικρότερη συμμετοχή σε ένα σύνολο από ότι σε κάποιο άλλο. Χρησιμοποιώντας αυτή την έννοια των

ελάχιστων συνόλων και επηρεαζόμενος από τα έργα των Black και Lukaiseiwicz, πρότεινε την ιδέα των ασαφών συνόλων, εισάγοντας έτσι και την ασαφή λογική.

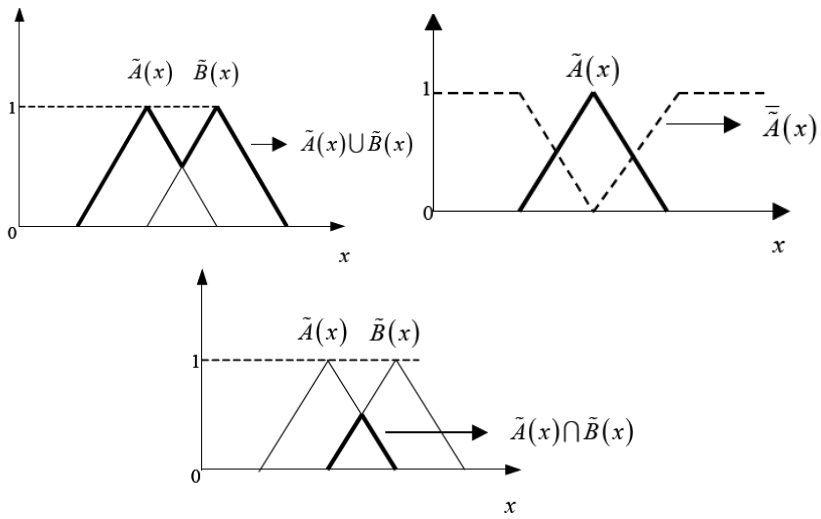
3.1.2 Πλεονεκτήματα από τη Χρήση της Ασαφούς Λογικής

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της χρήσης ασαφών μοντέλων σε συστήματα στήριξης αποφάσεων και έμπειρα συστήματα είναι τα ακόλουθα [1]:

- Ικανότητα μοντελοποίησης ιδιαίτερα πολύπλοκων επιχειρηματικών προβλημάτων. Καθώς τα ασαφή συστήματα προσφέρουν γενικευμένες προσεγγίσεις και είναι κατάλληλα για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων προβλημάτων, έχουν την ικανότητα να προσεγγίζουν τη συμπεριφορά συστημάτων που διαθέτουν έναν αριθμό ελάχιστα γνωστών χαρακτηριστικών. Η ικανότητά τους να επεξηγούν τη συλλογιστική τους, προσφέρει έναν ιδανικό τρόπο αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων.
- Βελτιωμένη γνωστική μοντελοποίηση έμπειρων συστημάτων. Τα ασαφή συστήματα παρέχουν τη δυνατότητα άμεσης κωδικοποίησης της γνώσης με τρόπο παρόμοιο με εκείνο που αντιμετωπίζεται η διαδικασία απόφασης.
- Ικανότητα μοντελοποίησης συστημάτων που εμπλέκουν πολλούς ειδικούς. Τα ασαφή συστήματα είναι κατάλληλα να αναπαραστήσουν πολλούς συνεργαζόμενους ακόμη και διαφωνούντες ειδικούς.
- Μειωμένη πολυπλοκότητα μοντέλου. Καθώς τα ασαφή συστήματα απαιτούν λιγότερους κανόνες από τα παραδοσιακά συστήματα και αυτοί οι κανόνες βρίσκονται πιο κοντά στον τρόπο που εκφράζουμε τη γνώση στη φυσική γλώσσα, αφενός μπορούν να τροποποιηθούν με λιγότερα παραγόμενα λάθη και αφετέρου τα λογικά ή δομικά προβλήματα μπορούν να εντοπιστούν και να επιλυθούν σε μικρό χρονικό διάστημα.
- Βελτιωμένος χειρισμός αβεβαιότητας και πιθανοτήτων. Η ασαφής λογική προσφέρει μια καλύτερη, πιο συνεπή και μαθηματικά ορθότερη μέθοδο χειρισμού της αβεβαιότητας, παρόλο που αναπαριστά την αβεβαιότητα και την ανακρίβεια ως ένα ενδογενές κομμάτι του μοντέλου, καθώς και οι δυο αυτές εναλλακτικές προσεγγίσεις βασίζονται στην ανάθεση τιμών αβεβαιότητας έξω από το μοντέλο καθ' αυτό.

3.1.3 Ασαφή Σύνολα

Ο παραδοσιακός ορισμός των συνόλων βασίζεται στο νόμο της διχοτομίας, ένα σημείο ανήκει ή δεν ανήκει σε ένα σύνολο, δηλαδή είναι εκτός συνόλου. Τα ασαφή σύνολα «σπάνε» σε κάποιο βαθμό το νόμο της διχοτομίας. Στοιχεία ανήκουν μερικώς σε κάποιο ασαφές σύνολο, ή μπορούν να ανήκουν σε περισσότερα του ενός συνόλου.



Εικόνα 3.1. α) Ένωση δυο ασαφών συνόλων β) Συμπλήρωμα ασαφούς συνόλου γ) Τομή δυο ασαφών συνόλων

Ένα ασαφές σύνολο *F*, υποσύνολο του συνόλου *S* ορίζεται ως η αντιστοίχηση των στοιχείων του *S* στα στοιχεία του συνεχούς κλειστού συνόλου [0,1], με ακριβώς ένα διατεταγμένο ζευγάρι για κάθε στοιχείο του *S*. Συμβολικά, $\mu_F : S \rightarrow [0,1]$. Η τιμή 0 σημαίνει πως το συγκεκριμένο στοιχείο δε συμπεριλαμβάνεται στο σύνολο, η τιμή 1 σημαίνει πως το στοιχείο είναι απολύτως αντιπροσωπευτικό του συνόλου, ενώ ενδιάμεσες τιμές αναπαριστούν ποικίλους βαθμούς συμμετοχής. Το σύνολο *S* αναφέρεται και ως «πεδίο αναφοράς» του ασαφούς συνόλου *F*, ενώ συχνά η αντιστοίχηση θεωρείται μια συνάρτηση που ονομάζεται *συνάρτηση συμμετοχής* του *F*. Ο βαθμός στον οποίο η δήλωση "το *x* ανήκει στο *F*" είναι αληθής, καθορίζεται από το διατεταγμένο ζευγάρι, το πρώτο στοιχείο του οποίου είναι το *x*. Ο βαθμός αλήθειας της δήλωσης είναι το δεύτερο στοιχείο του ζευγαριού. Στην πράξη, οι όροι συνάρτηση συμμετοχής και ασαφές σύνολο χρησιμοποιούνται εναλλακτικά. Τυπικά παραδείγματα τομής, ένωσης και συμπληρώματος ασαφών συνόλων βασισμένα στις πράξεις της τυπικής τομής, της τυπικής ένωσης και του τυπικού συμπληρώματος παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν.

Η τομή ασαφών συνόλων μοντελοποιείται με συναρτήσεις που λέγονται τριγωνικές νόρμες (triangular norms ή t-norms). Η ένωση ασαφών συνόλων καθορίζεται με συναρτήσεις που ονομάζονται σ-νόρμες ή τ-συνόρμες (s-norms ή t-conorms). Οι τ- νόρμες και οι σ-νόρμες έχουν εκτεταμένα ερευνηθεί από τους Schweizer και Sklar [2][3].

3.1.4 Ασαφείς Αριθμοί

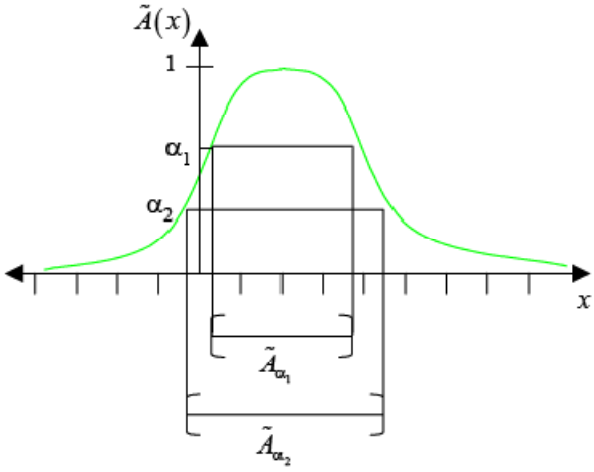
Ασαφής αριθμός είναι ένα κυρτό, ασαφές σύνολο, κανονικοποιημένο στο διάστημα [0,1] του συνόλου των πραγματικών αριθμών. Υπάρχει ένα μόνο στοιχείο με βαθμό συμμετοχής 1. Η συνάρτηση του ασαφούς αυτού συνόλου είναι συμμετοχής και μπορεί να λάβει οποιαδήποτε

μορφή. Με της έννοια closure of supp(Ã) εννοείται το σύνολο supp(Ã) και το σύνορο του. Η α-τομή ενός ασαφούς συνόλου Ã είναι το κλασικό σύνολο

$$\tilde{A}_\alpha = \begin{Bmatrix} \{x \in \mathbb{R} | \tilde{A}\,(x) \geq a\}, if\ a \in (0,1] \\ closure\ of\ supp(\tilde{A}\,), if\ a = 0 \end{Bmatrix} \tag{3.1}$$

Ένα ασαφές σύνολο Ã που ορίζεται στη γραμμή των πραγματικών αριθμών $\mathbb{R}$ και το οποίο έχει συνάρτηση συμμετοχής $\tilde{A}(x) : \mathbb{R} \to [0,1]$, είναι ένας ασαφής αριθμός αν και μόνο αν

1. Ã είναι κανονικό, δηλαδή $\sup_x \tilde{A}(x) = 1$
2. Ã είναι κυρτό, δηλαδή $\forall x, y \in \mathbb{R}^n$ και $\lambda \in [0,1]$ ισχύει Ã= $(\lambda x + (1-\lambda)y \geq \min\{\tilde{A}(x), \tilde{A}(y)\}$
3. Κάθε α-τομή του Ã είναι ένα κλειστό διάστημα $\forall \alpha \in (0,1]$
4. Η υποστήριξη του Ã, $\sup p(\tilde{A}) = \left\{ x \in \mathbb{R} \mid \tilde{A}(x) > 0 \right\}$ είναι ένα φραγμένο σύνολο.



5.

Εικόνα 3.2. Οι α-τομές ενός κυρτού, κανονικού ασαφούς συνόλου

Υπάρχουν κάποιες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής οι οποίες εφαρμόζονται με μεγάλη συχνότητα στις διάφορες εφαρμογές και αποτελούν κατά κάποιο τρόπο τις πρώτες επιλογές των ερευνητών στην απεικόνιση φυσικών προβλημάτων, όπως οι τριγωνικές, οι γκαουσιανές και οι τραπεζοειδείς. Για έναν φυσικό αριθμό k>0 και δύο τριγωνικούς ασαφείς αριθμούς $\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3)$, $\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$, ορίζονται οι παρακάτω πράξεις:

$$\tilde{A} + \tilde{B} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3)$$
$$\tilde{A} - \tilde{B} = (a_1 - b_1, a_2 - b_2, a_3 - b_3)$$

$$\widetilde{A} \cdot \widetilde{B} = (a_1 \cdot b_1, a_2 \cdot b_2, a_3 \cdot b_3)$$
$$\widetilde{A} \div \widetilde{B} = (a_1 / b_3, a_2 / b_2, a_3 / b_1), a_1 \geq 0, b_1 > 0$$
$$\forall k > 0, k \in \mathbb{R} : k \cdot (a_1, a_2, a_3) = (k \cdot a_1, k \cdot a_2, k \cdot a_3)$$

3.1.5 Ασαφής Λογική

Η λογική είναι ο κλάδος των μαθηματικών που μελετά τις μεθόδους συλλογισμού σε όλες τις μορφές τους. Η κλασική προτασιακή λογική ερευνά τις λογικές προτάσεις που είναι είτε αληθείς είτε ψευδείς. Λογική πρόταση είναι κάθε έκφραση που έχει πλήρες και αυτοτελές νόημα και που μπορεί να χαρακτηριστεί, κατά ένα μόνο τρόπο, ως αληθής ή ως ψευδής. Για παράδειγμα η πρόταση «Η Αθήνα είναι πρωτεύουσα της Ελλάδας» είναι αληθής και η πρόταση «Ο αριθμός 3 διαιρεί τον αριθμό 10» είναι ψευδής, ενώ η έκφραση «Ο αριθμός 5 είναι περιττός» δεν έχει νόημα και δεν αποτελεί λογική πρόταση.

Από ένα σύνολο αρχικών προτάσεων μπορούμε να ορίσουμε «πράξεις» με τις οποίες σχηματίζονται νέες προτάσεις, ξεκινώντας από τις αρχικές. Μια τέτοια πράξη ουσιαστικά συνίσταται στην αντιστοίχηση, σε μια δοσμένη αρχική πρόταση ή σ' ένα ζεύγος αρχικών προτάσεων, μιας νέας πρότασης. Οι πράξεις αυτές ονομάζονται λογικές πράξεις. Ορίζουμε 5 βασικές λογικές πράξεις με τη βοήθεια 5 συμβόλων που ονομάζονται λογικοί σύνδεσμοι [4]:

- Άρνηση που διαβάζεται «όχι» και συμβολίζεται με $\neg p$,
- Διάζευξη που διαβάζεται «ή» και συμβολίζεται με $p \vee q$,
- Σύζευξη που διαβάζεται «και» και συμβολίζεται με $p \wedge q$,
- Συνεπαγωγή που διαβάζεται «συνεπάγεται» και συμβολίζεται με $p \Rightarrow q$,
- Ισοδυναμία που διαβάζεται «ισοδυναμεί» και συμβολίζεται με $p \Leftrightarrow q$,

όπου p και q αρχικές προτάσεις.

Σε μια συνεπαγωγή $p \Rightarrow q$ η πρώτη πρόταση p ονομάζεται υπόθεση (χωρίς αυτό να σημαίνει ότι είναι πάντοτε αληθής) και η δεύτερη πρόταση q ονομάζεται συμπέρασμα. Λόγω αυτού, μια συνεπαγωγή ονομάζεται και υποθετική πρόταση.

Τα ασαφή σύνολα είναι κατάλληλα να μοντελοποιούν αβέβαιες έννοιες και βαθμιαία μετάβαση από ένα σύνολο στο άλλο [5]. Επίσης, έμφαση δίνεται στη δυνατότητα των ασαφών συνόλων να εκφράζουν έννοιες υποκειμενικές, η υποκειμενικότητα των οποίων έχει άμεση σχέση συνάφειας με την εφαρμογή ή το πρόβλημα. Έννοιες, οι οποίες εκφράζονται από ασαφή σύνολα, καθημερινά χρησιμοποιούνται από τους ανθρώπους κάτι που σημαίνει ότι οι άνθρωποι είναι συνηθισμένοι να εκφράζονται υποκειμενικά και αβέβαια αλλά και ότι οι άνθρωποι είναι ικανοί να επεξεργαστούν αβέβαιες έννοιες.

Τέτοιες έννοιες μπορούν να εκφραστούν με προτάσεις σε φυσική γλώσσα π.χ. η πρόταση «η Μαρία είναι νέα». Στα [6][7] ο Zadeh πρώτος συνέλαβε την έννοια της γλωσσικής

μεταβλητής και την καθιέρωσε. Μια γλωσσική μεταβλητή είναι μια μεταβλητή οι τιμές της οποίας δεν είναι αριθμοί αλλά λέξεις ή προτάσεις σε μια φυσική γλώσσα. Οι τιμές αυτές παριστάνονται με ασαφή σύνολα. Στην έκφραση «η Μαρία είναι νέα» η λέξη «νέα» μπορεί να θεωρηθεί μια γλωσσική τιμή της γλωσσικής μεταβλητής «ηλικία». Ωστόσο, η «ηλικία» μπορεί να θεωρηθεί και ως αριθμητική μεταβλητή με τιμές στο πραγματικό διάστημα [0,100]. Η αριθμητική μεταβλητή «ηλικιακά έτη» με αριθμητικές τιμές στο [0,100] θεωρείται ότι είναι η μεταβλητή βάσης της γλωσσικής μεταβλητής «ηλικία». Ασαφή σύνολα που ορίζονται στο [0,100] μπορούν να αναπαραστήσουν το νόημα της γλωσσικής τιμής «νέα».

Αντίθετα με την κλασική λογική όπου οι προτάσεις είναι αληθείς ή ψευδείς και μόνο αυτές οι τιμές είναι αποδεκτές, στη ασαφή λογική το κατά πόσον μια πρόταση είναι αληθής ή ψευδής είναι θέμα βαθμού. Το «ΑΝ» μέρος μια υποθετικής προτάσεις λέγεται υπόθεση και το «ΤΟΤΕ» μέρος συμπέρασμα. Το κύριο χαρακτηριστικό ενός ασαφούς κανόνα είναι η δυνατότητά του να επιτυγχάνει εξαγωγή συμπεράσματος ακόμη και αν δεν ικανοποιείται πλήρως αλλά σε κάποιο βαθμό. Αυτό συμβαίνει με τον υπολογισμό του βαθμού στον οποίο η είσοδος του κανόνα ικανοποιεί τη συνθήκη της υποθέσεώς του.

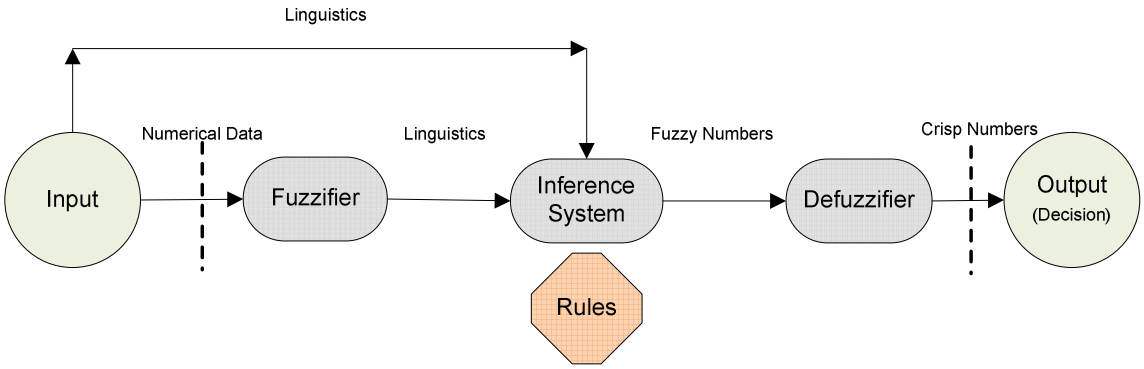
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.2: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

3.2.1 Ασαφή Συστήματα Συμπερασμού (Fuzzy Inference Systems)

Στην επίλυση ενός προβλήματος με τη χρήση της λογικής της ασάφειας χρησιμοποιούνται τα ασαφή σύνολα και οι λεκτικές μεταβλητές για να αποδώσουν την ανθρώπινη γνώση. Τα βασικά στοιχεία ενός ασαφούς συστήματος [8] και τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια, είναι τα ακόλουθα:

- Ασαφοποίηση των δεδομένων εισόδου
- Ανάπτυξη των κανόνων
- Επεξεργασία των κανόνων
- Αποασαφοποίηση των αποτελεσμάτων

Η παρακάτω εικόνα αναπαριστά τα βασικά μέρη ενός ασαφούς συστήματος.



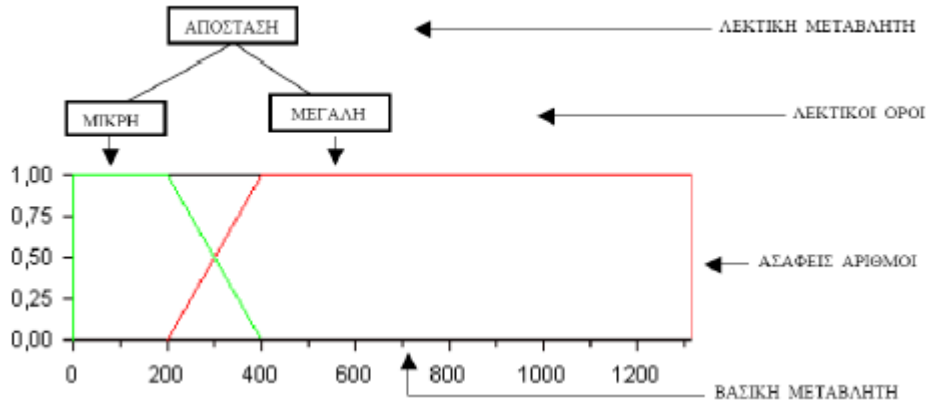
Εικόνα 3.3. Σύστημα ασαφούς λογικής

3.2.2 Ασαφοποίηση των Δεδομένων Εισόδου

Ασαφοποίηση καλείται η διαδικασία μετατροπής των αρχικών αριθμητικών τιμών των μεταβλητών σε λεκτικές μεταβλητές (linguistic variables - οι εκφράσεις των οποίων είναι ασαφείς αριθμοί δηλαδή ασαφή σύνολα ορισμένα σε ένα διάστημα, τα οποία αναπαριστούν γλωσσικούς όρους όπως μικρό, μέσο, μεγάλο, κλπ.) με τη βοήθεια των συναρτήσεων συμμετοχής. Οι αριθμοί που αντιστοιχούν στις μεταβλητές, αντικαθίστανται από λεκτικούς όρους (terms) και δημιουργούνται συναρτήσεις συμμετοχής αντίστοιχα για κάθε κριτήριο. Σε αυτό το στάδιο προσδιορίζονται οι υποκλάσεις και η μεταξύ τους επικάλυψη, καθώς και η χρησιμοποιούμενη συνάρτηση.

Οι συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών αριθμών παίρνουν σίγουρα την τιμή 1 σε ένα σημείο ή το πολύ σε ένα διάστημα. Αριστερά του διαστήματος αυτού είναι αύξουσες και

δεξιά φθίνουσες. Με τη βοήθεια των λεκτικών μεταβλητών διαμερίζουμε τα διαστήματα των τομών με ασαφή τρόπο και προσεγγίζουμε τη συνάρτηση του συστήματος. Για παράδειγμα η μεταβλητή – κριτήριο απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους μπορεί να προσεγγιστεί από τη συνάρτηση συμμετοχής τραπεζοειδούς μορφής, η οποία απεικονίζεται στην Εικόνα 3.4.



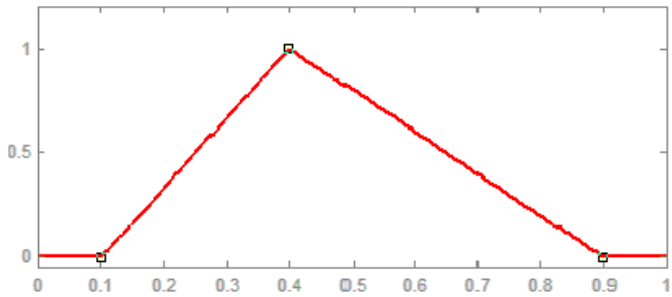
Εικόνα 3.4. Παράδειγμα λεκτικής μεταβλητής: απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους.

Υπάρχουν ωστόσο κάποιες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής οι οποίες εφαρμόζονται με μεγάλη συχνότητα στις διάφορες εφαρμογές και αποτελούν κατά κάποιο τρόπο τις πρώτες επιλογές των ερευνητών στην απεικόνιση φυσικών προβλημάτων. Τέτοιες συναρτήσεις συμμετοχής είναι:

Η *τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής*. Η μαθηματική έκφραση της συνάρτησης αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση. Στη σχέση αυτή a,b, και c είναι οι κορυφές το τριγώνου.

$$\mu_{tri} = (x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b} \right), 0 \right) \tag{3.2}$$

Στη σχέση αυτή a,b, και c είναι οι κορυφές το τριγώνου. Η Εικόνα 3.5 αποτελεί παράδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής για a=0,1, b=0,4 και c=0,9.



Εικόνα 3.5. Υπόδειγμα τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής

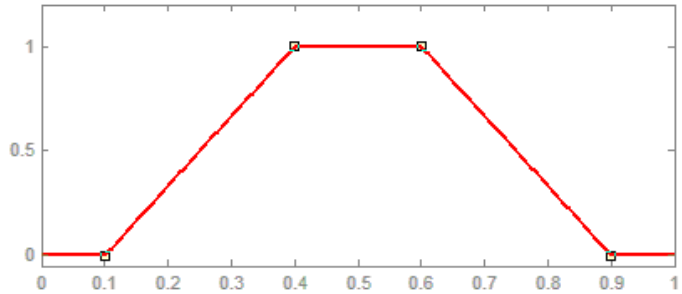
Στην τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής επισημαίνεται η εύκολη και απλή απεικόνιση εκτιμήσεων τριών σημείων (μικρή, μεσαία, μεγάλη πιθανότητα). Μεταξύ των ακραίων τιμών και της αναμενόμενης, οι υπόλοιπες τιμές αποτελούν ενδιάμεσες καταστάσεις που

υποδεικνύουν την απόκλιση από τις εκτιμήσεις, πάντα όμως, μέσα στο εύρος τιμών που ορίζονται από τα τρία σημεία [9].

Η *τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής*. Η μαθηματική έκφραση της συνάρτησης αποδίδεται από την ακόλουθη σχέση.

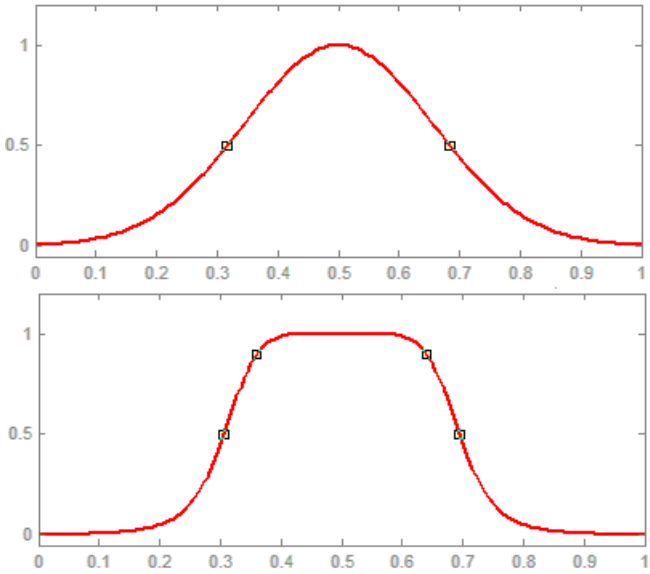
$$\mu_{trap} = (x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{c-b}\right), 0\right) \tag{3.3}$$

Στη σχέση αυτή a,b,c και d είναι οι κορυφές του τραπεζίου. Η Εικόνα 3.6 αποτελεί παράδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής με a=0,1, b=0,4, c=0.6 και d=0,9.



Εικόνα 3.6. Υπόδειγμα τραπεζοειδούς συνάρτησης συμμετοχής

Στην τραπεζοειδή συνάρτηση συμμετοχής, η πιθανότητα εμφάνισης απεικονίζεται στη βάση της εκτίμησης δυο διαστημάτων, εκείνου που ορίζει το εύρος του συνόλου των ενδεχομένων (μεγάλη πλευρά τραπεζίου) και εκείνου που ορίζει το εύρος των πλέον αναμενόμενων ενδεχομένων (μικρή πλευρά τραπεζίου). Οι υπόλοιπες πλευρές, όπως και στην τριγωνική συνάρτηση, αποτελούν ενδιάμεσες καταστάσεις που υποδεικνύουν την απόκλιση από τις εκτιμήσεις [9].



Εικόνα 3.7. Υπόδειγμα συνάρτησης συμμετοχής Gauss και Bell

Αντίστοιχα, η συνάρτηση συμμετοχής μπορεί να έχει τη μορφή της καμπύλης Gauss που αποδίδεται από την σχέση

$$\mu_{gauss} = (x; c, \sigma) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \tag{3.4}$$

καθώς επίσης και τη μορφή της γενικευμένης καμπύλης Bell που περιγράφεται από τη σχέση

$$\mu_{gbell} = (x; a, b, c) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}, b > 0 \tag{3.5}$$

όπου οι παράμετροι c, σ για τη συνάρτηση συμμετοχής Gauss και a, b, c για τη Bell καθορίζουν τις λεπτομέρειες της μορφής των συναρτήσεων συμμετοχής για το εκάστοτε σύστημα. Ενδεικτικά στην Εικόνα 3.7 φαίνονται οι μορφές των συναρτήσεων συμμετοχής που ακολουθούν μορφή Gauss και Bell.

Απαραίτητος για να οριστεί πλήρως το ασαφές σύστημα είναι ο προσδιορισμός κατάλληλων όρων, οι λεγόμενοι λεκτικοί συμβολισμοί (linguistic symbols), για το χαρακτηρισμό των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας των δεδομένων. Η απόδοση της συνάρτησης συμμετοχής αποτελεί μια υποκειμενική διαδικασία η οποία αντικατοπτρίζει τη γνώση ενός ή περισσοτέρων ειδικών, μπορεί δε να υποβοηθηθεί από διάφορες μεθόδους όπως η μέθοδος του μέσου όρου, η μέθοδος της απόστασης, η μέθοδος της διαίσθησης, η μέθοδος της ψήφου, η μέθοδος της σχετικής προτίμησης και η δελφική μέθοδος.

3.2.3 Κατασκευή Κανόνων

Τη διαδικασία της ασαφοποίησης ακολουθεί η κατασκευή κανόνων οι οποίοι συνδέουν την είσοδο με την έξοδο (τα αποτελέσματα) και αντιπροσωπεύουν τη γνώση των ειδικών. Ουσιαστικά οι κανόνες συνδέουν τις λεκτικές μεταβλητές κάθε μεταβλητής - κριτηρίου (πχ. απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους) με το υποσύνολο του λεκτικού συμβολισμού (χαμηλή ή υψηλή καταλληλότητα), αποδίδοντας τη βεβαιότητα καθορισμού του κανόνα.

Το ποσοστό βεβαιότητας αναφέρεται στο πόσο σημαντικός είναι ο κάθε κανόνας για την εκπλήρωσή του, καθώς επίσης αναφέρεται και στη σχετική σημαντικότητα των επιμέρους λογικών προτάσεων από τις οποίες αποτελείται. Το ποσοστό βεβαιότητας του κάθε κανόνα, καθορίζεται επίσης από ειδικούς με γενικές γνώσεις στο συγκεκριμένο πεδίο.

Ουσιαστικά η γνώση για ένα σύστημα αντιπροσωπεύεται από ένα σύνολο κανόνων. Οι κανόνες βασίζονται στη λογική του «Εάν λεκτική μεταβλητή – λεκτικός όρος...τότε λεκτικός συμβολικός με ποσοστό». Για παράδειγμα εάν το εξαγόμενο σύνολο είναι η «καταλληλότητα» και έχει δύο υποσύνολα, «χαμηλή» και «υψηλή» και οι μεταβλητές εισόδου είναι «απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους», ο κανόνας θα είναι της μορφής:

«Εάν η απόσταση από αρχαιολογικούς χώρους είναι μεγάλη, τότε η καταλληλότητα είναι χαμηλή με βεβαιότητα 70%».

3.2.4 Επεξεργασία των Κανόνων

Το στάδιο της δημιουργίας των κανόνων, διαδέχεται η επεξεργασία τους η οποία ονομάζεται και εξαγωγή συμπεράσματος (inference). Αφορά στη διαδικασία εξαγωγής του αποτελέσματος μέσα από την υπάρχουσα γνώση, όπως αυτή εκφράζεται στους κανόνες. Η διαδικασία αξιολόγησης των κανόνων σε ένα ασαφές σύστημα περιλαμβάνει τρία στάδια: τη συσσώρευση (aggregation), τη σημαντικότητα (implication) και τη συγκέντρωση (accumulation).

Η συσσώρευση περιλαμβάνει την αξιολόγηση της εκπλήρωσης συνολικά του κάθε κανόνα, με βάση την εκπλήρωση κάθε μεταβλητής του. Συνήθως, αντιστοιχεί στο λογικό AND, αν και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τελεστές, όπως: το λογικό OR, το αλγεβρικό γινόμενο (Algebraic Product), ο τελεστής γ (Gamma) κλπ. Η επιλογή του τελεστή εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η λεκτική ερμηνεία του κάθε τελεστή πριν την επιλογή τους.

Στο επόμενο στάδιο της σημαντικότητας, υπολογίζεται η βεβαιότητα για το σύνολο των κανόνων, με βάση τις βεβαιότητες του κάθε κανόνα χωριστά. Αυτό το βήμα αποδίδει το συμπέρασμα των κανόνων της λογικής μορφής «Εάν Α τότε Β». Η μέγιστη βεβαιότητα είναι ίση με τη μονάδα και αντιστοιχεί σε ένα σίγουρο αποτέλεσμα, πράγμα συνήθως σπάνιο. Έτσι, το στάδιο αυτό συνδέει τα ποσοστά βεβαιότητας του κάθε κανόνα με τον τελικό βαθμό εκπλήρωσής του. Διάφοροι τελεστές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Οι συνηθέστεροι τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι η τομή και το αλγεβρικό γινόμενο. Αυτό διασφαλίζει βαθμό εκπλήρωσης πάντα μικρότερο της μονάδας.

Σε ένα ασαφές σύστημα, συχνά, περισσότεροι από ένας κανόνες μπορούν να οδηγήσουν στο ίδιο αποτέλεσμα με διαφορετικούς βαθμούς εκπλήρωσης. Τελικά, με τη διαδικασία της συγκέντρωσης, η οποία αντιστοιχεί στο λογικό OR, επιλέγεται ένας μόνο βαθμός εκπλήρωσης. Οι συνηθέστεροι τελεστές για τη διαδικασία της συγκέντρωσης είναι η ένωση και το αλγεβρικό άθροισμα.

3.2.5 Αποασαφοποίηση

Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των κανόνων είναι μια λεκτική μεταβλητή με συμμετοχές σε δύο υποκλάσεις. Τα θεματικά επίπεδα που δημιουργούνται είναι ισάριθμα των υποκλάσεων. Αποασαφοποίηση καλείται η διαδικασία μετατροπής τόσο για διαχειριστικούς

όσο και για οπτικούς λόγους του συνόλου των αποτελεσμάτων σε μια αριθμητική τιμή, σε μία υποκλάση, σε ένα θεματικό επίπεδο.

Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για να πραγματοποιηθεί η αποασαφοποίηση όπως της μέγιστης τιμής, του μέσου όρου των μέγιστων τιμών, του κέντρου βάρους, κλπ και μέσω του υπολογισμού του δείκτη μέγιστης αλλαγής. Η πιο απλή μέθοδος και αυτή που χρησιμοποιείται τις περισσότερες φορές είναι η μέθοδος της μέγιστης τιμής.

3.2.6 Προσαρμοστικά Νευρωνικά-Ασαφή Συστήματα Συμπερασμού - Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS).

Το σχήμα του ANFIS [10] συνδυάζει τα νευρωνικά δίκτυα με τα ασαφή συστήματα συμπερασμού (FIS), και συνδυάζει το πλεονέκτημα της εύκολης εφαρμογής με την ικανότητα εκπαίδευσης. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν σημαντική ικανότητα εκπαίδευσης, μέσω της οποίας η επιθυμητή αντιστοίχηση εισόδου-εξόδου μπορεί να ληφθεί από ένα σύνολο από «μαθητευόμενους» κανόνες και δεδομένα εκπαίδευσης. Στο ANFIS, το FIS μετατρέπεται σε ένα πέντε-στρωμάτων προσαρμοστικό δίκτυο. Ο υβριδικός κανόνας εκμάθησης, ο οποίος συνδυάζει μία βαθμίδα αντίστροφης διάδοσης και εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων, χρησιμοποιείται για να βελτιστοποιήσει τις παραμέτρους των ασαφών συστημάτων συμπερασμού σε ένα προσαρμοστικό δίκτυο.

Με άλλα λόγια, ο βασικός στόχος του ANFIS είναι να βρει τις σχεδόν βέλτιστες συναρτήσεις συμμετοχής του αντίστοιχου FIS και να εφαρμόσει έναν υβριδικό αλγόριθμο εκμάθησης χρησιμοποιώντας σύνολα δεδομένων εισόδων-εξόδων, και έπειτα να επιτύχει την επιθυμητή αντιστοίχηση εισόδου-εξόδου. Η μεγάλη αξία του ANFIS είναι ότι μπορεί να προσεγγίσει όλα τα μη γραμμικά συστήματα χρησιμοποιώντας λίγα δεδομένα εκπαίδευσης, απαιτώντας λίγο χρόνο εκμάθησης και μάλιστα με πολύ υψηλή ακρίβεια.

Για την περιγραφή του αλγορίθμου που υλοποιεί το σύστημα συμπερασμού που συνδυάζει την ασαφή λογική και τα νευρωνικά δίκτυα, το προσαρμοστικά νευρο-ασαφή συστήματα συμπερασμού, χρησιμοποιείται ένα απλοϊκό παράδειγμα στο οποίο φαίνονται όλες οι παράμετροι που πρέπει να καθοριστούν. Για λόγου απλότητας, υποθέτουμε ότι ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού έχει δύο εισόδους, *x* και *y*, και μία έξοδο *dq*. Η βάση των κανόνων περιέχει δύο ασαφείς αν-τότε κανόνες για το ασαφές μοντέλο Takagi και Sugeno, οι οποίοι εκφράζονται ως εξής:

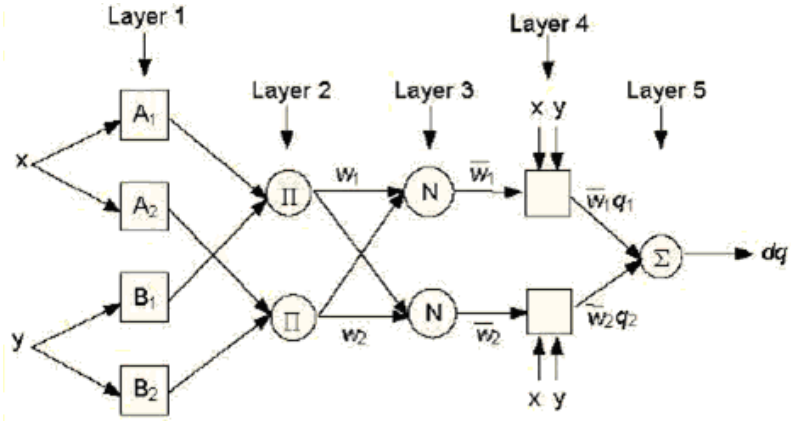
Αν $x = A_1$ και $y = B_1$ τότε $q_1=f_1x+g_1y+h_1$.

Αν $x = A_2$ και $y = B_2$ τότε $q_1=f_1x+g_1y+h_1$.

Το αριστερό μέλος των παραπάνω προτάσεων «$x = A_1$ και $y = B_1$» και «$x = A_2$ και $y = B_2$» ονομάζεται υποθετικό μέρος, ενώ το δεξί «$q_1=f_1x+g_1y+h_1$» και «$q_1=f_1x+g_1y+h_1$» καλείται μέρος «απόφαση». Το αντίστοιχο ισοδύναμο της αρχιτεκτονικής του ANFIS, που φαίνεται

στην Εικόνα 3.8, είναι μία κλάση των προσαρμοστικών δικτύων που είναι λειτουργικά ισοδύναμα με τα FIS. Το ANFIS είναι ένα πολύ-επίπεδο μονόδρομο δίκτυο, όπου κάθε κόμβος εκτελεί μία ειδική λειτουργία στα εισερχόμενα σήματα ανάλογα με ένα σύνολο παραμέτρων συσχετιζόμενων με αυτόν τον κόμβο. Οι χαρακτήρες των λειτουργιών των κόμβων μπορεί να διαφέρουν από κόμβο σε κόμβο, και η επιλογή της λειτουργίας εξαρτάται από τη συνολική λειτουργία εισόδου-εξόδου του προσαρμοστικού δικτύου.

Στην εικόνα 3.8 κάθε κόμβος παριστάνεται είτε από ένα τετράγωνο είτε από έναν κύκλο, αντιπροσωπεύοντας τις διαφορετικές προσαρμοστικές ικανότητες των κόμβων. Οι τετράγωνοι κόμβοι με παραμέτρους είναι οι προσαρμοστικοί κόμβοι, ενώ οι κυκλικοί είναι σταθεροί, χωρίς παραμέτρους. Η αρχιτεκτονική του προσαρμοστικού νευρο-ασαφούς συστήματος συμπερασμού χωρίζεται σε 5 επίπεδα.



Εικόνα 3.8 Αρχιτεκτονική του ANFIS

Στο επίπεδο 1 – layer 1, κάθε κόμβος είναι προσαρμοστικός με τη λειτουργία του υπολογισμού του βαθμού των συναρτήσεων συμμετοχής κάθε εισόδου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8, τα x και y είναι οι είσοδοι των κόμβων, τα A_i και B_i (i=1,2,…) είναι οι λεκτικές ετικέτες (μεγάλο, μικρό, κλπ) που σχετίζονται με τις λειτουργίες των κόμβων. Οι έξοδοι των κόμβων είναι οι συναρτήσεις συμμετοχής, που δείχνουν το βαθμό στον οποίο οι δοσμένοι κόμβοι ικανοποιούν τους δείκτες A_i είτε B_i. Το πλήθος των κόμβων αντιπροσωπεύουν τον αριθμών των ασαφών συνόλων. Για το παράδειγμα αυτό έχουν επιλεγεί συναρτήσεις συμμετοχής με σχήμα Bell για αυτό το επίπεδο. Όλες οι συναρτήσεις αυτές παίρνουν τιμές στο διάστημα [0, 1] και εκφράζονται από τη σχέση:

$$\mu_{A_f}(x) = \frac{1}{1+\left|\frac{x-c_i}{a_i}\right|^{b_i}},\ i=1,2, \tag{3.6}$$

όπου $\{a_i, b_i, c_i\}$ είναι το σύνολο των υποθετικών παραμέτρων. Η συνάρτηση $\mu_{A_i}(x)$ ή $\mu_{B_i}(x)$ είναι συνάρτηση bell, και η μορφή της ποικίλει ανάλογα με τις παραμέτρους αυτές για

τις διάφορες λεκτικές ετικέτες. Με άλλα λόγια, αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το σχήμα και τη θέση των συναρτήσεων συμμετοχής. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των a_i και c_i μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή του πλάτους και του κέντρου των συναρτήσεων συμμετοχής. Η τιμή της παραμέτρου b_i συνήθως είναι μεγαλύτερη του 0 και οι τιμές των a_i και b_i ελέγχουν τις κλίσεις στο σημείο τομής. Οι τιμές των a_i, b_i και c_i μπορούν να καθοριστούν κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας του υβριδικού αλγόριθμου εκμάθησης.

Τα επίπεδα 2 και 3 έχουν σταθερούς κόμβους και δεν έχουν παραμέτρους. Οι κόμβοι αυτών των δύο επιπέδων έχουν τις επιγραφές Π και Ν αντίστοιχα. Οι κόμβοι του επιπέδου 2, που εφαρμόζουν τον πολλαπλασιασμό (ή την t-νόρμα) των ασαφών συνόλων, πολλαπλασιάζουν το εισερχόμενο σήμα με ένα παράγοντα κλίμακας και στέλνουν τις εξόδους στους κόμβους του επιπέδου 3. Οι έξοδοι των κόμβων (w_i) χρειάζονται στον υπολογισμό της επιρροής του κάθε κανόνα, και ορίζονται ως

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(x), \quad i = 1, 2. \tag{3.7}$$

Στο επίπεδο 3, κάθε κόμβος κανονικοποιεί την επιρροή του κάθε κανόνα. Οι έξοδοι του επιπέδου 3 τροφοδοτούν το επίπεδο 4. Κάθε κόμβος υπολογίζει το λόγο της επιρροής του κάθε κανόνα προς το άθροισμα όλων των επιρροών:

$$\overline{w}_i = \left(\frac{w_i}{\sum_i w_i} \right), \quad i = 1, 2. \tag{3.8}$$

Κάθε κόμβος στο επίπεδο 4 είναι ένας προσαρμοστικός κόμβος και δημιουργεί έναν απλό γραμμικό συνδυασμό των εισόδων του συστήματος και ενός συνόλου παραμέτρων με τις εξόδους του επιπέδου 3, και μετά υπολογίζει τη συνεισφορά του κάθε κανόνα προς τη συνολική έξοδο:

$$\overline{w}_i \cdot q_i = \overline{w}_i \cdot \left(f_i x + g_i y + h_i \right) \tag{3.9}$$

όπου το $\{f_i, g_i, h_i\}$ είναι το σύνολο των παραμέτρων συμπεράσματος. Το q_i υποδηλώνει την έξοδο των κανόνων, και $\overline{w}_i$ είναι η έξοδος του επιπέδου 3. Οι τιμές των f_i, g_i, h_i μπορούν να υπολογιστούν κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης του συστήματος.

Στο επίπεδο 5, κάθε κόμβος είναι σταθερός και έχει την επιγραφή Σ. Σε αυτό το επίπεδο υπολογίζονται οι συνολικές έξοδοι αθροίζοντας όλα τα εισερχόμενα σήματα. Η έξοδος είναι το άθροισμα του βάρους των αποτελεσμάτων των κανόνων και εκφράζεται ως

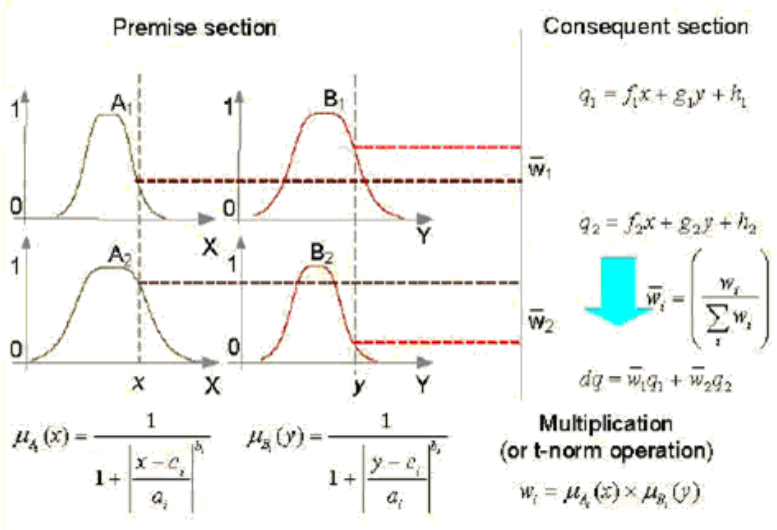
$$dq = \sum_i \overline{w}_i q_i, \quad i = 1, 2 \tag{3.10}$$

Αυτά τα επίπεδα αντιπροσωπεύουν το ισοδύναμο των Takagi και Sugeno ασαφών αν-τότε κανόνων. Το ANFIS ενοποιεί μία ασαφή μηχανή συμπερασμού με ένα προσαρμοστικό δίκτυο, το οποίο μαθαίνει τη σχέση μεταξύ των εισόδων και των εξόδων.

Στην Εικόνα 3.8 φαίνεται ότι δεδομένων των παραμέτρων υπόθεσης, η συνολική έξοδος *dq* μπορεί να εκφραστεί ως γραμμικός συνδυασμός των παραμέτρων συμπεράσματος. Έτσι η εξίσωση (3.9) μπορεί να ξαναγραφεί ως

$$dq = \overline{w}_1 q_1 + \overline{w}_2 q_2 = \overline{w}_1 \left(f_1 x + g_1 y + h_1 \right) + \overline{w}_2 \left(f_2 x + g_2 y + h_2 \right) \tag{3.11}$$

Είναι εμφανές ότι η εξίσωση αυτή είναι μία συνάρτηση γραφικών παραμέτρων και έτσι η γνωστή μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να εφαρμοστεί για να βρεθούν οι γραμμικές παράμετροι. Για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα ενός προσαρμοστικού δικτύου, δηλαδή η βραδύτητα και η τάση να εγκλωβίζεται σε τοπικά ελάχιστα, το ANFIS χρησιμοποιεί υβριδικούς κανόνες εκμάθησης, οι οποίοι συνδυάζουν τη μέθοδο κλίσης με μία γραμμική ελαχίστων τετραγώνων μέθοδο με στόχο να αντικαταστήσουν την μέθοδο επικλινής καθόδου, και η νέα υβριδική μέθοδος εκμάθησης να εφαρμοστεί στα προσαρμοστικά δίκτυα.



Εικόνα 3.8. Τα σχήματα FIS και ANFIS

Κάθε βήμα του υβριδικού κανόνα περιέχει ένα πέρασμα προς τα εμπρός, και ένα πέρασμα προς τα πίσω. Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι χωρίζονται σε δύο υποσύνολα – την υποσχετική παράμετρο και την απορρέουσα. Κατά το πέρασμα προς τα μπροστά, δεδομένα εισόδου προμηθεύονται σε κάθε κόμβο. Τα λειτουργικά σήματα προωθούνται για να υπολογιστεί σε κάθε κόμβο η έξοδος, για όλα τα βήματα – επίπεδα – μέχρι το επίπεδο 4. Από την άλλη, οι παράμετροι συμπεράσματος, δηλαδή οι f_i, g_i, h_i, βρίσκονται με την εκτίμηση των ελαχίστων τετραγώνων. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις καταχωρήσεις εκπαιδευτικών δεδομένων και έτσι υπολογίζεται το μέτρο του σφάλματος. Κατά το πέρασμα προς τα πίσω, οι ρυθμοί των σφαλμάτων, που εξάγονται από το μέτρο του σφάλματος,

διαδίδονται προς τα πίσω, δηλαδή από το τελικό στάδιο της εξόδου προς αυτό της εισόδου. Με αυτό τον τρόπο δύναται το σύστημα να ανανεώσει τις υποσχετικές παραμέτρους μέσω της επικλινούς καθόδου, μετά από το προς τα πίσω πέρασμα.

Οι υβριδικοί κανόνες εκμάθησης επιτελούν ένα διπλό ρόλο που κάνει το σύστημα πιο αποδοτικό. Αρχικά μειώνουν τη διάσταση του χώρου αναζήτησης της επικλινούς καθόδου και έπειτα επιταχύνουν τη σύγκλιση. Με άλλα λόγια, μπορούν να επιταχύνουν τη διαδικασία «εκπαίδευσης», και είναι με πιο ακριβή και αποδοτικά αποτελέσματα από το συμβατικό σχήμα επικλινούς καθόδου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.3: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LMDS

3.3.1 Περιγραφή των Συστημάτων LMDS

Το LMDS (Local Multipoint Distribution Service) πρόκειται γενικά για μία τεχνολογία ασύρματου τοπικού δικτύου σταθερής πρόσβασης, που χαρακτηρίζεται από την ευρυζωνική παροχή υπηρεσιών δεδομένων, φωνής, Διαδικτύου και βίντεο. Η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιεί κυρίως μικροκυματικές ζώνες συχνοτήτων από τα 26GHz έως τα 29GHz, ενώ στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και η ζώνη ανάμεσα στα 30.0 έως 31.3GHz χρησιμοποιείται επίσης για τις υπηρεσίες LMDS.

Η χρησιμοποίηση υψηλών συχνοτήτων άνω των 26GHz επιβάλει μεγαλύτερες αποσβέσεις κατά τη διάδοση των μικροκυμάτων. Έτσι, για τις μικροκυματικές ζεύξεις που υλοποιούνται με τη χρήση LMDS συστημάτων υπάρχει μεγάλος περιορισμός στην απόσταση της ζεύξης. Πιο συγκεκριμένα, το άνω όριο της ακτίνας της περιοχής κάλυψης του συστήματος είναι τα 8km, ενώ στις περισσότερες εφαρμογές η περιοχή κάλυψης δεν έχει ακτίνα μεγαλύτερη των 2.4km. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω αυτών των υψηλών απωλειών, απαιτεί οπτική επαφή (Line-of-Sight - LoS) ανάμεσα στον σταθμό που εκπέμπει και τους συνδρομητές της υπηρεσίας.

Όσον αφορά στις τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης, τα δίκτυα LMDS χρησιμοποιούν τις τεχνολογίες πολλαπλής πρόσβασης TDMA, FDMA και CDMA. Η επιλογή της μεθόδου πρόσβασης εξαρτάται από τις απαιτήσεις του χρήστη και το σχεδιασμό του συστήματος. Για κάποιον πελάτη που θέλει διαθέσιμο φάσμα για όλη τη διάρκεια της ημέρας, η FDMA είναι πιο κατάλληλη μέθοδος, ενώ στην περίπτωση πελατών με μικρό όγκο δεδομένων, η TDMA, που αξιοποιεί πιο αποδοτικά το διατιθέμενο φάσμα, είναι πιο κατάλληλη. Το μειονέκτημα του CDMA έναντι των άλλων δύο τεχνικών πρόσβασης είναι ότι απαιτείται αρκετά πιο ακριβός εξοπλισμός για τη λειτουργία του δέκτη ώστε να είναι ικανός να διαχωρίζει διευθύνσεις.

Τέλος, με την πρόσφατη εμφάνιση της τεχνολογίας των Ευφυών Κεραιών (Smart Antennas), μελετάται η ενδεχόμενη χρήση τους στα συστήματα BWA τόσο στην πλευρά των BS όσο και στην πλευρά των TS. Με την εγκατάσταση ευφυών κεραιών σε κάθε BS συστήματος LMDS είναι δυνατή η υλοποίηση μιας εναλλακτικής τεχνικής πρόσβασης γνωστής ως Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χώρου SDMA (Space Division Multiple Access) [11].

Όσον αφορά στον τρόπο κάλυψης μιας ευρύτερης περιοχής, το LMDS ακολουθεί παρόμοια φιλοσοφία με αυτή των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, έχουμε δηλαδή να κάνουμε με κυψελοειδή (cellular) κάλυψη. Βασικό πλεονέκτημα της κυψελωτής δομής των συστημάτων LMDS είναι ότι επιτρέπει την εφαρμογή μεθόδων επαναχρησιμοποίησης συχνότητας (frequency reuse), όπου το διατιθέμενο φάσμα συχνοτήτων επαναχρησιμοποιείται. Για να γίνει εφικτή αυτή η

επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων κάθε κυψέλη διαιρείται περαιτέρω σε τομείς (sectors) ενώ το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων διαχωρίζεται σε υποζώνες (sub-bands). Με τον τρόπο αυτό δύο γειτονικοί τομείς θα λειτουργούν σε διαφορετικές υποζώνες συχνοτήτων χωρίς να παρεμβάλλει ο ένας στον άλλον.

Το πιο διαδεδομένο σχήμα τμηματοποίησης κυψελών στα σύγχρονα συστήματα LMDS που λειτουργούν αυτή τη στιγμή είναι αυτό των 4 τομέων [12]. Με βάση αυτό το σχήμα τμηματοποίησης, ο κάθε σταθμός βάσης του συστήματος χρησιμοποιεί 4 κεραίες με εύρος ζώνης ημίσειας ισχύος 90° η καθεμία.

Η επαναχρησιμοποίηση μιας υποζώνης συχνοτήτων στην ίδια (ή σε γειτονική) κυψέλη έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων παρεμβολής, εφόσον οι πλευρικοί λοβοί ακτινοβολίας των κεραιών των σταθμών βάσης δε γίνεται πρακτικά να μηδενισθούν. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου το επιθυμητό σήμα υφίσταται σημαντικές διαλείψεις λόγω πρόσθετων φαινομένων (όπως βροχή), παράλληλα με την τμηματοποίηση κυψελών και τη χρήση κατευθυντικών κεραιών στους σταθμούς βάσης, γίνεται εναλλαγή της πόλωσης (Dual Polarization: V-Vertical, Κατακόρυφη και H-Horizontal, Οριζόντια).

Προκειμένου να διατηρηθεί η διαθεσιμότητα των συστημάτων LMDS εντός των προδιαγραφών, να καταστεί δυνατή η λειτουργία τους υπό χαμηλά περιθώρια διαλείψεων και να αναιρεθούν μερικώς οι παραπάνω δυσμενείς επιπτώσεις στη λειτουργία τους, έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, γνωστές ως Τεχνικές Περιορισμού των Διαλείψεων (Fade Mitigation Techniques, FMT). Τα αντίμετρα αυτά χωρίζονται γενικά σε τρεις κατηγορίες [13]:

- Έλεγχος της Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης (Down Link Power Control).
- Προσαρμοστική Μορφοποίηση σήματος (Adaptive Waveform).
- Τεχνικές Διαφορικής Προστασίας (Diversity Techniques).

Αυστηρά οριζόμενο, το περιθώριο διάλειψης (fade margin) εκφρασμένο σε dB είναι η διαφορά μεταξύ της τιμής της απόσβεσης (σε dB), η οποία οδηγεί το σύστημα σε απώλεια συγχρονισμού και της τιμής της απόσβεσης (σε dB) υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η τιμή της απόσβεσης υπό συνθήκες καθαρού ουρανού προκύπτει από το άθροισμα όλων των υπολοίπων παραγόντων απόσβεσης μείον την απόσβεση λόγω βροχόπτωσης και για δεδομένο σύστημα LMDS που λειτουργεί σε συγκεκριμένη περιοχή είναι μια σταθερή ποσότητα. Αντίθετα, η απόσβεση που οφείλεται στη βροχή είναι ένα στατιστικό μέγεθος και μεταβάλλεται ισχυρά στη διάρκεια ενός έτους δυσκολεύοντας τη σχεδίαση της ζεύξης. Γενικότερα, λοιπόν, μπορεί να ειπωθεί ότι το περιθώριο διάλειψης είναι η ποσότητα ισχύος κατά την οποία πρέπει να αυξηθεί η ισχύς εκπομπής των σταθμών του συστήματος ώστε αυτό να αντιμετωπίζει τις διαλείψεις λόγω βροχόπτωσης και να διατηρείται η διαθεσιμότητα του συστήματος εντός των προδιαγραφών συγχρονισμού. Είναι πάντοτε επιθυμητή η λειτουργία του συστήματος LMDS υπό όσο το δυνατό μικρότερο περιθώριο διάλειψης, γεγονός το οποίο επιφέρει σημαντικά οφέλη στον τηλεπικοινωνιακό πάροχο που

εκμεταλλεύεται το εν λόγω δίκτυο. Ανάμεσα στα κρίσιμα ζητήματα που υπεισέρχονται κατά το σχεδιασμό είναι τόσο η επιλογή κατάλληλης τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων λόγω βροχής, όσο και η επιτυχής ισορρόπηση μεταξύ επίδοσης και κόστους του συστήματος.

3.3.2 Έλεγχος Ισχύος της προς τα Κάτω Ζεύξης

Η τεχνική αυτή συνίσταται στην αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος από τους επίγειους σταθμούς προς τα τερματικά χρηστών, ώστε να αντισταθμισθούν οι απώλειες που εισάγουν οι κάθε είδους διαλείψεις. Η τεχνική ελέγχου ισχύος προς την αντίθετη κατεύθυνση (uplink) είναι πιο δύσκολα υλοποιήσιμη στα συστήματα LMDS λόγω των περιορισμών στον όγκο και στο μέγεθος του εξοπλισμού πελάτη. Για να είναι επιτυχημένος ο έλεγχος ισχύος της προς τα κάτω ζεύξης, πρέπει η ισχύς εξόδου από το σταθμό βάσης να μεταβάλλεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η πυκνότητα ισχύος του σήματος που φθάνει στο τερματικό χρήστη δεν υπολείπεται ενός κατωφλίου που ορίζεται από τις προδιαγραφές QoS του συστήματος. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό στα συστήματα LMDS καθώς η θέση των τερματικών χρήστη είναι σταθερή και, συνεπώς, ο σταθμός βάσης μπορεί να γνωρίζει κάθε στιγμή το μέγεθος της απόσβεσης κατά την προς τα κάτω ζεύξη και να προβλέπει με συνεχείς μετρήσεις την εξέλιξη του φαινομένου.

Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στην περίπτωση αυτή στους ενισχυτές υψηλής ισχύος HPA που χρησιμοποιούνται στους πομπούς των σταθμών βάσης του συστήματος. Οι ενισχυτές αυτοί τοποθετούνται στο τελευταίο στάδιο της βαθμίδας του πομπού και αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος ενίσχυσης του προς εκπομπή σήματος. Ωστόσο, δεν είναι πάντοτε δυνατό να αυξήσουν την ισχύ εξόδου τους διότι πολλοί ενισχυτές ήδη κατά την κανονική τους λειτουργία έχουν μικρά περιθώρια ισχύος στην έξοδο, δηλαδή λειτουργούν σε μικρή απόσταση από την περιοχή κόρου τους με αποτέλεσμα να εισέρχονται εύκολα στη μη γραμμική περιοχή λειτουργίας τους [14]. Ιδιαίτερα σε συστήματα LMDS που χρησιμοποιούν την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης FDMA, όπου τα κανάλια FDMA είναι διεσπαρμένα σε όλο το διατιθέμενο εύρος ζώνης, τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης λόγω της μη γραμμικής λειτουργίας του ενισχυτή δημιουργούν σημαντικές παρεμβολές σημάτων, περιορίζοντας την επίδοση του συστήματος και κατά επέκταση την εμβέλεια της συγκεκριμένης τεχνικής αντιμετώπισης των διαλείψεων.

Επιπλέον η αύξηση ισχύος δημιουργεί παρεμβολές προς τα γειτονικά επίγεια και δορυφορικά μικροκυματικά συστήματα που λειτουργούν σε παραπλήσιες φέρουσες συχνότητες, μέσω των πλευρικών λοβών του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας του σταθμού βάσης.

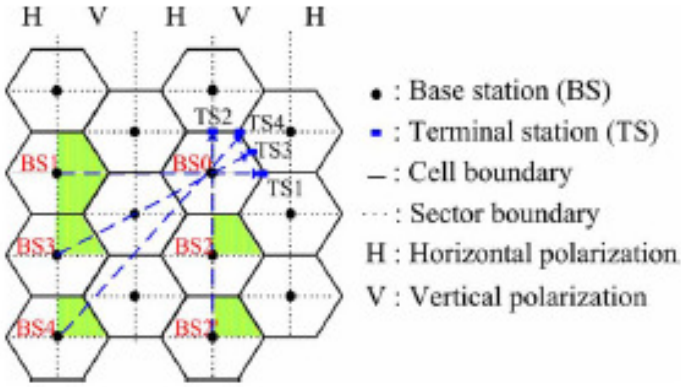
Από την άλλη πλευρά, αρκετές φορές επιλέγονται τα άλλα δύο συστήματα πολλαπλής πρόσβασης. Η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Κώδικα - CDMA, και η Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου - TDMA. Η επικοινωνία κατά την άνω ζεύξη, δηλαδή από τους τερματικούς σταθμούς προς το σταθμό βάσης έχει μεγαλύτερη αποδοτικότητα για τα LMDS συστήματα που χρησιμοποιούν CDMA καθώς χρησιμοποιούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης (greater bandwidth

efficiency) και έχει υψηλότερη ανοχή σε παρεμβολές από ότι στα LMDS βασισμένα σε TDMA. Αυτό οφείλεται στο γεγονός της χρήσης ορθογώνια κωδικοποιημένων ακολουθιών που επιτρέπουν την επαναχρησιμοποίηση της ίδιας συχνότητας [15][16][17]. Πάρα ταύτα, δεν είναι ισχύει το ίδιο για τη κάτω ζεύξη, δηλαδή την επικοινωνία από τον σταθμό βάσης προς τους τερματικούς σταθμούς, λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας της κεραίας των τερματικών.

Έτσι η κάτω ζεύξη στα συστήματα LMDS βασισμένα σε CDMA θα έχει ισχυρότερες παρεμβολές από αυτή των συστημάτων που βασίζονται σε TDMA, με αποτέλεσμα να γίνεται αναγκαία η επιβολή σχημάτων ελέγχου ισχύος για τη κάτω ζεύξη ώστε να μειωθούν οι παρεμβολές ανάμεσα στις κυψέλες [18]-[22].

3.3.3 Μοντέλο Συστήματος

Στο σχήμα 3.9 φαίνεται ένα τυπικό σύστημα LMDS, βασισμένο σε CDMA με δύο πολικότητες (κατακόρυφη V και οριζόντια H), με εξαγωνική μορφή κυψελών όπου η ακτίνα μέχρι τις γωνίες είναι δεδομένη ίσης με D. Κάθε κυψέλη χωρίζεται σε τέσσερα τεταρτημόρια, δηλαδή σε τέσσερις ίσους τομείς που απέχουν 90°. Ο σταθμός βάσης βρίσκεται στο κέντρο της κυψέλης και οι διάφοροι τερματικοί σταθμοί – χρήστες – είναι τυχαία κατανεμημένοι μέσα σε κάθε κυψέλη. Οι δύο διαφορετικές πολικότητες μας επιτρέπουν μέχρι και $2N$ κέρδος σε διασπορά για κάθε κυψέλη, αν υποθέσουμε ότι κάθε πλήρως φορτωμένος τομέας απασχολεί προκαθορισμένο και σταθερό εύρος ζώνης συχνοτήτων και μπορεί να περιέχει μέχρι και N χρήστες με ορθογώνια κωδικοποιημένες ακολουθίες. Σε κάθε τομέα υποτίθενται N_{TS} τυχαία κατανεμημένοι χρήστες.



Εικόνα 3.9 Δομή ενός κυψελών και διακυψελική παρεμβολή για την κάτω ζεύξη ενός LMDS συστήματος βασισμένο σε CDMA.

Το σκεπτικό σε αυτό το σχεδιασμό κυψελών είναι να γίνει η χρήση μίας CDMA διαμόρφωσης δύο επιπέδων. Αρχικά τα σήματα που μεταδίδονται πολλαπλασιάζονται και εξαπλώνονται με τη χρήση μίας Walsh-Hadamard ακολουθίας και στη συνέχεια πολλαπλασιάζονται και εξαπλώνονται με μία μακρά ακολουθία ψευδοθορύβου. Η δεύτερη διαδικασία στην πραγματικότητα είναι μία διαδικασία ανακατέματος όπου κάθε χρήστης γίνεται μοναδικός καθώς έχει ως υπογραφή του ένα σύνολο από ορθογώνιες ακολουθίες. Έτσι, αποκλείεται η παρεμβολή που οφείλεται σε χρήστες

μέσα στην ίδια κυψέλη. Επιπλέον, η επίδραση της πολυδιαδρομικότητας αμελείται, καθώς υποτίθεται ότι υπάρχει οπτική επαφή για το κανάλι, μία πολύ κατευθυντική κεραία για τον τερματικό σταθμό και μία ιδανική 90°-τομεοποιημένη κεραία στον σταθμό βάσης χωρίς front-to-back λοβό στο διάγραμμα ακτινοβολίας [14][23].

Εστιάζοντας στην ανάλυση των παρεμβολών από γειτονικές κυψέλες στην κάτω ζεύξη αναλύεται το σχήμα της Εικόνας 3.9. Τέσσερις τερματικοί σταθμοί με κάθετη πολικότητα, ο TS1, TS2, TS3, TS4 αντίστοιχα, είναι τοποθετημένοι στα άνω δεξιά σύνορα της κυψέλης του σταθμού βάσης BS0. Οι παρεμβολές προέρχονται από τους αντίστοιχους σταθμούς βάσης που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα και πολικότητα, εξαιτίας της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων. Έτσι, οι παρεμβάλλοντες σταθμοί βάσης είναι οι BS1, BS2, BS2΄, BS3, και BS4 αντίστοιχα, ενώ αμελούνται οι αντίστοιχες παρεμβολές από πιο απομακρυσμένους σταθμούς βάσης [15]. Αν υποτεθεί ότι η ισχύ που λαμβάνει ένας τερματικός σταθμός που βρίσκεται σε απόσταση d_i και ένας τερματικός σταθμός γύρω από τα σύνορα της κυψέλης σε απόσταση d από τον επιθυμητό σταθμό βάσης, BS0, είναι P_i και P αντίστοιχα, τότε η σχέση μεταξύ τους εκφράζεται από τη σχέση:

$$P = P_i \cdot \left(\frac{d_i}{d} \right)^a \tag{3.12}$$

όπου a είναι ο παράγοντας απωλειών διαδρομής που εξαρτάται από τις συνθήκες που προκαλούν εξασθένιση. Ενδεικτικά ο a παίρνει την τιμή 2 για μία ζεύξη με οπτική επαφή. Επιπλέον η λαμβανόμενη ισχύς από τον τερματικό σταθμό i υπό συνθήκες καθαρού ουρανού P_{rWcs_i} δίνεται από τη σχέση:

$$P_{rWcs_i} = P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{c}{4\pi f} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{d_i} \right)^2 \tag{3.13}$$

όπου P_T είναι η εκπεμπόμενη ισχύς, $\mathrm{c} = 3 \cdot 10^8$ m/s, f είναι η ραδιοσυχνότητα σε hertz, και G_T και G_R είναι τα κέρδη των κεραιών εκπομπής και λήψης αντίστοιχα [24]. Για να υπολογίσουμε το σηματοπαρεμβολικό λόγο (Signal-to-Interference Ratio – SIR) ενός τερματικού σταθμού που βρίσκεται μεταξύ του BS0 και TS2, υπολογίζουμε τις παρεμβολές που λαμβάνει από τους σταθμούς βάσης BS2 και BS2΄. Οι αποστάσεις του BS0 από τους BS2 και BS2΄ είναι $\sqrt{3}\mathrm{D}$ και $2\sqrt{3}\mathrm{D}$ αντίστοιχα. Υπό την προϋπόθεση ότι έχουμε καθαρό ουρανό και χωρίς κάποιο έλεγχο ισχύος, ο σηματοπαρεμβολικός λόγος SIR για το συγκεκριμένο σταθμό βάσης δίνεται από τον τύπο:

$$SIR(dB) = -10\log\left[\frac{K_2}{2N}\left(\frac{d}{\sqrt{3}D + d} \right)^2 + \frac{K_2^{'}}{2N}\left(\frac{d}{2\sqrt{3}D + d} \right)^2 \right] \tag{3.14}$$

με K_2 και K_2΄ να υποδηλώνουν τον αριθμό των χρηστών μέσα στους παρεμβάλλοντες τομείς του BS2 και BS2΄, αντίστοιχα. Επιπλέον, κατά τη χειρότερη δυνατή περίπτωση όπου οι τερματικοί

σταθμοί βρίσκονται στο ίδιο σημείο με τον TS2, $d = \sqrt{\frac{3}{2}}D$, και οι δύο παρεμβάλλοντες τομείς είναι υπό πλήρες φορτίο, δηλαδή *K2* = *K2΄*= *N*, τότε ο λόγος του επιθυμητού σήματος προς τις παρεμβολές είναι SIR_{TS2} = 11.2dB.

Λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες λόγω βροχής, η λαμβανόμενη ισχύς προκύπτει από τη σχέση (3.13) ως

$$P_{rec_i(dBW)} = P_{rWcs_i(dBW)} - RA_{i(dB)} \tag{3.15}$$

Το λαμβανόμενο σήμα παρεμβολής υπό συνθήκες καθαρού ουρανού υπολογίζεται ως το άθροισμα των δύο κυρίαρχων παρεμβολών ως

$$P_{Ics_i} = P(r_i)\cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{3}D + d_i}\right)^2 + P(r_i)\cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2\sqrt{3}D + d_i}\right)^2 \tag{3.16}$$

Παρόμοια, η απώλεια ισχύος εξαιτίας της βροχής αφαιρείται από κάθε παρεμβαλλόμενο σήμα, καταλήγοντας στην εξίσωση

$$P_{I_i(dBW)} = P_{Ics_i(dBW)} - RA^1_{I_i(dB)} - RA^2_{I_i(dB)} \tag{3.17}$$

όπου $RA^1_{I_i(dB)}, RA^2_{I_i(dB)}$ είναι οι απώλειες λόγω βροχής στο μονοπάτι παρεμβολής [25]. Η ισχύς θορύβου δίνεται από τη σχέση

$$N_{0(Watt)} = k \cdot T_0 \cdot \left(10^{\frac{NF}{10}} - 1\right) \cdot B_{RF} \tag{3.18}$$

όπου $k = 3{,}18 \cdot 10^{-23}$ είναι η σταθερά Bolzmann, *NF* είναι η μορφή θορύβου και B_{RF} είναι το εύρος ζώνης. Ο συνολικός λόγος σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή (Signal-to-Noise-and-Interference Ratio) για κάθε τερματικό δίνεται τελικά από τη σχέση

$$SNIR_i = \frac{P_{rec_i(Watt)}}{P_{I_i(Watt)} + N_{0(Watt)}},\ SNIR_{i(dB)} = 10 \cdot \log\left(SNIR_i\right) \tag{3.19}$$

Για να διασφαλιστεί μια ποιοτική επικοινωνιακή σύνδεση είναι απαραίτητη η τήρηση της προϋπόθεσης στο δέκτη να υπάρχει μεγαλύτερος σηματο-θορυβικο-παρεμβολικός λόγος από ένα κατώφλι που έχει προκαθοριστεί. Η πιθανότητα αποκοπής (outage probability) για το σταθμό *i*, δηλαδή το ποσοστό χρόνου όπου ο λόγος $SNIR_i$ δεν ξεπερνάει ένα απαιτούμενο κατώφλι $SNIR_{th}$ ώστε να εξασφαλιστεί καλή απόδοση στο δίαυλο επικοινωνίας, είναι

$$P^i_{out} = \Pr ob[SNIR_i < SNIR_{th}] \tag{3.20}$$

Το κατώφλι $SINR_{th}$ εξαρτάται από τη διαμόρφωση και το σχήμα κωδικοποίησης. Τελικά η μέση πιθανότητα αποκοπής για *M* σταθμούς μέσα σε μια περιοχή *A* υπολογίζεται ως

$$P_{out} = \frac{1}{M}\sum_{i \subset A} P^i_{out} \tag{3.21}$$

3.3.4 Υπάρχουσα Προσέγγιση για Κατανομή Ισχύος με FIS

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται μία πρωτότυπη τεχνική εφαρμογής ελέγχου ισχύος, της προς τα κάτω ζεύξης σε δίκτυο LMDS με πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης κώδικα, σχήμα βασισμένο στο ρυθμό βροχόπτωσης και έχει ως στόχο να βελτιώσει την απόδοση. Η τεχνική αυτή προτάθηκε στο [26]. Οι συνήθεις τεχνικές ελέγχου ισχύος χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τις διαλείψεις λόγω βροχής και τις παρεμβολές γειτονικών σταθμών βάσης καθώς και να αυξήσουν την χωρητικότητα ενός συστήματος LMDS. Για να βελτιωθεί πιο αποτελεσματικά η απόδοση λαμβάνονται 3 σημαντικοί παράγοντες:

- ο ρυθμός βροχόπτωσης,
- ο παράγοντας απωλειών διαδρομής που εξαρτάται από τις συνθήκες εξασθένισης των καναλιών,
- και ο αριθμός των χρηστών στους τομείς των γειτονικών κυψελών που παρεμβάλλουν.

Οι τρεις σημαντικοί παράγοντες, η βροχή ($R_{0.01}$), ο παράγοντας απωλειών διαδρομή (α_{IBS}) και ο αριθμός των συνδρομητών σε κάθε τομέα (N_{TS}), λαμβάνονται ως είσοδοι για το FPC με έξοδο την «ποιότητα καναλιού». Με τη σειρά της η έξοδος του συστήματος επηρεάζει ένα κατώφλι απόστασης (LT) που ορίζει την περιοχή ελέγχου ισχύος.

Το μοντέλο ITU-R 530-8 για τη πρόβλεψη της απόσβεσης που εισαγάγει η βροχή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την απόσβεση, η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$A_{0.01} = a \cdot R_{0.01}^{b} \cdot L \cdot r_{0.01} \tag{3.22}$$

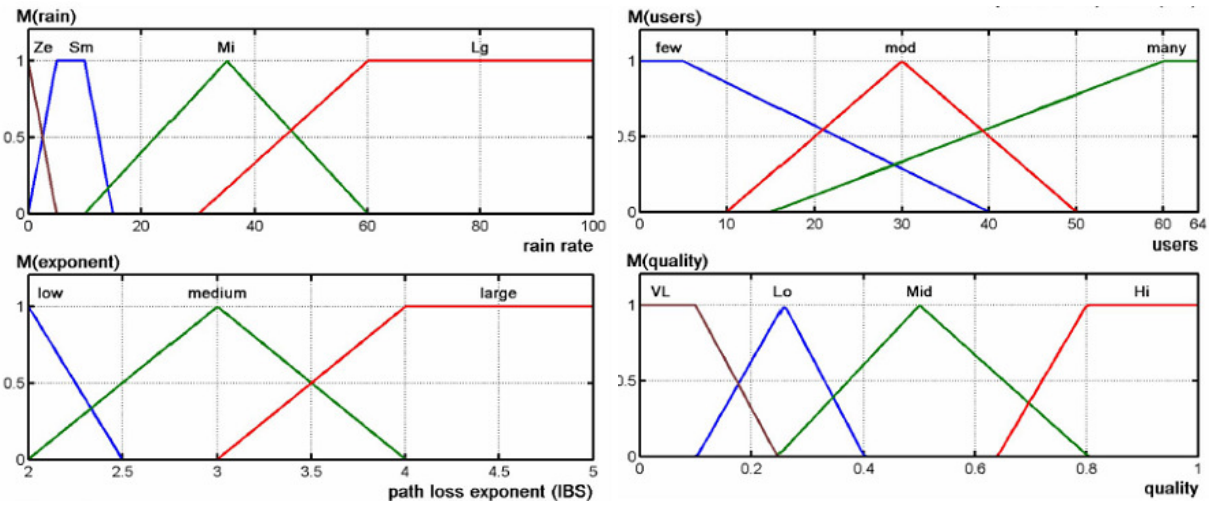
όπου το $R_{0.01}$ (mm/hr) είναι η τιμή της έντασης της βροχόπτωσης που υπερβαίνεται σε ποσοστό 0.01% του ολικού χρόνου, $A_{0.01}$ είναι μία εκτίμηση της απόσβεσης που εισάγεται λόγω βροχής στη συγκεκριμένη τηλεπικοινωνιακή ζεύξη , και αναφέρεται σε υπέρβαση 0.01% του χρόνου, L είναι το πραγματικό μήκος της ζεύξης και $r_{0.01}$ είναι ένας εμπειρικός παράγοντας μείωσης, τα a και b είναι συντελεστές που εξαρτώνται από τη συχνότητα f (GHz), το είδος πόλωσης των κυμάτων και τις παραμέτρους που αναφέρονται στη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής.

Rain rate	a_{IBS}	N_{TS}	Ποιότητα
Ze	low	few	Hi
Ze	low	mod/many	Mid
Ze	medium	few/mod	Hi
Ze	medium	many	Mid
Ze	large	few/mod/many	Hi
Sm	low/medium/large	few/mod/many	Hi
Mi	low/medium/large	few/mod/many	Lo
Lg	low/medium/large	few/mod/many	VL

Πίνακας 3.1. Κανόνες υπάρχοντος συστήματος ασαφούς συμπερασμού

Επιπλέον, ο εκθέτης απωλειών διαδρομής που παίρνει τιμές στο διάστημα από 2 μέχρι 5 περιγράφει στην πραγματικότητα κατά πόσο είναι άμεσης οπτικής επαφής ή όχι η ζεύξη [24]. Στην

περίπτωση της οπτικής επαφής (LOS) ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το χρήστη τότε αυτή η μεταβλητή παίρνει την ελάχιστη τιμή, δηλαδή 2.



Εικόνα 3.10. Συναρτήσεις συμμετοχής των μεταβλητών εισόδου και εξόδου για το υπάρχον σύστημα ασαφούς συμπερασμού.

Το σύνολο των δυνατών τιμών για τις μεταβλητές εισόδου $R_{0.01}$, α_{IBS}, και N_{TS} είναι τα [0, 100]mm/h , [2,5], και [1,64] αντίστοιχα. Οι συναρτήσεις συμμετοχής (Membership Functions) των μεταβλητών εισόδου και εξόδου έχουν τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 3.10. Οι κανόνες ασαφούς ελέγχου που συσχετίζουν τις τρεις εισόδους και την έξοδο είναι κανόνες της λογικής του AN-TOTE (IF-THEN), και είναι καταγεγραμμένοι στον Πίνακα 3.1.

Η έξοδος του συστήματος ασαφούς λογικής μετά την αποασαφοποίηση είναι η ποιότητα καναλιού ή *dq*. Υπενθυμίζουμε ότι ως έξοδος ασαφούς λογικής συστήματος το *dq* είναι καθαρός αριθμός με τιμή στο διάστημα [0, 1]. Το παρόν προτεινόμενο σχήμα χρησιμοποιεί το *dq* για να μεταβάλλει τη περιοχή του ελέγχου της ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, για τον έλεγχο ισχύος ορίζεται μία ακτίνα, μέσα στην οποία εφαρμόζεται ο έλεγχος. Το L_T υπολογίζεται από τον τύπο:

$$L_T = dq \cdot D \tag{3.23}$$

Έπειτα ορίζεται το F_i, ένας παράγοντας πολλαπλασιαστικός της εκπεμπόμενης ισχύος για κάθε συνδρομητή. Για τον συμβατικό αλγόριθμο που χρησιμοποιεί μόνο την απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του τερματικού σταθμού CPC, το F_i δίνεται από τον τύπο

$$F_i = \left(\frac{r_i}{D}\right)^2, 0 \le r_i \le D \tag{3.24}$$

όπου το *D* είναι η ακτίνα της κυψέλης. Για τον αλγόριθμο για ασαφή έλεγχο ισχύος FLC, δηλαδή το προτεινόμενο σχήμα, ο παράγοντας αυτό δίνεται από:

$$F_i = \begin{cases} 1, r_i \ge L_T \\ \left(\frac{r_i}{D}\right)^2, 0 \le r_i \le L_T \end{cases} \tag{3.25}$$

με L_T να είναι η υπολογισμένη ακτίνα από τη σχέση (3.23). Το μοντέλο για τον έλεγχο ισχύος της κάτω ζεύξης υποθέτει ότι, γνωρίζοντας τη θέση ενός τερματικού, η ισχύς που απαιτείται για να φτάσει τον *i*-στό τερματικό μπορεί να τροποποιηθεί και να δίνεται από:

$$P(r_i) = F_i \cdot P_D, 0 \le F_i \le 1 \tag{3.26}$$

όπου r_i είναι η απόσταση μεταξύ του επιθυμητού σταθμού βάσης και του *i*-στου τερματικού σταθμού, το F_i υποδηλώνει τον παράγοντα ελέγχου ισχύος, και το P_D είναι η ισχύς που απαιτείται για να φτάσει τον τερματικό σταθμό που βρίσκεται στα όρια της κυψέλης (απόσταση *D*).

Όπως φαίνεται και από τις εξισώσεις, κατά το συμβατικό έλεγχο ισχύος η ισχύς που απαιτείται για να φτάσει έναν τερματικό σταθμό εξαρτάται μόνο από την απόσταση αυτού από το σταθμό βάσης, ενώ κατά τον έλεγχο ασαφούς λογικής χρησιμοποιείται και μία ακόμα παράμετρος, δηλαδή το L_T. Για να μειωθούν οι παρεμβολές από γειτονικούς σταθμούς βάσης, το FPC σχήμα που προτείνεται χρησιμοποιεί το L_T για να μεταβάλλει τη περιοχή ελέγχου ισχύος, το οποίο οδηγεί σε διαφορετική απαιτούμενη ισχύ για διαφορετικούς συνδρομητές, ανάλογα με την «ποιότητα» και το μήκος της εκάστοτε ζεύξης. Μικρότερη περιοχή ελέγχου ισχύος θα οδηγήσει σε χειρότερη ποιότητα στα κανάλια. Αντίθετα, μεγαλύτερη περιοχή ελέγχου οδηγεί σε καλύτερη ποιότητα καναλιού, όπου οι περισσότεροι συνδρομητές βρίσκονται μέσα στη περιοχή ελέγχου και η ισχύς που χρειάζεται για να δημιουργηθεί μία αξιόπιστη ζεύξη ποικίλει ανάλογα με την απόσταση. Για να επιτευχθεί η αναγκαία τιμή του SINR για αξιόλογη και αξιόπιστη σύνδεση για τους συνδρομητές που βρίσκονται έξω από την περιοχή ελέγχου υιοθετείται η ισχύς εκπομπής P_D.

3.3.5 Προτεινόμενο FIS

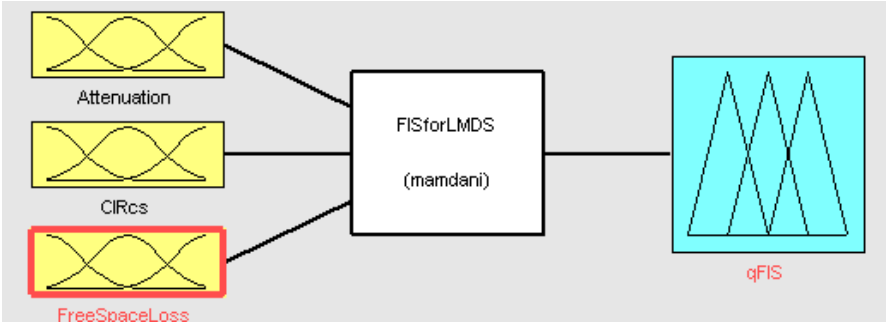
3.3.5.1 Κριτήρια Εισόδου

Στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής υλοποιήθηκε ένα νέα σχήμα ελέγχου ασαφούς λογικής. Το προτεινόμενο σχήμα αποτελεί βελτιστοποίηση του προηγούμενου σχήματος και περιγράφεται στην παρούσα ενότητα, καθώς και στην αναφορά [27]. Η κατανομή των χρηστών και η μορφή των κυψελών είναι όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.3. Στο σχήμα αυτό ελέγχου ισχύος ασαφούς λογική χρησιμοποιούνται διαφορετικά κριτήρια, κανόνες και έλεγχος ισχύος για το σύστημα LMDS από την προηγούμενη μέθοδο. Τα κριτήρια του συστήματος ασαφούς λογικής είναι (Εικόνα 3.11):

- οι απώλειες ελεύθερου χώρου,
- οι απώλειες που οφείλονται στις βροχοπτώσεις και
- ο σηματοπαρεμβολικός λόγος SIR.

Η έξοδος πάλι ορίζεται ως ποιότητα καναλιού, αφού πρακτικά απεικονίζει την ευκολία με την οποία μπορεί να επιτευχτεί μία αξιόπιστη ζεύξη, αναφορικά πάλι με την πιθανότητα αποκοπής. Η διαφοροποίηση στην επιλογή των κριτηρίων αποδίδει στον αλγόριθμο μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα. Καθώς το σύστημα συμπερασμού ασαφούς λογικής δέχεται ως μεταβλητές

εισόδου αριθμούς dB, δεν επηρεάζεται από τη μέθοδο με την οποία υπολογίζονται οι μεταβλητές εισόδου-απώλειες. Δίνεται λοιπόν στον μηχανικό η δυνατότητα επιλογής όχι μόνο της μεθόδου υπολογισμού των εισόδων, αλλά επιπλέον αν αυτός κρίνει απαραίτητο, η δυνατότητα προσθήκης και άλλων παραγόντων που δυσχεραίνουν τη διάδοση των σημάτων. Τέτοιος παράγοντας σε συστήματα LMDS είναι η απόσβεση που εισάγεται από τα ατμοσφαιρικά αέρια, καθώς μπορεί να υπερβεί κατά πολύ την απόσβεση που σχετίζεται ακόμη και με την πιο έντονη βροχόπτωση για συχνότητες κοντά στα 50GHz. Επιπροσθέτως, για τις επίγειες ραδιοζεύξεις που έχουν μεγάλο μήκος, η απόσβεση αυτού του είδους είναι αξιοσημείωτη ακόμη και για συχνότητες της τάξεως των 15GHz. Πιο συγκεκριμένα οι κύριες ατμοσφαιρικές συνιστώσες που εισάγουν απόσβεση στο διαδιδόμενο σήμα, είναι το οξυγόνο και οι υδρατμοί, καθώς το οξυγόνο απορροφά ενέργεια από τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εξαιτίας της ηλεκτρικής διπολικής ροπής, ενώ οι υδρατμοί λόγω της μαγνητικής διπολικής ροπής. Αν κρίνει λοιπόν ο ερευνητής ότι χρειάζεται να λάβει υπόψη του και αυτόν τον παράγοντα απόσβεσης, πρέπει να υπολογίσει τις απώλειες σε dB και να τις προσθέσει με απλά μαθηματικά στις ήδη υπάρχουσες απώλειες λόγω βροχοπτώσεων, χωρίς να χρειαστεί τροποποίηση στη μηχανή συμπερασμού ασαφούς λογικής.



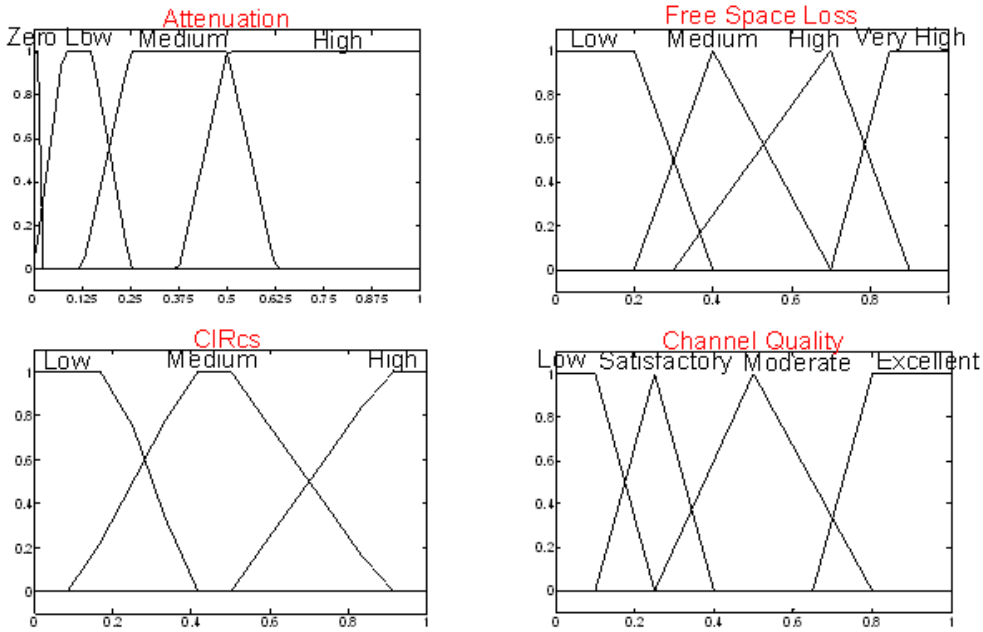
Εικόνα 3.11. Προτεινόμενο FIS

Βελτίωση στο υπάρχον σύστημα αποτελεί και η δυνατότητα στο μηχανικό να μελετήσει την απόδοση του δικτύου για διαφορετικές συχνότητες. Καθώς τα LMDS έχουν αποδιδόμενο φάσμα από τα 24 μέχρι τα 38GHz για τις διάφορες περιοχές του κόσμου, οι απώλειες ελεύθερου χώρου καθώς και οι σταθερές που υπολογίζουν την απόσβεση που εισάγει η βροχή επηρεάζονται σημαντικά από τη μεταβολή της συχνότητας. Το βελτιωμένο σχήμα σχεδιάστηκε ώστε να λαμβάνει υπόψη του τις διαφορές που προκύπτουν, γεγονός που επιβεβαιώνεται από τις διαφορετικές πιθανότητες αποκοπής που υπολογίζονται για τις διάφορες συχνότητες.

Μία ακόμα τροποποίηση έγινε στο σχήμα ελέγχου ισχύος. Η κατανομή της εκπεμπόμενης ισχύος τροποποιείται από μία συνάρτηση που πολλαπλασιάζει την εκπεμπόμενη ισχύ. Οι παράμετροι που καθορίζουν αυτή τη συνάρτηση μπορούν να επιλεγούν ανάλογα με το μέσο αναμενόμενο ρυθμό βροχόπτωσης για τη περιοχή που βρίσκεται το δίκτυο. Όπως είναι λογικό, περιοχές με υψηλές βροχοπτώσεις, όπως είναι οι τροπικές περιοχές, θα έχουν υψηλότερες απαιτήσεις εκπεμπόμενης ισχύος για να παρέχουν την ίδια πιθανότητα αποκοπής συγκριτικά με άνυδρες περιοχές. Με τον

τρόπο αυτό η κατανομή ισχύος λαμβάνει υπόψη όλες τις σημαντικές παραμέτρους που αφορούν έναν τηλεπικοινωνιακό δίαυλο και δεν στηρίζεται αποκλειστικά στην απόσταση μεταξύ τερματικού και σταθμού βάσης. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται άμεσα ότι δύο τερματικά μπορεί να λάβουν διαφορετική ισχύ ακόμη κι αν απέχουν το ίδιο από το σταθμό βάσης, καθώς η ποιότητα της ζεύξης ενδέχεται να μην ταυτίζεται (π.χ. λόγω εμποδίων, ρυθμού βροχόπτωσης, κτλ).

Το βελτιωμένο σχήμα αυτό παρέχει στο μηχανικό ακόμα μία δυνατότητα. Στον υπολογισμό της απόσβεσης λόγω του μέσου της βροχής λαμβάνεται υπόψη η γεωγραφική θέση της περιοχής στην οποία ανήκει το LMDS δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, από τους χάρτες βροχοπτώσεων της ITU [28] υπολογίζεται το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο η βροχή υπερβαίνει τον εκάστοτε ρυθμό βροχόπτωσης. Για το ίδιο ποσοστό υπολογίζεται η απόσβεση που εισάγεται. Έτσι το πρόγραμμα δίνει μοναδικά αποτελέσματα για διαφορετικές περιοχές του κόσμου.



Εικόνα 3.12. Συναρτήσεις Συμμετοχής για τις εισόδους και την έξοδο του προτεινόμενου FIS

3.3.5.2 Υπολογισμός Παραμέτρων Εισόδου

Οι κανόνες ασαφούς ελέγχου που συσχετίζουν τις τρεις εισόδους και την έξοδο είναι κανόνες της λογικής του AN-TOTE (IF-THEN). Όπως επιβάλλει η ασαφής λογική, οι μεταβλητές περιγράφονται με λεκτικές περιγραφές και μαζί με τους κανόνες είναι καταγεγραμμένες στον Πίνακα 3.2, που αποτελεί τη βάση των κανόνων. Οι συναρτήσεις συμμετοχής (Membership Functions) των μεταβλητών εισόδου και εξόδου έχουν τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 3.12. Με τη σειρά που φαίνονται στην εικόνα:

- Στο πρώτο σχήμα φαίνονται οι συναρτήσεις συμμετοχής για την απόσβεση που εισάγει η βροχή. Οι τιμές δεν είναι κανονικοποιημένες και υπάρχουν τέσσερις λεκτικές περιγραφές για τη μεταβλητή εισόδου αυτή.

- Το δεύτερο σχήμα αναφέρεται στο σηματοπαρεμβολικό λόγο υπό συνθήκες καθαρού ουρανού. Η μεταβλητή αυτή εισάγεται στο σύστημα κανονικοποιημένη. Πιο συγκεκριμένα, για τη τοπολογία αυτή ως μέγιστη τιμή θεωρούνται τα 59dB που αντιστοιχούν σε σηματοπαρεμβολικό λόγο για συνδρομητή που βρίσκεται σε απόσταση 50 μέτρων από τον σταθμό βάσης, ενώ ως ελάχιστη τιμή για την κανονικοποίηση θεωρούνται τα 11.2dB, για συνδρομητή που βρίσκεται στα όρια της επιθυμητής κυψέλης.
- Το τρίτο σχήμα αναφέρεται στις απώλειες ελεύθερου χώρου. Και αυτές οι τιμές είναι κανονικοποιημένες, για τη συγκεκριμένη τοπολογία με μέγιστη τιμή τα 134.13dB και ελάχιστη τιμή τα 95.37dB. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι τιμές είναι οι μέγιστες και η ελάχιστες δυνατές για συχνότητα λειτουργίας τα 28GHz. Έτσι, είναι αναμενόμενο η αύξηση της συχνότητας λειτουργίας για την ίδια κατανομή συνδρομητών στη κυψέλη να δίνει μεγαλύτερες τιμές απωλειών ελεύθερου χώρου.
- Τέλος, η έξοδος φαίνεται στο τελευταίο σχήμα, όπου υπάρχουν τέσσερεις συναρτήσεις συμμετοχής για τις λεκτικές περιγραφές της εξόδου, που ορίζεται ως «ποιότητα καναλιού».

Όσον αφορά τον υπολογισμό των παραμέτρων εισόδου, οι βασικές απώλειες ελεύθερου χώρου υπολογίζονται με βάση τον τύπο

$$L_s = 32.4 + 20\log d + 20\log f \tag{3.27}$$

όπου το f εκφράζεται σε MHz και το d σε km. Έτσι, για τους διάφορους υποτιθέμενους συνδρομητές υπολογίζονται οι εκάστοτε απώλειες ελεύθερου χώρου χρησιμοποιώντας απλούς γεωμετρικούς υπολογισμούς. Ο σηματοπαρεμβολικός λόγος υπολογίζεται από τον τύπο [15][23]

$$SIR_{cs}(dB) = -10\log\left[10^{-SIR_{cs,1}/10} + 10^{-SIR_{cs,2}/10}\right] \tag{3.28}$$

Τέλος, για τον υπολογισμό της απόσβεσης που εισάγεται από τη βροχόπτωση ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά υπολογίζονται για τη γεωγραφική περιοχή που βρίσκεται το δίκτυο LMDS οι παράμετροι της λογαριθμοκανονικής κατανομής του σημειακού ρυθμού βροχόπτωσης R_m, S_r με βάση το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής. Έπειτα μέσω της σχέσης της πιθανότητας υπέρβασης μίας στάθμης R_{th} υπολογίζεται το ποσοστό του χρόνου για τη συγκεκριμένη περιοχή κατά το οποίο ο ρυθμός βροχόπτωσης υπερβαίνει την στάθμη R_{th}

$$P = \frac{1}{2}\cdot \mathrm{erfc}\left(\frac{\ln R_{th} - \ln R_m}{\sqrt{2}\cdot S_r}\right) \tag{3.29}$$

Αυτό το ποσοστό θα χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της απόσβεσης λόγω βροχής που εισάγεται σε κάθε ζεύξη. Ύστερα, για τις διάφορες αποστάσεις d των συνδρομητών από τους σταθμούς βάσης υπολογίζεται η ειδική απόσβεση που αναφέρεται στη συχνότητα και πόλωση της ζεύξεως. Έπειτα υπολογίζεται ένα εικονικό μήκος της ζεύξεως d_{eff} πολλαπλασιάζοντας το πραγματικό μήκος d με ένα εμπειρικό παράγοντα μείωσης r. Ο παράγοντας αυτός λαμβάνει υπόψη τη χωρική ανομοιογένεια του μέσω βροχής. Μία εκτίμηση αυτού του παράγοντα γίνεται ως

$$r = \frac{1}{1 + \frac{d}{d_0}} \tag{3.30}$$

όπου η παράμετρος d_0 υπολογίζεται από την εμπειρική έκφραση

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0.015 R_{0.01}} \tag{3.31}$$

η οποία ισχύει για βροχοπτώσεις μέχρι 100 mm/hr. Έτσι υπολογίζεται η απόσβεση που αντιστοιχεί για ποσοστό του χρόνου 0.01% σύμφωνα με τη σχέση που ακολουθεί.

$$A_{0.01} = a \cdot R^b \cdot d \cdot r \tag{3.32}$$

***RA* (dB)**	**Clear Sky CIR (dB)**	**Free Space Loss (dB)**	**q_{FIS}**
Zero	High	Low	Excellent
Zero	High	Medium	Excellent
Zero	High	High	Excellent
Zero	High	Very High	Average
Zero	Medium	Low	Excellent
Zero	Medium	Medium	Excellent
Zero	Medium	High	Average
Zero	Medium	Very High	Tolerant
Zero	Low	Low	Excellent
Zero	Low	Medium	Average
Zero	Low	High	Tolerant
Zero	Low	Very High	Low
Low	High	Low	Excellent
Low	High	Medium	Excellent
Low	High	High	Average
Low	High	Very High	Average
Low	Medium	Low	Excellent
Low	Medium	Medium	Excellent
Low	Medium	High	Average
Low	Medium	Very High	Average
Low	Low	Low	Excellent
Low	Low	Medium	Excellent
Low	Low	High	Average
Low	Low	Very High	Tolerant
Medium	High	Low	Tolerant
Medium	High	Medium	Tolerant
Medium	High	High	Low
Medium	High	Very High	Low
Medium	Medium	Low	Tolerant
Medium	Medium	Medium	Low
Medium	Medium	High	Low
Medium	Medium	Very High	Low
Medium	Low	Any	Low
High	Low/Medium/High	Low/Medium/High/ Very High	Low

Πίνακας 3.2. Κανόνες του προτεινόμενου FIS

Συχνότητα	a_h	b_h	a_v	b_v
22	0.1155	10.329	0.1170	0.9700
23	0.1286	10.214	0.1284	0.9630
24	0.1425	10.101	0.1404	0.9561
25	0.1571	0.9991	0.1533	0.9491
26	0.1724	0.9884	0.1669	0.9421
27	0.1884	0.9780	0.1813	0.9349
28	0.2051	0.9679	0.1964	0.9277
29	0.2224	0.9580	0.2124	0.9203
30	0.2403	0.9485	0.2291	0.9129
31	0.2588	0.9392	0.2465	0.9055
32	0.2778	0.9302	0.2646	0.8981
33	0.2972	0.9214	0.2833	0.8907
34	0.3171	0.9129	0.3026	0.8834
35	0.3374	0.9047	0.3224	0.8761
36	0.3580	0.8967	0.3427	0.8690
37	0.3789	0.8890	0.3633	0.8621
38	0.4001	0.8816	0.3844	0.8552
39	0.4215	0.8743	0.4058	0.8486
40	0.4431	0.8673	0.4274	0.8421
41	0.4647	0.8605	0.4492	0.8357
42	0.4865	0.8539	0.4712	0.8296

Πίνακας 3.3. Οι συντελεστές a και b για διάφορες συχνότητες

Στη σχέση αυτή, οι συντελεστές a και b εξαρτώνται από τη συχνότητα f (GHz), το είδος της πόλωσης των κυμάτων, και τις παραμέτρους που αναφέρονται στη μικροσκοπική δομή του μέσου βροχής. Για τυχαία γραμμική και κυκλική πόλωση, οι συντελεστές a και b μπορεί να υπολογιστούν από τις σχέσεις:

$$a = \left[\left(a_h + a_v\right) + \left(a_h - a_v\right)\cos^2\Phi\cos 2\tau\right] \Big/ 2 \tag{3.33α}$$

$$b = \left[a_h b_h + a_v b_v + \left(a_h b_h - a_v b_v\right)\cos^2\Phi\cos 2\tau\right] \Big/ 2a \tag{3.33β}$$

όπου (a_h, b_h) και (a_v, b_v) είναι οι τιμές των συντελεστών a, b για οριζόντια και κατακόρυφη πόλωση, αντίστοιχα, Φ η γωνία ανύψωσης του ραδιοβήματος (δηλ. η γωνία με τον ορίζοντα) και τα η γωνία πόλωσης του κύματος ως προς τον ορίζοντα ($\tau=45^0$ για κυκλική πόλωση). Οι συντελεστές a_h, b_h, a_v, b_v έχουν υπολογιστεί για σφαιροειδείς σταγόνες με κατανομή μεγέθους κατά Laws και Parsons, κατακόρυφο άξονα συμμετρίας, διαστάσεις που συνδέονται με την ακτίνα της ισόογκης σφαίρας κατά Pruppacher και Pitter, οριακή ταχύτητα κατά Gunn και Kinzer και δείκτη διάθλασης στους 20^0C κατά Ray. Οι τιμές των παραπάνω συντελεστών καταγράφονται στον Πίνακα I της σύστασης ITU-R P.838 [29] και οι τιμές εκείνων που αφορούν συχνότητες LMDS παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Συμπερασματικά για το ποσοστό του χρόνου που υπολογίζεται από τη σχέση (3.22) για την περιοχή λειτουργίας του δικτύου υπολογίζεται η απόσβεση που εισάγεται λόγω βροχής στις τηλεπικοινωνιακές ζεύξεις ανάμεσα σε συνδρομητές και το σταθμό βάσης μέσω της σχέσης:

$$A_p = A_{0.01} \cdot 0.12^{-(0.546+0.043\log_{10} p)} \tag{3.34}$$

Η σχέση (3.34) ισχύει για γεωγραφικά πλάτη μεγαλύτερα ή ίσα από τις 30°. Τέλος, απαιτείται υπολογισμός της απόσβεσης που εισάγει η βροχή και για τα σήματα παρεμβολής και υπολογίζεται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο για τις αποστάσεις των σταθμών παρεμβολής από τους συνδρομητές της επιλεγμένης κυψέλης.

3.3.6 Προτεινόμενος Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος

Η έξοδος του συστήματος ονομάζεται ποιότητα καναλιού, συμβολίζεται ως *dq* και το σύνολο των δυνατών τιμών της είναι το [0,1]. Οι μεγάλες τιμές του *dq*, κοντά στο 1, αντιπροσωπεύουν κανάλια με πιο πιθανή υπέρβαση του κατωφλίου, δηλαδή είναι πιο πιθανό να παρέχουν τη ποιότητα υπηρεσιών που απαιτείται. Αντίθετα μικρές τιμές *dq* αντιστοιχίζονται σε μεγάλες απώλειες, άρα απαιτούν αύξηση ισχύος έτσι ώστε το λαμβανόμενο σήμα να είναι μεγαλύτερο από ένα κατώφλι. Ορίζεται μία συνάρτηση αυξομείωσης της ισχύος η οποία θα καλείται PCF (Power Control Function – Συνάρτηση Ελέγχου Ισχύος). Η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς P_D πολλαπλασιάζεται με την PCF και έτσι για κάθε συνδρομητή η εκπεμπόμενη ισχύς γίνεται

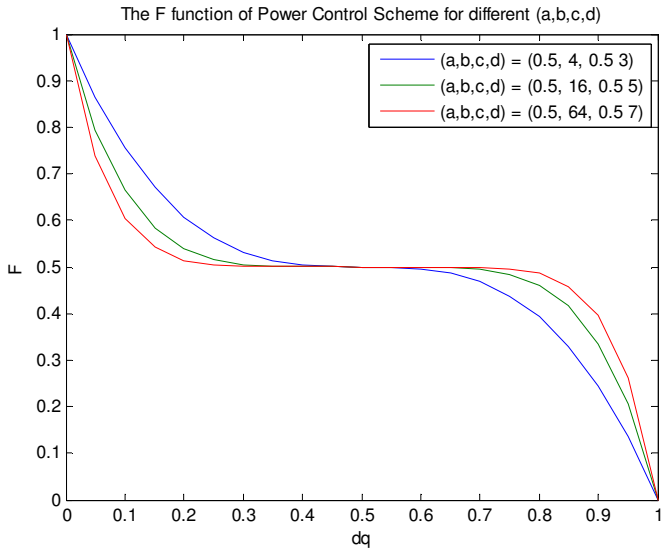
$$P(r_i) = PCF_i \cdot P_D \tag{3.35}$$

όπου r_i είναι η απόσταση μεταξύ του επιθυμητού σταθμού βάσης και του *i*-στου τερματικού σταθμού, το PCF_i υποδηλώνει την συνάρτηση ελέγχου ισχύος, και το P_D εδώ είναι η μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύς. Για τα κλασικά συστήματα ελέγχου ισχύος CPC (Classic Power Control), η PCF δίνεται από την εξίσωση (3.25) που περιγράφηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Στα πλαίσια της παρούσης ανάλυσης θα χρησιμοποιηθεί για την PCF η παρακάτω μορφή:

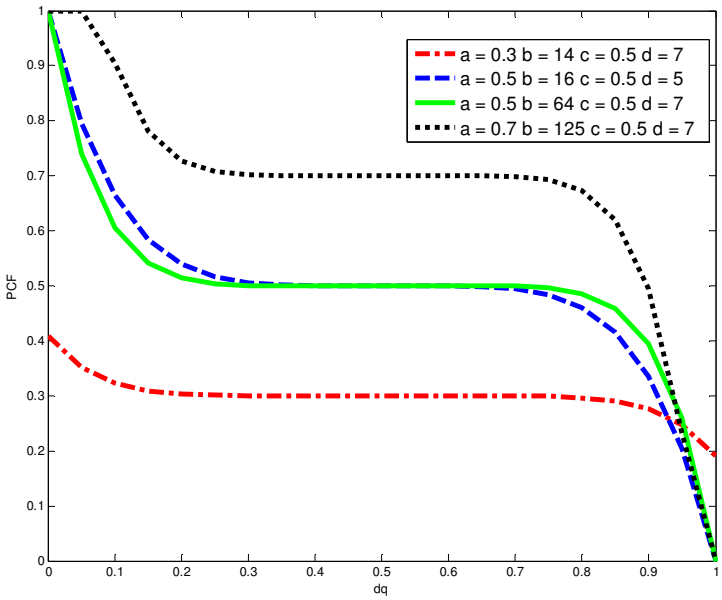
$$\begin{aligned} &PCF_i(dq) = a + b \cdot (c - dq)^d, \\ &PCF_i(0) \le 1, PCF_i(1) \ge 0 \end{aligned} \tag{3.36}$$

Οι σταθερές της εξίσωσης (3.36) δημιουργούν μία συνάρτηση του *dq* η οποία πολλαπλασιάζει την εκπεμπόμενη ισχύ και την μεταβάλλει ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, για να υπάρχει και αύξηση και μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος επιλέγεται ο παράγοντας *d* να είναι φυσικός περιττός αριθμός, ενώ το *c* λειτουργεί ως ένα κατώφλι, όπου για τιμές *dq* μικρότερες από το *c* (δηλαδή για κακή ποιότητα καναλιού) η εκπεμπόμενη ισχύς θα αυξηθεί, ενώ για τιμές *dq* μικρότερες από το *c* η εκπεμπόμενη ισχύς θα μειωθεί. Έτσι υπάρχει ο περιορισμός του *c* να ανήκει στο ίδιο σύνολο τιμών με το *dq*, δηλαδή $c \in [0,1]$. Η σταθερά *a* αποτελεί τη στάθμη ισχύος γύρω από την οποία θα προκαλούνται η μεταβολές. Δηλαδή την ισχύ που

θα εκπέμπεται όταν η ποιότητα του καναλιού είναι ίδια με τη τιμή εκείνη που δίνει αποδεκτά αποτελέσματα και δεν χρειάζεται προσαρμογή ισχύος σε νέα επίπεδα. Όμως η επιλογή της σταθεράς αυτής, όπως και της *b*, περιορίζονται από την επιλογή του *c* και του *d*. Όλες οι σταθερές πρέπει να οριστούν προσεκτικά ώστε η PCF να μην παίρνει τιμές έξω από το διάστημα [0,1] και πιο συγκεκριμένα να ικανοποιεί τις συνθήκες $F_i(0) \le 1 \Rightarrow a + b(c)^d \le 1$ και $F_i(1) \ge 0 \Rightarrow a + b(c-1)^d \ge 0$.



Εικόνα 3.13. Συναρτήσεις ελέγχου ισχύος για περιοχές με μέτριες βροχοπτώσεις (a=c=0.5)



Εικόνα 3.14. Συναρτήσεις ελέγχου ισχύος για διάφορα κλίματα

Το πλεονέκτημα της προσέγγισης αυτής είναι ότι ανάλογα με τις τιμές των σταθερών που θα επιλεγούν, προκύπτουν είτε ομαλές είτε απότομες καμπύλες κατανομής ισχύος, οδηγώντας έτσι σε πιο «συντηρητικά» ή «γενναιόδωρα» συστήματα ανάλογα με την περίπτωση. Το γεγονός αυτό δίνει την ευκαιρία στο σχεδιαστή να διαφοροποιήσει τις τιμές αυτές ανάλογα με τα ιδιαίτερα

χαρακτηριστικά του προβλήματος υπό μελέτη, π.χ. γεωγραφική θέση, κλίμα, συχνότητα, τοπολογία, κτλ. Για παράδειγμα, για μία περιοχή που το πιο πιθανό είναι να μην υπάρχουν ισχυρές βροχοπτώσεις, όπως είναι η Αθήνα, οι τιμές στις οποίες θα κυμαίνεται η ποιότητα καναλιού *dq* θα είναι πιο υψηλές από αντίστοιχες πιο ένυδρες περιοχές. Έτσι θα απαιτείται μικρότερη ισχύς για να επιτευχθεί η ίδια τιμή SINR και μία προτιμότερη επιλογή παραμέτρων θα ήταν τα a=c=0.4, ενώ οι σταθερές b, d υπολογίζονται ώστε να μην προκύψουν τιμές έξω από τα επιτρεπτά όρια. Αντίστοιχα για πιο ένυδρες περιοχές θα μπορούσαν να επιλεγούν a=0.75, c=0.25, δηλαδή για ποιότητα καναλιού 0.25 θεωρείται ότι αρκεί το 0.75 της μέγιστης ισχύς,

Για να γίνει κατανοητή η διαφορά μεταξύ των συναρτήσεων που παράγουν οι διαφορετικές σταθερές, στην Εικόνα 3.6 φαίνονται μερικές συναρτήσεις για περιοχές με μέτριες βροχοπτώσεις, ενώ στην Εικόνα 3.7 παρουσιάζονται γραφικά οι συναρτήσεις που προκύπτουν από τέσσερις συνδυασμούς των σταθερών για περιοχές με ποικίλα κλίματα.

Παράμετροι	**Μονάδα Μέτρησης**	**Τύπος**	**Τιμή**
Εκπεμπόμενη Ισχύς	dBW	P_D : Εκπεμπόμενη Ισχύς	1
Κέρδος εκπομπής της κεραίας	dBi	Gt	15.15
Συχνότητα λειτουργίας	GHz	f: Συχνότητα λειτουργίας	28 και 42
Μήκος διαδρομής	Km	d: Ακτίνα κυψέλης	5
Όρια πεδίου	dB	LFM: Αστοχία Ευθυγράμμισης	-1.0
Απώλειες ελεύθερου χώρου	dB	FSL=-92.45-20*log(f)-20*log(d)	-137.06
Συνολικές απώλειες διαδρομής	dB	Ltot=FSL + LFM	-138.06
Κέρδος κεραίας λήψης	dBi	Gr	34.96
Ενεργό εύρος ζώνης	MHz	BRF: Εύρος ζώνης του δέκτη	40
Συντελεστής θορύβου του δέκτη	dB	NF: Ενεργός συντελεστής θορύβου	5
Θερμικός θόρυβος	dBW/MHz	10*log(k * T0)	-143.86
Απώλειες συστήματος	dB	Lsys = Gt + Ltot + Gr	-82.95
Επίπεδο λαμβανομένου σήματος	dBW	RSL = Ptx + Lsys	-82.95
Φασματική πυκνότητα ισχύος θερμικού θορύβου	dBW/MHz	N0=10*log(k*T0) + NF	-138.86

Πίνακας 3.4. Παράμετροι για το LMDS σύστημα της προσομοίωσης

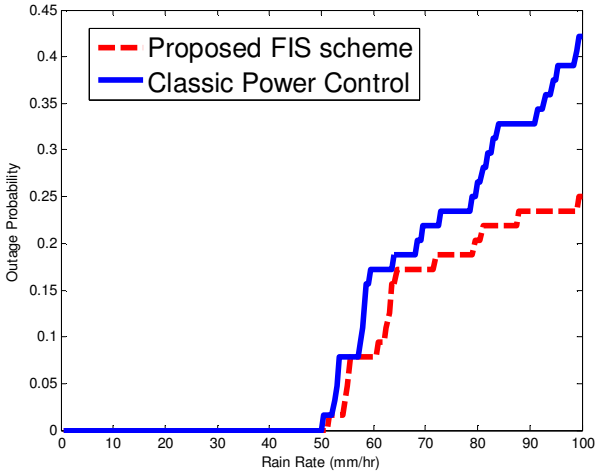
3.3.7 Προσομοίωση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Οι τιμές όλων των παραμέτρων λειτουργίας του υποθετικού συστήματος LMDS που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις, παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.4. Επίσης, k = $1.38*10^{-23}$ και T_0=298 K. Τα κατώφλια απωλειών βροχοπτώσεων υπολογίζονται για ποσοστό χρόνου 0.01%.

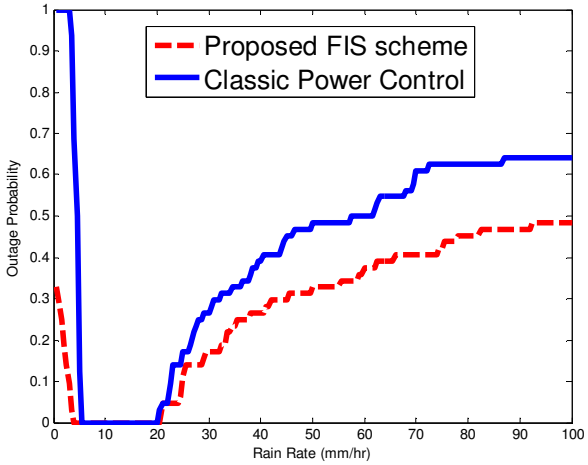
Σκοπός αρχικά της προσομοίωσης είναι η σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου σε σχέση με τον κλασικό έλεγχο ισχύος (CPC) όσον αφορά την εκτιμώμενη μέση πιθανότητα αποκοπής, όπως

αυτή υπολογίζεται από τη σχέση (3.21). Η σύγκριση γίνεται για διάφορες τιμές του κατωφλίου $SNIR_{th}$ και αφορά ρυθμούς βροχόπτωσης από έως 100 mm/hr. Για την PCF χρησιμοποιούμε τις τιμές a = 0.5, b = 4, c = 0.5, d = 3, θεωρούμε δηλαδή πρακτικά μια περιοχή με μέτριες βροχοπτώσεις. Οι Εικόνες 3.15 - 3.17 δείχνουν τη μέση πιθανότητα αποκοπής για τρεις συνδυασμούς $SNIR_{th}$ και συχνότητας:

- Για $SNIR_{th}$ = 12.3 dB και f = 28 GHz παρατηρείται μια μείωση κατά 25.72% στην πιθανότητα αποκοπής κατά μέσο όρο.
- Στην περίπτωση που $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz η μείωση αυτή γίνεται ίση με 31.35%.
- Τέλος, όταν $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 42 GHz, παρατηρείται μείωση 31.97%.



Εικόνα 3.15. Πιθανότητα αποκοπής για $SNIR_{th}$ = 12.3 dB και f = 28 GHz

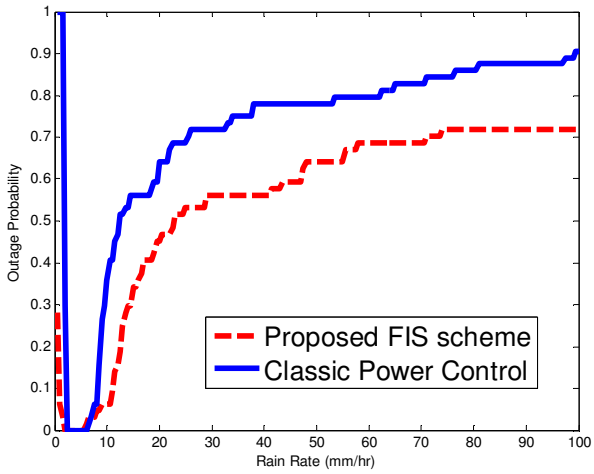


Εικόνα 3.16. Πιθανότητα αποκοπής για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz

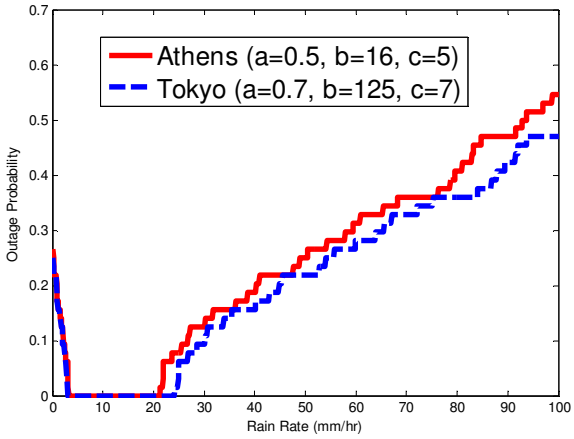
Σε όλες τις εικόνες παρατηρείται καταρχήν ότι η αύξηση του ρυθμού βροχόπτωσης έχει ως αντίκτυπο την αύξηση της πιθανότητας αποκοπής. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ισχυρής απόσβεσης που εισάγει το φαινόμενο της βροχής στο εκπεμπόμενο επιθυμητό σήμα και έτσι δεν ξεπερνά το επιθυμητό εκάστοτε κατώφλι $SNIR_{th}$. Επιπλέον είναι διακριτό ένα μικρό τμήμα στις καμπύλες που αφορούν στην πιθανότητα αποκοπής για μεγάλα κατώφλια $SNIR_{th}$ (25.5dB), που αφορά στις

μικρές βροχοπτώσεις. Για μηδενικές βροχοπτώσεις παρατηρείται ότι υπάρχουν υψηλά ποσοστά πιθανότητας αποκοπής που δικαιολογείται από τις υψηλές ισχείς των σημάτων παρεμβολής. Για βροχοπτώσεις κοντά στα 5-20mm/hr για συχνότητα λειτουργίας 28GHz (Εικόνα 3.16) και 3-11mm/hr για συχνότητα 42GHz (Εικόνα 3.17) παρατηρείται πτώση στο μηδέν της πιθανότητας αποκοπής, ενώ για μικρότερες βροχοπτώσεις υπάρχουν υψηλά ποσοστά. Ο μηδενισμός αυτός της πιθανότητας αποκοπής οφείλεται στη μεγαλύτερη απόσβεση που εισάγεται στα σήματα παρεμβολής, ενώ το επιθυμητό σήμα φτάνει σε αρκετά υψηλή στάθμη ώστε να υπερκεράσει το θόρυβο του συστήματος. Στη συνέχεια, για μεγαλύτερες βροχοπτώσεις, τα σήματα παρεμβολής πρακτικά είναι αμελητέα, ενώ η απόσβεση που εισάγεται έχει ως αποτέλεσμα το επιθυμητό σήμα να πέφτει κάτω από τη στάθμη του κατωφλίου και άρα την αύξηση της πιθανότητας αποκοπής.

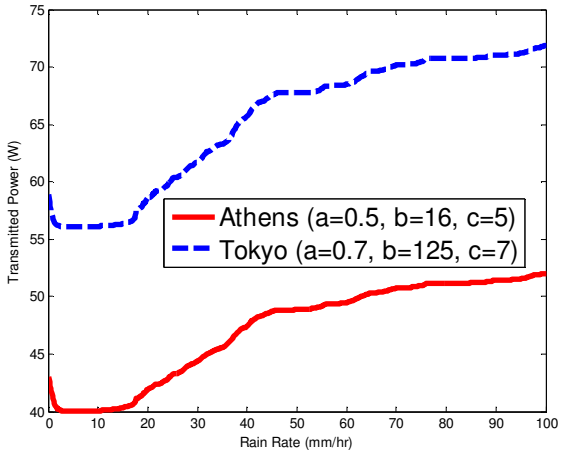
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα FIS είναι ικανό να αξιολογεί επιτυχώς την ποιότητα της ζεύξης και κατά συνέπεια να ενισχύει τους σταθμούς που απαιτούν περισσότερη ισχύ. Αντίθετα, ο κλασικός έλεγχος ισχύος λαμβάνει υπόψη μόνο την απόσταση και κατά συνέπεια αποτυγχάνει να κατανείμει κατάλληλα τη διαθέσιμη ισχύ.



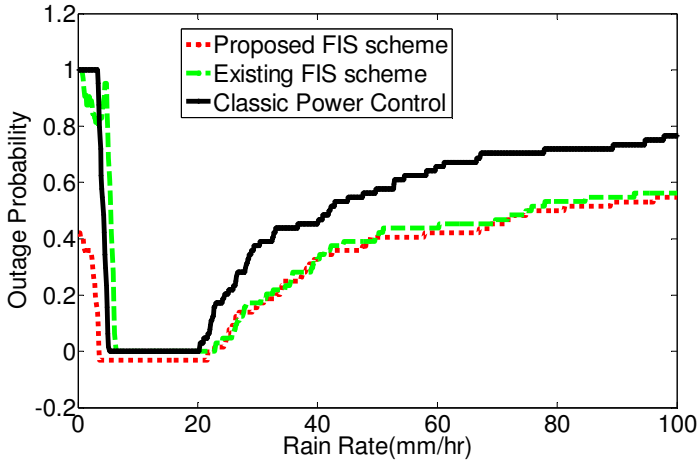
Εικόνα 3.17. Πιθανότητα αποκοπής για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 42 GHz



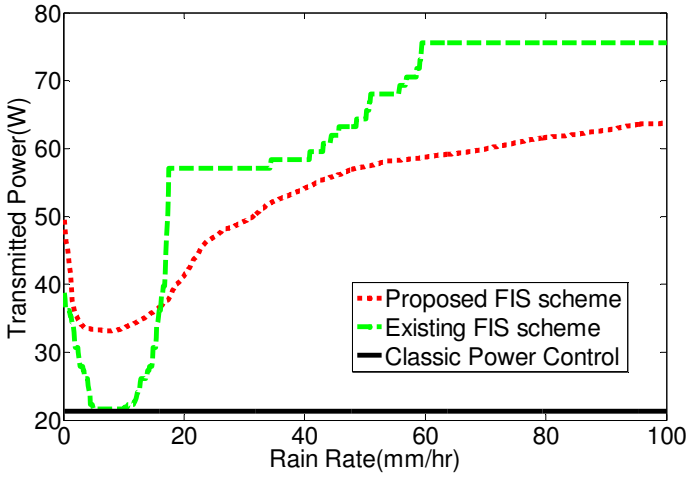
Εικόνα 3.18. Πιθανότητα αποκοπής σε δύο περιοχές για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz



Εικόνα 3.19. Ισχύς μετάδοσης σε δύο περιοχές για $SNIR_{th}$ = 25.5 dB και f = 28 GHz



Εικόνα 3.20. Σύγκριση πιθανότητας αποκοπής μεταξύ αλγορίθμων κατανομής ισχύος



Εικόνα 3.21. Σύγκριση καταναλισκόμενης ισχύος μεταξύ αλγορίθμων κατανομής ισχύος

Στις Εικόνες 3.18 και 3.19 εξετάζουμε την απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου κατανομής ισχύος σε δύο περιοχές με διαφορετικές κλιματολογικές συνθήκες: την Αθήνα και το Τόκυο. Η Αθήνα είναι μια τυπική Μεσογειακή περιοχή και το Τόκυο μια υποτροπική περιοχή. Για την Αθήνα λοιπόν θεωρούμε όσον αφορά την PCF a = 0.5, b = 16, c = 0.5, d = 5, ενώ για το Τόκυο a =

0.7, b = 125, c = 0.5, d = 7. Οι καμπύλες που προκύπτουν φαίνονται στην Εικόνα 3.14 (μπλε και μαύρη γραμμή αντίστοιχα). Όπως ήταν αναμενόμενο, η καμπύλη που αντιστοιχεί στο Τόκυο κατανέμει πολύ περισσότερη ισχύ καθώς η περιοχή πάσχει από βαριές βροχοπτώσεις. Το προτεινόμενο σχήμα λοιπόν προσαρμόζει την κατανάλωση ισχύος σε αυτές τις συνθήκες, καταλήγοντας σε πολύ μικρότερη κατανάλωση ισχύος για την Αθήνα (Εικόνα 3.19). Αντιθέτως, αφού ο κλασικός έλεγχος ισχύος δε διαφοροποιείται με βάση το κλίμα, κατανέμει σε όλες τις περιπτώσεις την ίδια ισχύ.

Τέλος, η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου συγκρίθηκε με αυτή του FIS σχήματος που περιγράφηκε στην Ενότητα 3.3.4. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις ο αλγόριθμος αυτός αποτυγχάνει να διατηρήσει ισχύ, αφού θεωρούνται μόνο δύο επίπεδα διαχωρισμού ισχύος. Σε γενικές γραμμές και οι δύο προσεγγίσεις καταλήγουν σε παρόμοιες πιθανότητες αποκοπής, ωστόσο ο προτεινόμενος αλγόριθμος καταφέρνει σε ορισμένες περιπτώσεις να μειώσει σημαντικά την καταναλισκόμενη ισχύ, με πολύ μικρή ποσοστιαία μείωση της πιθανότητας αποκοπής. Οι Εικόνες 3.20 και 3.21 δείχνουν μερικά συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των δύο αλγορίθμων για την Αθήνα. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν για διάφορους συνδυασμούς των $CNIR_{\mathrm{th}}$ και f, καθώς και για ποικίλες PCFs. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το προτεινόμενο FIS διαφοροποιεί την ισχύ ανάλογα με την τοποθεσία ώστε να ισοσταθμιστεί η πιθανότητα αποκοπής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διατηρείται ένα σημαντικό ποσό ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.4: ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟ FIS ΣΧΗΜΑ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CDMA ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ

3.4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενικευμένη μορφή του αλγορίθμου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.3. Στόχος είναι η προσαρμογή του ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί σε όλα τα συστήματα CDMA ευρείας ζώνης που λειτουργούν σε συχνότητες άνω των 10 GHz. Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα ευπαθή σε απώλειες βροχοπτώσεων και διακυψελικές παρεμβολές. Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί διάφορα σχήματα ελέγχου ισχύος, προκειμένου να ελαχιστοποιείται ο χρόνος αποκοπής. Το προτεινόμενο σχήμα CDFIS (Climate-Driven Fuzzy Inference System) βασίζεται στη διαφοροποίηση της κατανομής ισχύος ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες της υπό εξέταση περιοχής [30].

3.4.2 Συστήματα CDMA Ευρείας Ζώνης

Τυπικές αρχιτεκτονικές συστημάτων CDMA ευρείας ζώνης μπορούν να βρεθούν στις αναφορές [15][23][26]. Τα φαινόμενα διάδοσης σε υψηλές συχνότητες είναι διαφορετικά από αυτά που συναντώνται σε δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Οι απώλειες λόγω βροχοπτώσεων παρουσιάζουν σημαντική χωρική και χρονική διαφοροποίηση. Υποθέτουμε ότι οι απώλειες αυτές σε κάθε ζεύξη μεταξύ χρήστη και σταθμού βάσης μπορούν να εκφραστούν με lognormal κατανομή. Οι στατιστικές τους παράμετροι βασίζονται στο μήκος της ζεύξης, τη συχνότητα λειτουργίας και την κατανομή των ρυθμών βροχόπτωσης στη συγκεκριμένη περιοχή. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν οι πίνακες της ITU-R [31] για τους υπολογισμούς.

Ο σηματοπαρεμβολικός λόγος υπό συνθήκες καθαρού ουρανού CIR_{cs}(dB) μπορεί να υπολογιστεί για κάθε χρήστη μέσα από τις ακόλουθες εξισώσεις, δεδομένου ότι δύο σταθμοί βάσης προκαλούν την κύρια παρεμβολή [156][26]

$$CIR_{cs}(dB) = -10\log\left[10^{-CIR_{cs,1}/10} + 10^{-CIR_{cs,2}/10}\right] \tag{3.37}$$

$$CIR_{cs,j}(dB) = 10\log\left[\left(SG/K_j\right)\left(d_{Wi}/d_{Ij}\right)^2\right] + \left[G_{R,U}\left(0^o\right) - G_{R,U}\left(\theta_j\right)\right] \tag{3.38}$$

όπου d_{Wi} (km) είναι η απόσταση της ζητούμενης διαδρομής μεταξύ του *i*-οστού χρήστη και του σταθμού βάσης, d_{Iji} (km) είναι η απόσταση μεταξύ του *i*-οστού χρήστη και των παρεμβαλλόντων σταθμών βάσης, K_j (j=1,2) είναι οι ενεργοί χρήστες στους τομείς, *SG* είναι το κέρδος διασποράς και $G_{R,U}\left(\theta\right)$ είναι το κέρδος κατευθυντικότητας της κεραίας του *i*-οστού χρήστη.

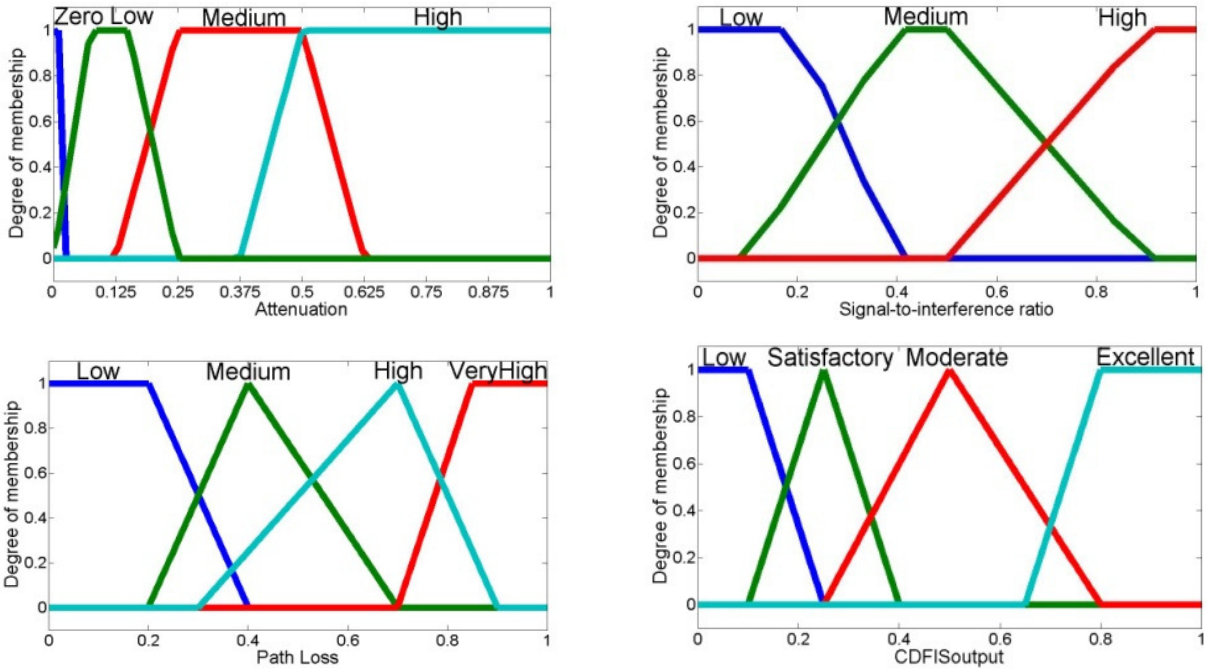
Η μέση πιθανότητα αποκοπής για κάθε τομέα υπολογίζεται όπως στην αναφορά [26], αλλά με διαφορετικούς λόγους σήματος προς θόρυβο και παρεμβολή [23].

$$\text{Average P}_{\text{outage}} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} P\left[CNIR_i < CNIR_{th}\right] \tag{3.39}$$

$$CNIR_i = CNR_{Wcs,i} - A_{Wi} - 10\log\left(1 + 10^{\frac{INR_{cs,1} - A_{I1i}}{10}} + 10^{\frac{INR_{cs,2} - A_{I2i}}{10}}\right) \tag{3.40}$$

$$CNR_{Wcs,i} = 10\log\left(P_{Wcs,i} / N\right),\ INR_{cs,j} = 10\log\left(P_{Ics,ji} / N\right) \tag{3.41}$$

$P_{Wcs,i}$, $P_{Ics,ji}$ είναι η λαμβανόμενη ισχύς από το ζητούμενο και τον παρεμβάλλον σταθμό βάσης, M είναι ο αριθμός των χρηστών σε κάθε τομέα, $N(dBW)$ είναι η λαμβανόμενη ισχύς θορύβου, A_{Wi}, A_{I1i}, A_{I2i} (dB) είναι οι τυχαίες μεταβλητές των απωλειών βροχόπτωσης που υπολογίζονται από τις τιμές του ρυθμού βροχοπτώσεων. Τέλος, το κατώφλι $CNIR_{th}$ εξαρτάται από την κωδικοποίηση και τις προδιαγραφές ποιότητας υπηρεσίας [32].



Εικόνα 3.22. Συναρτήσεις Συμμετοχής για τις εισόδους και την έξοδο του CDFIS

3.4.3 Περιγραφή FIS Σχήματος

Το προτεινόμενο FIS έχει ως κριτήρια τις ακόλουθες παραμέτρους για κάθε χρήστη:

- Την εκτιμώμενη απώλεια βροχοπτώσεων για τη ζητούμενη και τις παρεμβάλλουσες ζεύξεις
- Τη ντετερμινιστική απώλεια μονοπατιού της ζητούμενης ζεύξης
- Το σηματοπαρεμβολικό λόγο υπό συνθήκες καθαρού ουρανού

Οι προβλεπόμενες τιμές των απωλειών βροχόπτωσης υπολογίζονται για ένα συγκεκριμένο ποσοστό χρόνου από τα στατιστικά των ρυθμών βροχοπτώσεων. Η έξοδος του FIS $CDFIS_{output}$ είναι ένας καθαρός αριθμός που λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,1]. Ο Πίνακας 3.5 συγκεντρώνει τους

κανόνες της μηχανής συμπερασμού, ενώ η Εικόνα 3.22 απεικονίζει όλες τις συναρτήσεις συμμετοχής που χρησιμοποιήθηκαν. Σημειώνεται ότι όλες οι συναρτήσεις συμμετοχής λαμβάνουν ως είσοδο κανονικοποιημένες τιμές. Με τον τρόπο αυτό η εμβέλεια των τιμών μπορεί να αλλάξει χωρίς να απαιτείται επανασχεδιασμός των συναρτήσεων συμμετοχής.

Rain Attenuation	**Clear Sky CIR**	**Deterministic Path Loss**	**$CDFIS_{output}$**
Zero	High	Low/ Medium/ High	Excellent
Zero	High	Very High	Moderate
Zero	Medium	Low/ Medium	Excellent
Zero	Medium	High	Moderate
Zero	Medium	Very High	Satisfactory
Zero	Low	Low	Excellent
Zero	Low	Medium	Moderate
Zero	Low	High	Satisfactory
Zero/ Low	Low	Very High	Satisfactory
Low	High	Low/ Medium	Excellent
Low	High	High/ Very High	Moderate
Low	Medium	Low/ Medium	Excellent
Low	Medium	High/ Very High	Moderate
Low	Low	Low/ Medium	Excellent
Low	Low	High	Moderate
Medium	High	Low/ Medium	Satisfactory
Medium	High	High/ Very High	Low
Medium	Medium	Low	Satisfactory
Medium	Medium	Medium/ High/ Very High	Low
Medium	Low	Low/Medium/High/ Very High	Low
High	Low/Medium/High	Low/Medium/High/ Very High	Low

Πίνακας 3.5. Κανόνες του CDFIS

Η ισχύς μετάδοσης ενός σταθμού βάσης για τον *i*-οστό χρήστη αναπροσαρμόζεται με βάση την ακόλουθη έκφραση

$$P_{tr,i}\left(d_{Wi}\right) = PCF_i\left(CDFIS_{output}\right) \cdot P_D \tag{3.42}$$

όπου P_D είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να ανατεθεί σε έναν χρήστη και PCF_i είναι η συνάρτηση ελέγχου ισχύος (Power Control Function – PCF). Στον κλασικό έλεγχο ισχύος (classic power control - CPC), η PCF εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ χρήστη και σταθμού βάσης. Η προσέγγιση αυτή ωστόσο δεν αντικατοπτρίζει αποτελεσματικά τις ανάγκες των χρηστών για επιπλέον ισχύ, αφού χρήστες που ισαπέχουν από το σταθμό βάσης δεν πάσχουν απαραίτητα και από τις ίδιες απώλειες, εξαιτίας των χωρικών και προσωρινών διαφοροποιήσεων των καιρικών συνθηκών και της επίδρασης που έχουν στις διακυψελικές παρεμβολές, των εμποδίων, του υψόμετρου, κτλ. Στην προτεινόμενη προσέγγιση η PCF εξαρτάται από το $CDFIS_{output}$ ως

$$PCF_i\left(CDFIS_{output,i}\right) = c_1 + c_2 \cdot \left(c_3 - CDFIS_{output,i}\right)^{c_4} \tag{3.43}$$

με τον περιορισμό $0 \le PCF_i\left(CDFIS_{output,i}\right) \le 1$. Αν η PCF λάβει τιμές μεγαλύτερες από 1 ή μικρότερες από 0 τότε θεωρούμε ως τιμή της το 1 και το 0 αντίστοιχα.

Η συγκεκριμένη συνάρτηση επιλέχτηκε επειδή η διαφοροποίηση των παραμέτρων μπορεί να αναπαραστήσει όλο το φάσμα των αλλαγών στο υπό εξέταση πρόβλημα. Οι παράμετροι c_k $(k = 1, 2, 3, 4)$ εξαρτώνται από τις κλιματολογικές συνθήκες της τοποθεσίας του δικτύου και μπορούν να προσαρμοστούν προκειμένου να αντικατοπτρίζουν τα χαρακτηριστικά κάθε σεναρίου εφαρμογής. Οι παράμετροι της PCF μπορούν να βελτιστοποιηθούν προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα προκαθορισμένο ελάχιστο κατώφλι πιθανότητας αποκοπής με την ελάχιστη δυνατή συνολική ισχύ για όλες τις πιθανές τιμές απωλειών βροχόπτωσης της ζητούμενης και των παρεμβαλλόντων ζεύξεων. Η βελτιστοποίηση μπορεί να επιτευχθεί επιλύοντας το παρακάτω πρόβλημα ελαχιστοποίησης

$$\begin{aligned} &\min\ P_{tr,total} = \sum_{i=1}^{M} P_{tr,i},\ \forall A_{Wi},\ \forall A_{I1i}, \forall A_{I2i} \\ &s.t.\ \ \text{Average}\,\mathrm{P}_{\text{outage}} \le P_{outage_threshold} \end{aligned} \tag{3.44}$$

υπολογιζόμενο για όλες τις πιθανές τιμές απωλειών βροχόπτωσης, ανάλογα με την υπό εξέταση περιοχή. Η αντικειμενική συνάρτηση $P_{tr,total}$ είναι μη γραμμική ως προς τις παραμέτρους c_k, ενώ οι απώλειες βροχόπτωσης επηρεάζουν τον μη γραμμικό περιορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης μέσα από τις εξισώσεις (3.38)-(3.40). Το παραπάνω μη γραμμικό πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας ευριστικές μεθόδους όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι [33] ή η Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων [34], που είναι διαθέσιμες στα πακέτα *Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox* και *Particle Swarm Optimization Toolbox* του Matlab αντίστοιχα.

Έχοντας πραγματοποιήσει ποικίλους αριθμητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιώντας τους χάρτες βροχοπτώσεων της ITU και διάφορες συχνότητες, προτείνουμε τις παρακάτω γενικές τιμές για τις μεταβλητές c_k με βάση τις μακροπρόθεσμες κλιματολογικές συνθήκες:

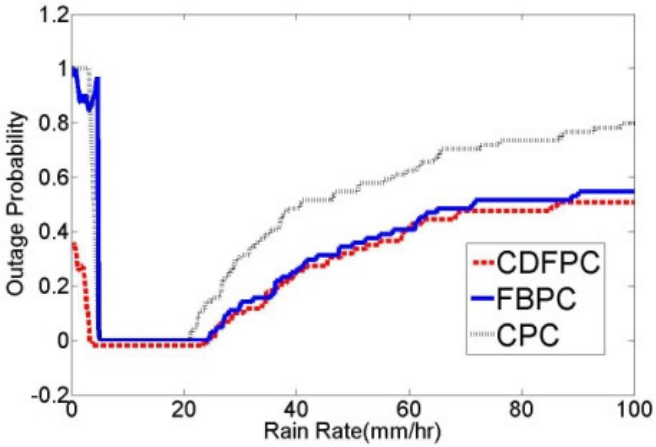
$$c_k = \begin{cases} (0.1,\ 0.2,\ 0.7,\ 3),\ \text{light rain climatic regions} \\ (0.3,\ 1.6,\ 0.8, 3),\ \text{moderate rain climatic regions} \\ (0.8,\ 125,\ 0.8,\ 9),\ \text{heavy rain climatic regions} \end{cases} \tag{3.45}$$

Οι τιμές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους αριθμητικούς υπολογισμούς. Για ακριβή προσδιορισμό των παραμέτρων, ο σχεδιαστής του συστήματος πρέπει να λύσει το πρόβλημα βελτιστοποίησης της εξίσωσης (3.44), εισάγοντας τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δικτύου (γεωμετρία, πιθανές τιμές απωλειών βροχόπτωσης, κατώφλι πιθανότητας αποκοπής, κτλ). Η κατανομή ισχύος είναι μεγαλύτερη σε περιοχές με πιο βαριές βροχοπτώσεις, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις επιτυγχάνεται η ίδια πιθανότητα αποκοπής με τον υπάρχοντα αλγόριθμο, καταναλώνοντας ωστόσο λιγότερη ισχύ. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βασίζεται κυρίως στην

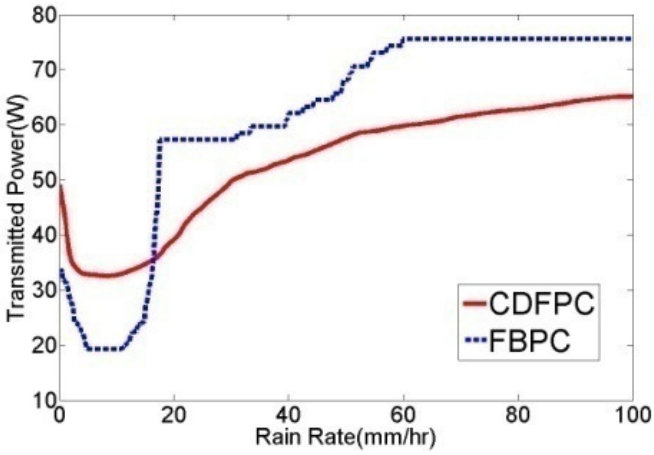
πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης απώλειας βροχόπτωσης που εισάγεται στη ζητούμενη και τις παρεμβάλλουσες ζεύξεις.

3.4.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα

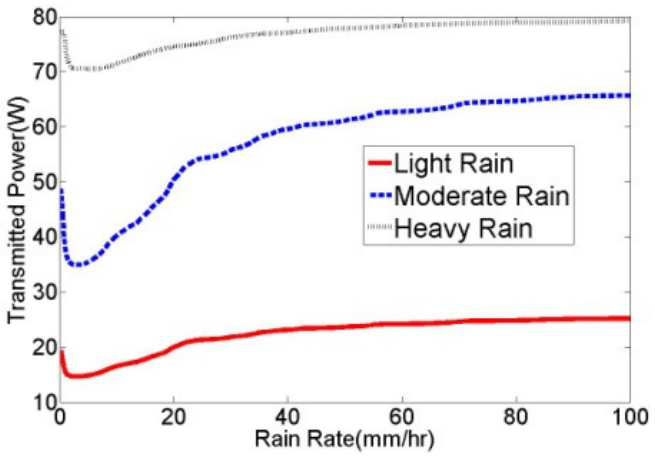
Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου για διάφορα σενάρια προσομοίωσης. Θεωρούμε ένα υποθετικό δίκτυο ασύρματης πρόσβασης CDMA που λειτουργεί σε συχνότητα f = 28GHz και ακτίνα κυψέλης 5km. Ως περιοχή εξέτασης επιλέγουμε την Αθήνα, που χαρακτηρίζεται από μέτριες βροχοπτώσεις. Όσον αφορά στις ντετερμινιστικές απώλειες διαδρομών, θεωρούμε το μοντέλο απωλειών ελευθέρου χώρου υποθέτοντας συνθήκες LOS ανάμεσα στο σταθμό βάσης και τους χρήστες [15][26]. Για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής θεωρούμε το κατώφλι $CNIR_{th}$ = 25.5dB. Τα αριθμητικά αποτελέσματα παράγονται για μια ποικιλία ρυθμών βροχόπτωσης, από 0 έως 100 mm/hr, ενώ οι αντίστοιχες τιμές των απωλειών βροχόπτωσης υπολογίζονται για το 0.01% του χρόνου [24].



Εικόνα 3.23. Μέση πιθανότητα αποκοπής ανά ρυθμό βροχόπτωσης (περιοχή με μέτριες βροχοπτώσεις).



Εικόνα 3.24. Συνολική ισχύς μετάδοσης ανά ρυθμό βροχόπτωσης (περιοχή με μέτριες βροχοπτώσεις).



Εικόνα 3.25. Συνολική ισχύς μετάδοσης ανά ρυθμό βροχόπτωσης για διάφορες περιοχές

Η απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου CDFPC (climate-driven fuzzy power control) συγκρίνεται με αυτή του κλασικού ελέγχου ισχύος CPC (classic power control) που στηρίζεται στην απόσταση, καθώς και αυτή του υπάρχοντος ασαφούς σχήματος FBPC που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 3.3.4 [26]. Δεδομένου ότι τα CPC και FBPC δε διαφοροποιούνται ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες , οδηγούν σε ίδια κατανάλωση ισχύος από το σταθμό βάσης ανεξαρτήτως της περιοχής. Στις Εικόνες 3.23 και 3.24 παρουσιάζονται αποτελέσματα για τη μέση πιθανότητα αποκοπής και τη συνολική ισχύ μετάδοσης. Όπως παρατηρούμε από την Εικόνα 3.23, το CDFPC επιτυγχάνει ελαφρώς μικρότερη πιθανότητα αποκοπής από το FBPC. Ταυτόχρονα όμως το CDFPC οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ισχύος για το σταθμό βάσης και άρα σε μια πιο αποδοτική κατανομή ισχύος (Εικόνα 3.24).

Για τα παραπάνω αποτελέσματα χρησιμοποιήσαμε τις παραμέτρους για περιοχές με μέτριες βροχοπτώσεις (εξίσωση (3.45)). Για περιοχές με λίγες ή πολλές βροχοπτώσεις (υποτροπικές και τροπικές περιοχές) χρησιμοποιούνται οι άλλες παράμετροι της εξίσωσης (3.45). Η Εικόνα 3.25 απεικονίζει την κατανάλωση ισχύος του σταθμού βάσης για διάφορες κλιματολογικές συνθήκες και για διαφορετική συχνότητα f=42GHz. Όπως ήταν αναμενόμενο, η επιλεγμένη *PCF* κατανέμει ολοένα και περισσότερη ισχύ όσο η περιοχή υπό εξέταση υποφέρει από πιο βαριές βροχοπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.5: ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΕΙΑΣ ΖΩΝΗΣ

3.5.1 Έλεγχος Ισχύος σε Δορυφορικά Δίκτυα

Οι μπάντες συχνοτήτων πάνω από 10GHz (Ku, Ka και V ζώνες) χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα δορυφορικά επικοινωνιακά δίκτυα που χρησιμοποιούν τα πρωτόκολλα DVB-S2/RCS [35][36]. Μια πολύ σημαντική παράμετρος κατά τη σχεδίαση αξιόπιστων δορυφορικών δικτύων είναι η ποσοτικοποίηση της επίδρασης των τροποσφαιρικών φαινομένων διάδοσης πάνω στην πιθανότητα αποκοπής των δορυφορικών ζεύξεων. Σε αυτό το φάσμα η απόδοση του συστήματος υποβαθμίζεται κυρίως λόγω των απωλειών βροχόπτωσης [37].

Μια από τις πιο σημαντικές τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων είναι ο έλεγχος ισχύος. EIRP (effective isotropic radiated power). Ο ελεγκτής άμβλυνσης διαλείψεων EIRP μεταβάλλει είτε την ισχύ εκπομπής είτε το κέρδος της κεραίας προκειμένου να αντισταθμίσει τις απώλειες σήματος εξαιτίας των τροποσφαιρικών φαινομένων διάδοσης. Η προσαρμογή της ισχύος μπορεί να επιτευχθεί είτε από τον σταθμό εκπομπής (uplink power control - ULPC) είτε από το δορυφορικό αναμεταδότη (downlink power control - DLPC) [37]. Στην περίπτωση των παθητικών δορυφορικών αναμεταδοτών, ο έλεγχος ισχύος στοχεύει στο να καθορίσει την ισχύ και της άνω και της κάτω ζεύξης, αντισταθμίζοντας έτσι τις απώλειες μετάδοσης και στις δύο ζεύξεις. Ο έλεγχος ισχύος άνω ζεύξης ULPC επιτυγχάνεται ρυθμίζοντας την ισχύ εκπομπής του σταθμού βάσης έτσι ώστε το λαμβανόμενο σήμα στο δορυφόρο να μην πέφτει κάτω από ένα κατώφλι.

Στο Κεφάλαιο αυτό προτείνεται ένα σχήμα ελέγχου ισχύος για δορυφορικά δίκτυα που βασίζεται σε ασαφή λογική (fuzzy-based uplink power control – FBPC). Η ποιότητα της ζεύξης από άκρη σε άκρη υπολογίζεται μέσω του FIS και με βάση αυτή την εκτίμηση ο σταθμός εκπομπής αυξάνει ή μειώνει την ισχύ εκπομπής ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα αποκοπής με ταυτόχρονη αποδοτικότητα ενέργειας. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται η ασαφής λογική στα δορυφορικά δίκτυα είναι επειδή υπάρχει αβεβαιότητα στα φαινόμενα διάδοσης και τον υπολογισμό των απωλειών βροχόπτωσης. Κατά συνέπεια, τεχνικές άμβλυνσης διαλείψεων που βασίζονται σε ακριβείς τιμές μπορεί να αποτύχουν αν οι εκτιμήσεις/προβλέψεις αποδειχτούν ανακριβείς.

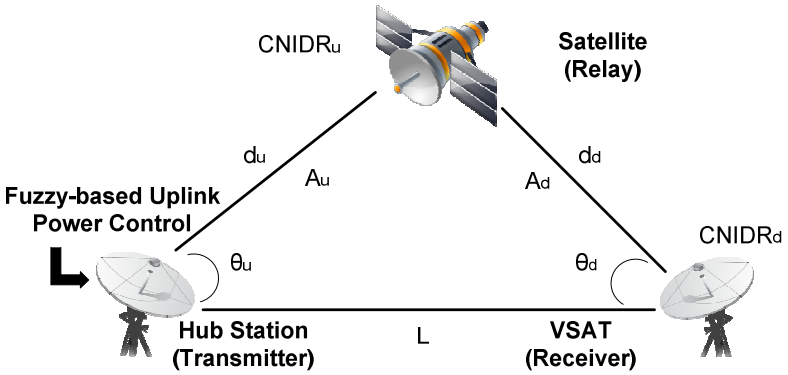
3.5.2 Μοντέλο Συστήματος

Στην Εικόνα 3.26 ο πομπός (T) επικοινωνεί με τον δέκτη (R) μέσω του δορυφορικού αναμεταδότη (S), δημιουργώντας μια ζεύξη δύο βημάτων. Η απόσταση ανάμεσα στον T και τον R είναι L [km], ενώ οι αποστάσεις T-S και S-R συμβολίζονται ως d_u [km] και d_d [km] αντίστοιχα. Τα δύο μικροκυματικά μονοπάτια σχηματίζουν τις γωνίες ανύψωσης θ_u και θ_d αντίστοιχα.

Ο σηματοθορυβικός λόγος υπό συνθήκες καθαρού ουρανού [dB] για ένα σύστημα μονής πόλωσης υπολογίζεται για την άνω και κάτω ζεύξη ως

$$CNR_{j,cs} = P_j + G_{j,s} + G_{j,d} - 20\log\left(\frac{4\pi d_j}{\lambda}\right) - 10\log\left(kT_jB\right) \quad , (j = u, d) \tag{3.46}$$

Στην προηγούμενη εξίσωση P_j [dBW] είναι η μεταδιδόμενη ισχύς του μονοπατιού j. Τα κέρδη κεραιών της πηγής και του προορισμού του βήματος j συμβολίζονται ως $G_{j,s}$ [dBi] και $G_{j,d}$ [dBi] αντίστοιχα. Το μήκος κύματος είναι λ, $k = 1.38\text{x}10^{-23}$ [J/K] είναι η σταθερά Boltzmann, B [Hz] είναι το εύρος ζώνης και Tj [K] είναι ο θόρυβος θερμοκρασίας του δέκτη στο μονοπάτι j. Οι απώλειες βροχόπτωσης σε δορυφορικές ζεύξεις μπορούν να υπολογιστούν είτε με τη σύσταση ITU-R P.618-12 [38] είτε με μαθηματικά μοντέλα βασιζόμενα σε στατιστικά βροχοπτώσεων για κάθε περιοχή του κόσμου [39][40].



Εικόνα 3.26. Δορυφορική ζεύξη με ένα αναμεταδότη

Οι λόγοι σήματος προς θόρυβο (Carrier-to-Noise Ratio) CNR_u και CNR_d υπολογίζονται από την εξίσωση (3.46) και οι απώλειες βροχόπτωσης θεωρούνται γνωστές ή μπορούν να υπολογιστούν από τα μοντέλα που περιγράφονται στις αναφορές [38][39][40]. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο, αποπόλωση και παρεμβολή (Carrier-to-Noise-and-Interference-and-Depolarization Ratio) CNIDR για συστήματα διπλής πόλωσης υπολογίζεται από τις εξισώσεις (3.47) και (3.48). Οι λόγοι παρεμβολής προς θόρυβο (Interference-to-Noise Ratio) για κάθε ζεύξη $INR_{u,cs}$, $INR_{d,cs}$ θεωρούνται γνωστοί εκ των προτέρων. Οι λόγοι *CNIDR*s για την άνω και κάτω ζεύξη δίνονται από:

$$CNIDR_u = CNR_{u,cs} - A_u - 10\cdot\log\left(1 + 10^{\frac{INR_{up}}{10}} + 10^{\frac{CNR_{u,cs} - A_u - XPD(A_u)}{10}}\right) \tag{3.47}$$

$$CNIDR_d = CNR_{d,cs} - A_d - 10\cdot\log\left(1 + 10^{\frac{INR_{down}}{10}} + 10^{\frac{CNR_{d,cs} - A_d - XPD(A_d)}{10}}\right) \tag{3.48}$$

όπου *XPD* είναι η εξασθένιση αντίθετης πόλωσης (Cross Polarization Discrimination), η οποία εξαρτάται από τις απώλειες βροχόπτωσης στη δορυφορική ζεύξη, τη γωνία πόλωσης, τη συχνότητα και την ανύψωση [38]. Η *XPD* ορίζεται ως ο λόγος της μέσης λαμβανόμενης ισχύς ίδιας πόλωσης

προς τη μέση λαμβανόμενη ισχύ αντίθετης πόλωσης. Εξαιτίας της *XPD,* όταν μια οριζόντια πολωμένη κεραία λαμβάνει ένα σήμα από μια κάθετα πολωμένη κεραία (και αντίστροφα), τότε η δύναμη του σήματος μειώνεται κατά μερικά dBs. Όσο μεγαλύτερη είναι η *XPD*, τόσο λιγότερη ενέργεια αποθηκεύεται ανάμεσα στα κανάλια αντίθετης πόλωσης. Για το σύστημα απλής πόλωσης, δηλαδή για $XPD \to \infty$, ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις για τους λόγους *CNIR*s:

$$CNIR_u = CNR_{u,cs} - A_u - 10\log\left(1 + 10^{\frac{INR_{up}}{10}}\right) \tag{3.49}$$

$$CNIR_d = CNR_{d,cs} - A_d - 10\log\left(1 + 10^{\frac{INR_{down}}{10}}\right) \tag{3.50}$$

3.5.3 Υπολογισμός Πιθανότητας Αποκοπής

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκοπής θεωρούμε δύο σενάρια αναμετάδοσης: στην πρώτη περίπτωση ο δορυφόρος *S* είναι παθητικός και χρησιμοποιείται η τεχνική amplify-and-forward, ενώ στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιείται ενισχυτική αναμετάδοση με την τεχνική decode-and-forward.

3.5.3.1 Παθητικός Δορυφορικός Αναμεταδότης

Στο σενάριο αυτό ο αναμεταδότης *S* ενισχύει το λαμβανόμενο σήμα σε ένα καθορισμένο επίπεδο ισχύος και το αναμεταδίδει χωρίς αποκωδικοποίηση. Η συνολική υποβάθμιση του λόγου σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο σε dB από το δορυφορικό σύστημα δύο βημάτων (συμπεριλαμβανομένων των απωλειών βροχόπτωσης) υπολογίζεται ως [41][42]

$$CNIDR_{total} = -10\log\left(10^{\frac{-CNIDR_u}{10}} + 10^{\frac{-CNIDR_d}{10}}\right) \tag{3.51}$$

όπου $CNIDR_u$, $CNIDR_d$ δίνονται από τις εξισώσεις (3.47) and (3.48) αντίστοιχα. Για σύστημα μονής πόλωσης ο λόγος *CNIR* υπολογίζεται ως

$$CNIR_{total} = -10\log\left(10^{\frac{-CNIR_u}{10}} + 10^{\frac{-CNIR_d}{10}}\right) \tag{3.52}$$

όπου $CNIR_u$, $CNIR_d$ δίνονται από τις εξισώσεις (3.49) and (3.50) αντίστοιχα. Η πιθανότητα αποκοπής, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου που ο λόγος $CNIDR_{\text{total}}$ δεν ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο κατώφλι ώστε να εξασφαλίζεται αξιόπιστη μετάδοση της δορυφορικής ζεύξης είναι

$$P_{out} = \Pr\left[CNDIR_{total} < CNDIR_{th}\right] \tag{3.53}$$

όπου $CNIDR_{\text{th}}$ είναι προκαθορισμένο κατώφλι που εξαρτάται από την κωδικοποίηση και την τεχνική διαμόρφωση.

3.5.3.2 Αναγεννητικός Δορυφορικός Αναμεταδότης

Στο σενάριο της αναγέννησης σήματος ο αναμεταδότης S αποκωδικοποιεί το λαμβανόμενο σήμα και το αναμεταδίδει. Ο λόγος σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο δεν μπορεί να οριστεί στην περίπτωση αυτή, ωστόσο η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως [41]

$$P_{out} = 1 - P_{avail} \tag{3.54}$$

όπου P_{avail} είναι η πιθανότητα να είναι διαθέσιμο το σύστημα και ορίζεται ως

$$P_{avail} = \Pr\left[CNIDR_u > CNIDR_{th1}, CNIDR_d > CNIDR_{th2}\right] \tag{3.55}$$

Στην περίπτωση του συμμετρικού σεναρίου, όπου $CNIDR_{th1} = CNIDR_{th2} = CNIDR_{th}$, η προηγούμενη σχέση απλοποιείται και η πιθανότητα αποκοπής υπολογίζεται ως

$$P_{out} = \Pr[\min(CNIDR_u, CNIDR_d) < CNIDR_{th}] \tag{3.56}$$

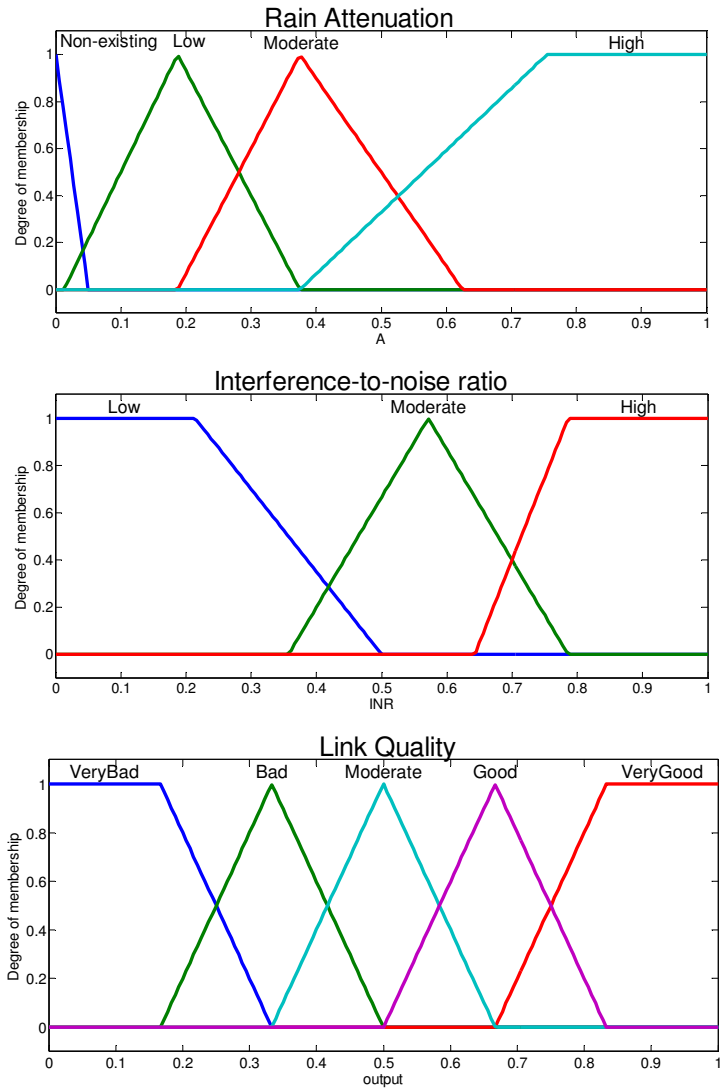
3.5.4 Περιγραφή FIS Σχήματος

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε το προτεινόμενο FIS σχήμα για τη βελτίωση της επίδοσης του δορυφορικού συστήματος προσαρμόζοντας την ισχύ του πομπού για την άνω ζεύξη. Το προτεινόμενο FIS, που καλείται FBPC (fuzzy-based uplink power control) λαμβάνει ως κριτήρια απόφασης τις παρακάτω τέσσερις παραμέτρους

- Τις απώλειες βροχόπτωσης στην άνω ζεύξη A_u
- Τις απώλειες βροχόπτωσης στην κάτω ζεύξη A_d
- Το λόγο παρεμβολής προς θόρυβο στην άνω ζεύξη INR_{up}
- Το λόγο παρεμβολής προς θόρυβο στην κάτω ζεύξη INR_{down}

Οι παρεμβολές μπορεί να οφείλονται είτε σε γειτονικά δορυφορικά/επίγεια δίκτυα που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα είτε σε γειτονικά κανάλια. Χρησιμοποιήσαμε ως κριτήρια τις τιμές των απωλειών βροχόπτωσης και όχι τα ποσοστά βροχόπτωσης, ώστε να αποφύγουμε τη χρήση μοντέλου πρόβλεψης απωλειών βροχόπτωσης που παράγει αβέβαια αποτελέσματα. Όλες οι είσοδοι του FIS μετρώνται σε dBs και μετατρέπονται σε λεκτικές περιγραφές μέσω κατάλληλων κλιμάκων μετατροπής, που έχουν κατασκευαστεί με πειραματικά δεδομένα από τις βάσεις δεδομένων της ITU-R [43] και μοντέλα της European Space Agency [44].

Οι κλίμακες μετατροπής που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στην Εικόνα 3.27. Κάθε είσοδος κανονικοποιείται με βάση τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή που καταγράφεται, ώστε τελικά όλες οι είσοδοι βρίσκονται στο διάστημα [0,1]. Οι συναρτήσεις συμμετοχής διαφοροποιούνται ανάλογα με τη συχνότητα. Οι συγκεκριμένες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συχνότητες στις ζώνες 20/30GHz και 40/50GHz. Η έξοδος του FIS q_l είναι ένας καθαρός αριθμός που εκφράζει την ποιότητα της ζεύξης, όπου $0 \leq q_l \leq 1$.



Εικόνα 3.27. Κλίμακες μετατροπής του FIS

Γενικά ο αριθμός κανόνων που απαιτείται είναι N^M, όπου N είναι ο αριθμός των λεκτικών μεταβλητών και M είναι ο αριθμός των κριτηρίων. Για το συγκεκριμένο FIS αυτό σημαίνει ότι ο μέγιστος αριθμός είναι 4^2x3^2= 144 κανόνες, αφού δύο από τις παραμέτρους εισόδου έχουν τέσσερις λεκτικές μεταβλητές, ενώ οι άλλες δύο παράμετροι έχουν τρεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις αρκεί ένα υποσύνολο αυτών των κανόνων. Για το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν 87 κανόνες, οι οποίοι συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.6.

Aup	***Ad***	***INRup***	***INRdown***	q_l
Non-existing	Non-existing	Low	Low	Moderate
Non-existing	Non-existing	Low	High	Very Good
Non-existing	Non-existing	High	Low	Very Good
Non-existing	Non-existing	Moderate	Moderate	Very Good
Non-existing	Non-existing	Moderate	High	Good
Non-existing	Non-existing	High	Moderate	Good
Non-existing	Low	Low	Low	Moderate
Non-existing	Low	Moderate	Moderate	Good
Non-existing	Low	Moderate	High	Good
Non-existing	Low	High	High	Bad
Non-existing	Low	High	Moderate	Good

Non-existing	Moderate	Low	Low	Good
Non-existing	Moderate	Low	High	Bad
Non-existing	Moderate	Moderate	Moderate	Bad
Non-existing	Moderate	Moderate	High	Very Bad
Non-existing	Moderate	High	Moderate	Very Bad
Non-existing	High	Low	Low	Very Good
Non-existing	High	Moderate	Moderate	Bad
Non-existing	High	Moderate	High	Good
Non-existing	High	High	High	Very Bad
Non-existing	High	High	Moderate	Bad
Low	Non-existing	Low	Low	Moderate
Low	Non-existing	Moderate	Moderate	Good
Low	Non-existing	Moderate	High	Good
Low	Non-existing	High	High	Bad
Low	Non-existing	High	Moderate	Good
Moderate	Non-existing	Low	Low	Good
Moderate	Non-existing	Low	High	Bad
Moderate	Non-existing	Moderate	Moderate	Bad
Moderate	Non-existing	Moderate	High	Very Bad
Moderate	Non-existing	High	Moderate	Very Bad
High	Non-existing	Low	Low	Very Good
High	Non-existing	Moderate	Moderate	Bad
High	Non-existing	Moderate	High	Good
High	Non-existing	High	High	Very Bad
High	Non-existing	High	Moderate	Bad
Low	Low	Low	Low	Moderate
Low	Low	Low	High	Very Good
Low	Low	High	Low	Good
Low	Low	Moderate	High	Good
Low	Low	High	Moderate	Bad
Low	Moderate	Low	Low	Moderate
Low	Moderate	High	High	Bad
Low	Moderate	Moderate	High	Good
Low	Moderate	High	Moderate	Good
Moderate	Moderate	Low	Low	Moderate
Moderate	Low	High	High	Bad
Moderate	Low	Moderate	High	Good
Moderate	Low	High	Moderate	Good
Low	High	Low	Low	Good
Low	High	High	High	Very Bad
Low	High	Moderate	High	Bad
Low	High	High	Moderate	Bad
Low	High	Low	High	Bad
High	Low	Low	Low	Good
High	Low	High	High	Very Bad
High	Low	Moderate	High	Bad
High	Low	High	Moderate	Bad
High	Low	Low	High	Bad
Moderate	High	Low	Low	Good
Moderate	High	Low	Moderate	Good
Moderate	High	Moderate	Moderate	Bad
Moderate	High	Moderate	High	Very Bad
Moderate	High	High	Moderate	Very Bad
Moderate	High	High	High	Bad
Moderate	High	Low	High	Good
High	Moderate	Low	Low	Good
High	Moderate	Low	Moderate	Good
High	Moderate	Moderate	Moderate	Bad
High	Moderate	Moderate	High	Very Bad
High	Moderate	High	Moderate	Very Bad
High	Moderate	High	High	Bad
High	Moderate	Low	High	Good
Moderate	Moderate	Low	Low	Good

Moderate	Moderate	Low	Moderate	Good
Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	Bad
Moderate	Moderate	Moderate	High	Very Bad
Moderate	Moderate	High	Moderate	Very Bad
Moderate	Moderate	High	High	Very Bad
Moderate	Moderate	Low	High	Bad
High	High	Low	Low	Good
High	High	Low	Moderate	Bad
High	High	Moderate	Moderate	Very Bad
High	High	Moderate	High	Very Bad
High	High	High	Moderate	Very Bad
High	High	High	High	Very Bad
High	High	Low	High	Very Bad

Πίνακας 3.6. Κανόνες του προτεινόμενου FIS

3.5.5 Αλγόριθμος Κατανομής Ισχύος

Η προσαρμοσμένη ισχύς μετάδοσης P_t^{adj} [Watt] υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση

$$P_t^{adj}(q_l) = P_t + c_1 \cdot \left(c_2 - q_l\right)^{c_3} \tag{3.57}$$

Η αρχική ισχύς μετάδοσης P_t [Watt] μπορεί είτε να μειωθεί είτε να αυξηθεί, ανάλογα με την τιμή του q_l. Για το λόγο αυτό το c_3 πρέπει πάντα να έχει μονή τιμή. Κατά συνέπεια, αν $q_l < c_2$ η ισχύς αυξάνεται, ενώ αν $q_l > c_2$ η ισχύς μειώνεται. Με βάση την ελάχιστη και μέγιστη ισχύ που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα προσδιορίζονται οι τιμές των c_1, c_2 και c_3 ώστε να επιτευχθεί βελτιστοποίηση.

Οι παράμετροι της εξίσωσης (3.57) βελτιστοποιούνται για να παρέχουν ένα βέλτιστο *CNIDR* κατώφλι $\mathrm{CNIDR}_{th,opt}$ με την ελάχιστη κατανάλωση ισχύος για όλες τις τιμές απωλειών βροχόπτωσης και λόγων *INR* που εξετάζονται. Το κατώφλι αυτό πρέπει να καθοριστεί από το σχεδιαστή του συστήματος. Επίσης η αναπροσαρμοσμένη ισχύς P_t^{adj} πρέπει πάντα να βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια των τιμών ισχύος που μπορεί να υποστηρίξει το σύστημα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να επιλυθεί διαμορφώνεται λοιπόν ως

$$\begin{aligned} &\min\ P_{t,total} = \sum_{i=1}^{M} P_{t,i}^{\ adj},\ \forall A_u, A_d, INR_{up}, INR_{down} \\ &P_{t,\min} \le P_{t,i}^{\ adj} \le P_{t,\max} \\ &s.t.\ \ CNIDR_{avg} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} CNIDR_{total,i} \ge \mathrm{CNIDR}_{th,opt} \end{aligned} \tag{3.58}$$

που υπολογίζεται για *M* συνδυασμούς που προκύπτουν από όλες τις πιθανές τιμές των A_u, A_d, INR_{up}, INR_{down} υπό εξέταση. Στην προηγούμενη σχέση το $P_{t,i}^{\ adj}$ υπολογίζεται από την (3.57), το $CNIDR_{total,i}$ από την (3.51), $P_{t,\min} = P_t^{adj}(1)$ και $P_{t,\max} = P_t^{adj}(0)$. Για το συγκεκριμένο σύστημα θεωρήσαμε P_t = 100 W, $P_{t,min}$ = 70 W, $P_{t,max}$ = 200 W. Έπειτα από μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων προκύπτει ότι οι βέλτιστες τιμές για το συγκεκριμένο σύστημα είναι c_1 = 463, c_2 = 0.6, c_3 = 3.Το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μη γραμμικό και μπορεί να επιλυθεί με χρήση ευριστικών

αλγορίθμων, που είναι διαθέσιμοι στα Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox και Particle Swarm Optimization Toolbox του Matlab.

3.5.6 Αριθμητικά Αποτελέσματα

3.5.6.1 Σενάρια Προσομοίωσης

Στην παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε την απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου όσον αφορά το *CNIDR* και την καταναλισκόμενη ενέργεια για μια ποικιλία συνθηκών. Θεωρούμε την περίπτωση του παθητικού αναμεταδότη, όπου εφαρμόζεται ο έλεγχος ισχύος στην άνω ζεύξη.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε $CNR_{u,cs} = CNR_{d,cs} = 40$dB. Οι γωνίες ανύψωσης λαμβάνονται ίσες με φ=30° και θεωρούμε κυκλική πόλωση, ως δυσμενέστερο σενάριο [38]. Η συχνότητα της άνω ζεύξης είναι 30GHz και της κάτω ζεύξης 20GHz. Οι τιμές των απωλειών βροχόπτωσης που εξετάζονται είναι από 0 έως 30dB, που αντιστοιχούν σε μηδενικές έως μεγάλες απώλειες. Το *INR* λαμβάνει τιμές από -15dB έως 15dB, που αντιστοιχούν σε περιβάλλοντα αμελητέας έως μεγάλης παρεμβολής.

Σε κάθε περίπτωση θεωρούμε σταθερά τα δύο από τα τέσσερα κριτήρια, ενώ τα άλλα δύο παίρνουν σειριακά κάθε πιθανή τιμή μέσα στο ορισμένο εύρος τιμών. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζουμε τα παρακάτω τέσσερα σενάρια:

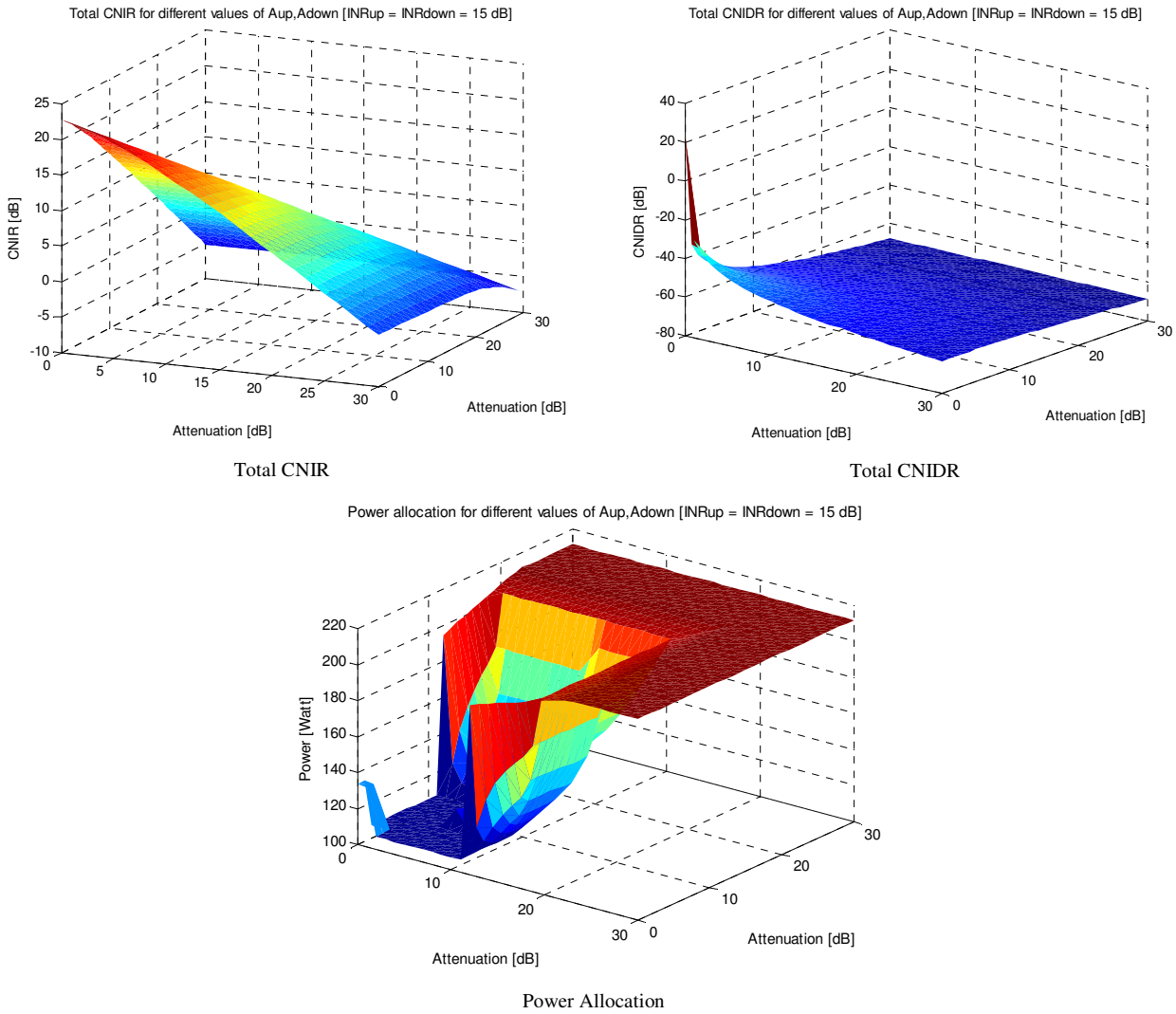
- **Σενάριο A:** INR_{up}=INR_{down}=15dB, που αντιστοιχεί σε περιβάλλον μεγάλων παρεμβολών. Εξετάζονται όλες οι τιμές των A_{up}, A_{down}.
- **Σενάριο B:** INR_{up}=-10dB, INR_{down}=-3dB, που αντιστοιχεί σε περιβάλλον μικρών παρεμβολών. Εξετάζονται όλες οι τιμές των A_{up}, A_{down}.
- **Σενάριο C:** INR_{up} = -10dB, A_d = 3dB, που αντιστοιχεί σε σενάριο με χαμηλή παρεμβολή στην άνω ζεύξη και τυπικές απώλειες βροχόπτωσης στην κάτω ζεύξη. Εξετάζονται όλες οι τιμές των A_u, INR_{down}.
- **Σενάριο D:** A_u = 3dB, A_d = 5dB, που αντιστοιχεί σε σενάριο με μέτριες απώλειες βροχόπτωσης. Εξετάζονται όλες οι τιμές των INR_{up}, INR_{down}.

Για κάθε σενάριο εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία και υπολογίζονται η συνολικά καταναλισκόμενη ισχύς P_t^{adj} και ο συνολικός λόγος *CNIDR* (από τις εξισώσεις (3.51) και (3.57) αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στις Εικόνες 3.27-3.31.

3.5.6.2 Απόδοση του FBPC

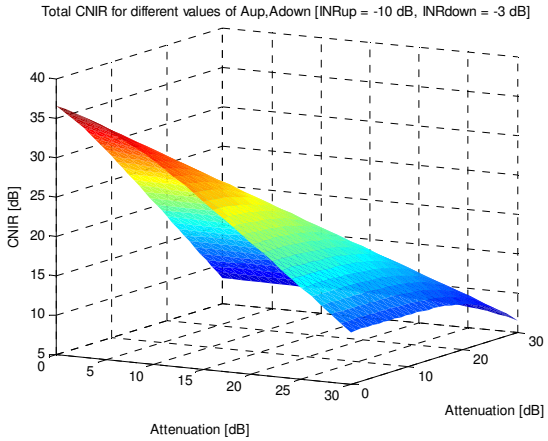
Η Εικόνα 3.28 συγκεντρώνει τα αποτελέσματα για το σενάριο A. Αρχικά εξετάζουμε τη συμπεριφορά ενός συστήματος μονής πόλωσης και υπολογίζουμε το λόγο *CNIR*, του οποίου η μέγιστη τιμή παρατηρούμε ότι φτάνει τα 22.5dB, ενώ στη χειρότερη δυνατή περίπτωση ($A_{\mathrm{u}} = A_d$ =

30dB) φτάνει τα 7dB. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι η στατιστική εξάρτηση των λόγων INR λόγω φαινομένων διάδοσης δε λαμβάνεται υπόψη σε αυτή τη μελέτη. Ο συνολικός λόγος *CNIDR* του συστήματος διπλής πόλωσης έχει μέγιστη τιμή 20dB για μικρές απώλειες βροχόπτωσης και ελάχιστη τιμή -68dB. Επιπλέον, μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι το σύστημα σταδιακά αναθέτει περισσότερη ισχύ καθώς οι τροποσφαιρικές συνθήκες γίνονται δυσμενέστερες, μέχρι που ανατίθεται το όριο των 200W.

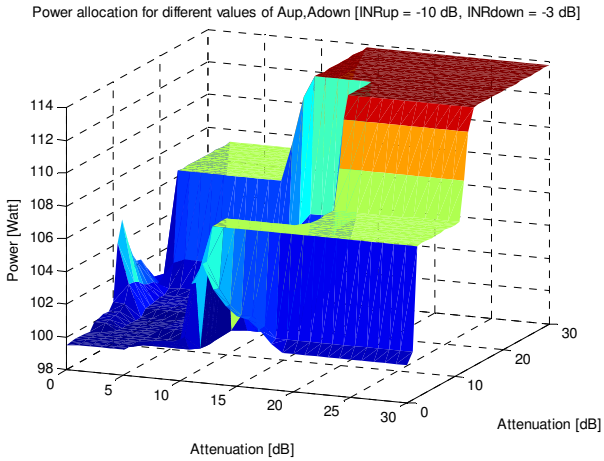


Εικόνα 3.28. Συνολικό CNIR, Συνολικό CNIDR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο A

Το σενάριο B παράγει παρόμοια αποτελέσματα με το προηγούμενο σενάριο (Εικόνα 3.28). Όπως είναι αναμενόμενο εδώ, εξαιτίας της χαμηλότερης παρεμβολής η απόδοση του συστήματος είναι υψηλότερη από ότι προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα, ο συνολικός λόγος *CNIR* έχει μέγιστη τιμή 36dB, ενώ στη δυσμενέστερη περίπτωση ($A_u = A_d$ = 30dB) φτάνει την ελάχιστη τιμή των -2dB. Και πάλι το σύστημα αναθέτει σταδιακά περισσότερη ισχύ μέχρι 114W καθώς αυξάνουν οι απώλειες βροχόπτωσης.

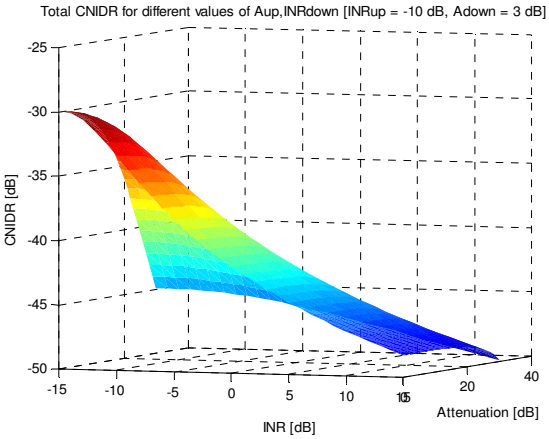


Total CNIR

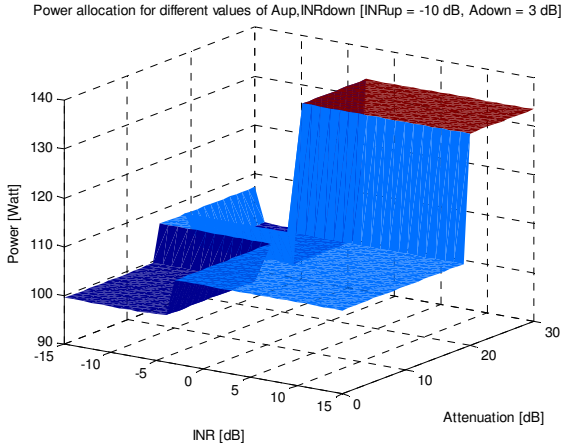


Power Allocation

Εικόνα 3.29. Συνολικό CNIR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο B



Total CNDIR

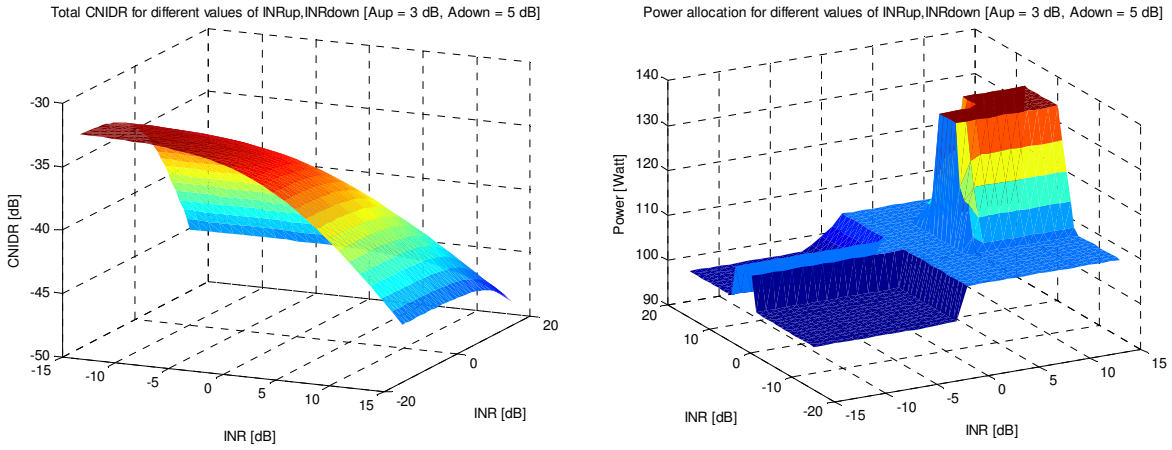


Power Allocation

Εικόνα 3.30. Συνολικό CNIDR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο C

Συνεχίζουμε την ανάλυση με το σενάριο C (Εικόνα 3.30). Στην περίπτωση αυτή το εύρος των τιμών *CNIDR* είναι μικρότερο, αφού η επίδραση του *INR* αντικατοπτρίζεται λιγότερο στην προσαρμοσμένη ισχύ. Στην περίπτωση αυτή ο *CNIDR* λαμβάνει τιμές από -30dB έως -50dB περίπου. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια ανατίθεται σταδιακά περισσότερη ισχύς, ωστόσο σε σύγκριση με το σενάριο A παρατηρούμε ότι εδώ η ισχύς αυξάνεται με χαμηλότερο ρυθμό. Αυτό εξηγείται από την έλλειψη παρεμβολών στην άνω ζεύξη.

Τέλος, η Εικόνα 3.31 απεικονίζει αποτελέσματα για το σενάριο D, όπου εξετάζουμε την επίδραση της παρεμβολής. Το σενάριο αυτό περιλαμβάνει χαμηλές τιμές απωλειών βροχόπτωσης, συνεπώς αναμένουμε το σύστημα να αναθέσει λιγότερη ισχύ σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια. Οι τιμές του *CNIDR* ποικίλουν από -32.5dB στην περίπτωση μηδενικής παρεμβολής μέχρι -48dB σε μέγιστη παρεμβολή. Για ελάχιστη παρεμβολή το σύστημα μειώνει την κατανεμημένη ισχύ από 100 σε 97W, ενώ για υψηλές τιμές των απωλειών βροχόπτωσης η ισχύς προσαρμόζεται μέχρι τα 132W.



Total CNDIR

Power Allocation

Εικόνα 3.31. Συνολικό CNIDR και Κατανομή Ισχύος για το σενάριο D

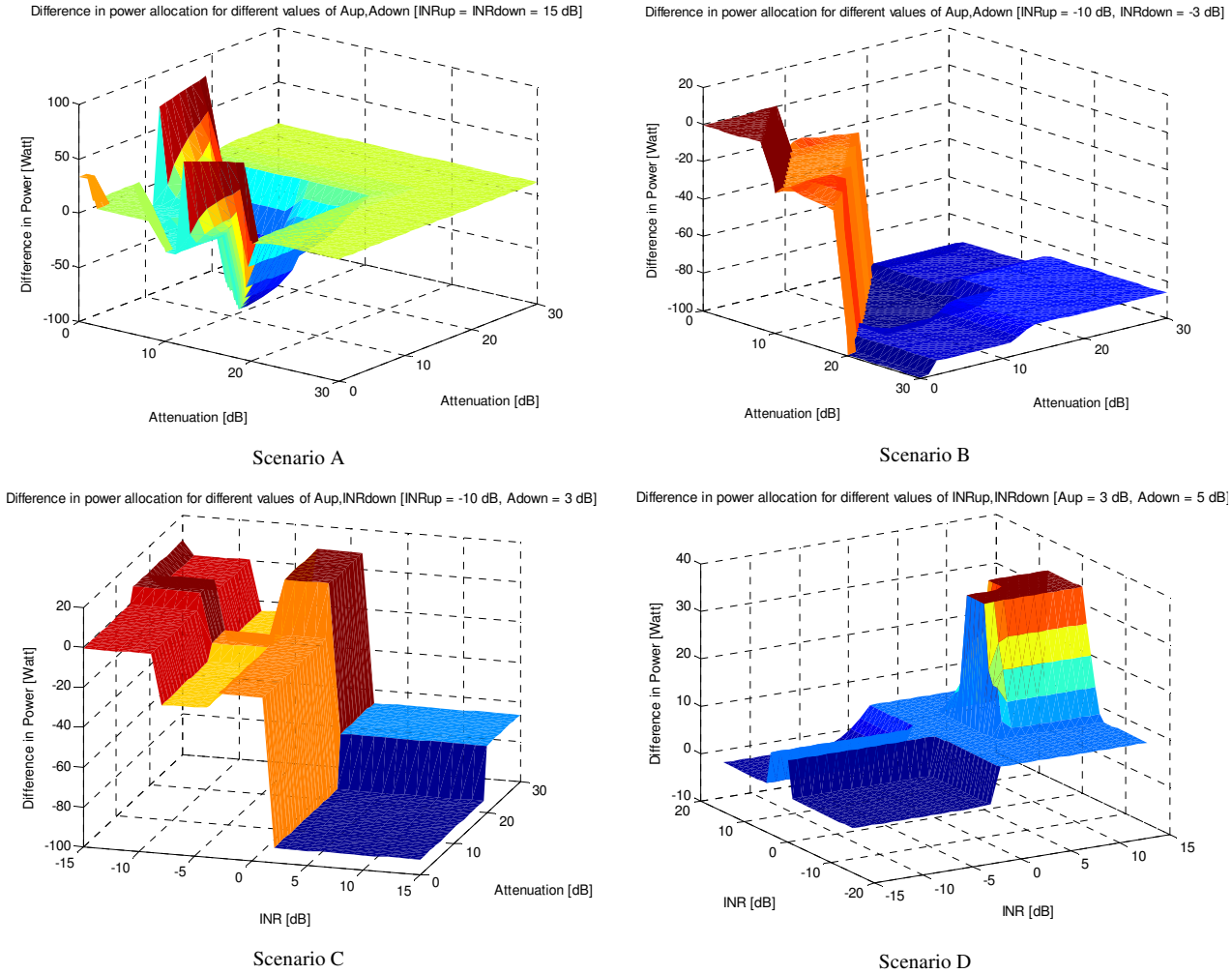
3.5.6.3 Σύγκριση του FBPC με Βηματικό Έλεγχο Ισχύος

Ένα από τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι η σταδιακή ανάθεση της ισχύος ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες. Σε αντίθεση, στις περισσότερες περιπτώσεις στα δορυφορικά συστήματα χρησιμοποιείται σταθερός βηματικός έλεγχος ισχύος [45][46][47]. Σύμφωνα με αυτές τις προσεγγίσεις προστίθεται ένα προκαθορισμένο ποσό ισχύος ανάλογα με συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες σχετίζονται με τις εκτιμώμενες απώλειες βροχόπτωσης. Στην ενότητα αυτή συγκρίνουμε την απόδοση του FBPC με μια βηματική προσέγγιση ελέγχου ισχύος που λαμβάνει υπόψη τις συνολικά εκτιμώμενες απώλειες βροχόπτωσης $A = A_u + A_d$ [dB] στη ζεύξη από άκρη σε άκρη. Αν A < 10dB τότε δεν προστίθεται ισχύς, αν 10dB < A < 20dB τότε η ισχύς αυξάνεται κατά 25% και τέλος αν A > 20dB τότε η ισχύς αυξάνεται κατά 100%. Θα αναφερόμαστε στον αλγόριθμο αυτό ως έλεγχο ισχύος τριών βημάτων.

Η Εικόνα 3.32 συγκεντρώνει τα παραγόμενα αποτελέσματα για όλα τα προαναφερθέντα σενάρια, απεικονίζοντας τη διαφορά ανάμεσα στην ισχύ που ανατίθεται από το βηματικό αλγόριθμο και στην ισχύ που αναθέτει το FBPC. Παρόλο που ο βηματικός έλεγχος ισχύος σε γενικές γραμμές καταλήγει σε ελαφρώς καλύτερες τιμές του *CNIDR*, χρησιμοποιεί υπερβολικά πολλή ισχύ. Αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι ο βηματικός αλγόριθμος δεν μπορεί να αναθέσει την ακριβή τιμή ισχύος που χρειάζεται ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα μετάδοσης. Επιπλέον, το FBPC επιτρέπει και τη μείωση της κατανεμημένης ισχύος, με αποτέλεσμα σε βέλτιστες συνθήκες η κατανεμημένη ισχύς να μειώνεται μέχρι και κατά 30%. Στο σενάριο C, όπου το σύστημα πάσχει από μεγάλη παρεμβολή, ο βηματικός αλγόριθμος δεν αυξάνει την ισχύ, αφού το μόνο κριτήριο που εξετάζει είναι η συνολική απώλεια βροχόπτωσης. Στην περίπτωση αυτή αντιθέτως, το FBPC βελτιώνει επιτυχώς τη μετάδοση αναθέτοντας ελάχιστα μεγαλύτερη ισχύ.

Τέλος, η ανάλυση ολοκληρώνεται συγκρίνοντας την απόδοση του FBPC και με άλλους βηματικούς αλγόριθμους. Ο Πίνακας 3.7 συγκεντρώνει τις τιμές της διαφοράς ισχύος [W], που

υπολογίζεται ως η μέση κατανάλωση ισχύος στο FBPC μείον τη μέση κατανάλωση ισχύος σε κάθε βηματικό αλγόριθμο. Οι μέσες τιμές παράγονται ως ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των εξεταζόμενων τιμών (στην περίπτωσή μας 31x31=961 συνδυασμοί). Εκτός από τον έλεγχο ισχύος τριών βημάτων που υλοποιήθηκε προηγουμένως, υλοποιήθηκαν επιπλέον και οι αλγόριθμοι έξι και δέκα βημάτων. Στον αλγόριθμο έξι βημάτων η ισχύς μετάδοσης αυξάνεται κατά 20% για κάθε 5dB που προστίθενται στις συνολικές εκτιμώμενες απώλειες βροχόπτωσης A. Στον αλγόριθμο δέκα βημάτων η ισχύς μετάδοσης αυξάνεται κατά 10% για κάθε 3dB που προστίθενται στις συνολικές εκτιμώμενες απώλειες βροχόπτωσης A.



Εικόνα 3.32. Διαφορά στην κατανομή ισχύος για όλα τα σενάρια

Όπως μπορεί να φανεί στον Πίνακα 3.7, το FBPC αναθέτει περισσότερη ισχύ μόνο σε σύγκριση με τον αλγόριθμο τριών βημάτων. Αυτό εξηγείται από το ότι ο τελευταίος δεν αυξάνει αρκετά την ισχύ σε περίπτωση μεγάλων παρεμβολών. Για το λόγο αυτό επιτυγχάνονται υψηλότερες τιμές του λόγου *CNIDR* από το FBPC. Απεναντίας, ο αλγόριθμος τριών βημάτων κατανέμει σε ορισμένες περιπτώσεις υπερβολική ισχύ χωρίς να υπάρχει πραγματική ανάγκη. Σε σύγκριση με τους αλγορίθμους έξι και δέκα βημάτων, οι οποίοι δεν οδηγούν σε τόσο μεγάλη απώλεια ισχύος, ο FBPC

παρουσιάζει ακριβώς την ίδια απόδοση όσον αφορά το λόγο *CNIDR*, αλλά με σημαντικά λιγότερη ενέργεια. Ο Πίνακας 3.7 δείχνει επιπλέον το σχετικό % κέρδος στην κατανάλωση ισχύος που επιτυγχάνεται, το οποίο μπορεί να φτάσει μέχρι και 42%. Το κέρδος είναι ιδιαίτερα υψηλό (27-42%) στα σενάρια B και C, που αποτελούν σενάρια μικρών παρεμβολών.

	Scenario A	**Scenario B**	**Scenario C**	**Scenario D**
FBPC/3-steps	-11.20W (-6.05%)	-75.58W (-41.48%)	-42.60W (-27.80%)	7.22W (7.22%)
FBPC/6-steps	-8.46W (-4.64%)	-78.32W (-42.35%)	-50.66W (-31.41%)	-12.78W (-10.65%)
FBPC/10-steps	-8.31W (-4.56%)	-75.42W (-41.44%)	-46.79W (-29.72%)	-12.78W (-10.65%)

Πίνακας 3.7. Μέση διαφορά στην κατανομή ισχύος μεταξύ FBPC και διαφόρων βηματικών αλγορίθμων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.6: ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

3.6.1 Μοντέλα Πρόβλεψης Ποιότητας Υπηρεσιών

Η ποιότητα του ήχου και της εικόνας είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το σχεδιασμό και βελτιστοποίηση των κυψελωτών δικτύων επικοινωνιών. Η *QoE* (Quality of Experience) είναι η συνολική ποιότητα μιας υπηρεσίας ή εφαρμογής, όπως την αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης. Γενικά η *QoE* περιλαμβάνει την από άκρη σε άκρη (end-to-end - E2E) μετάδοση και λαμβάνει υπόψη πολυδιάστατες πληροφορίες, όπως η εμπειρία του χρήστη, οι εξωγενείς συνθήκες, η παρελθοντική εμπειρία, κτλ. Οι μετρικές της ποιότητας υπηρεσίας κατηγοριοποιούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Μετρικές που περιγράφουν την *QoS* του συστήματος (System QoS - *SQoS*) και είναι ανεξάρτητες από τις υπηρεσίες.
- Μετρικές που περιγράφουν την E2E ποιότητα της υπηρεσίας (E2E Service QoS - *ESQoS*) και αποτελούν πρακτικά μια «αντικειμενική» *QoE*.

Έχουν προταθεί πολλές μεθοδολογίες για την αξιολόγηση κινητών υπηρεσιών σε ασύρματα δίκτυα, οι περισσότερες από τις οποίες βασίζονται σε στατιστικά και πιο πρόσφατα σε υπολογιστικές τεχνικές. Η αξιολόγηση των δικτύων πραγματοποιείται κυρίως από τα συστήματα παρακολούθησης δικτύων [48] και βασίζεται σε μετρήσεις, όπως περιγράφεται στις προδιαγραφές ETSI TS 102 250, μέρη1-7 [49].Εναλλακτικά, μπορεί να πραγματοποιηθεί προσομοίωση δικτύου για αξιολόγηση QoS [50]. Ο στόχος αυτού του κεφαλαίου της διδακτορικής διατριβής είναι η μεθοδολογία πρόβλεψης της *ESQoS* με βάση μετρήσεις αληθινών δικτύων.

Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η χρήση των συστημάτων ασαφούς λογικής ANFIS, τα οποία επεξηγήθηκαν στο Κεφάλαιο 3.2 της παρούσης διατριβής. Η προσέγγιση αυτή έχει ακολουθηθεί και στην αναφορά [51], όπου οι συγγραφείς χρησιμοποιούν το ANFIS για πρόβλεψη της ποιότητας βίντεο. Ωστόσο, στην προσέγγιση αυτή τα μοντέλα ποιότητας βίντεο εξάγονται από αποτελέσματα προσομοίωσης μετάδοσης βίντεο σε δίκτυο 3G. Παρόλο που παρόμοιες προσεγγίσεις παρουσιάζουν επιστημονικό ενδιαφέρον, η πρακτική τους αξία είναι περιορισμένη εξαιτίας του γεγονότος ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη εξαρτώνται σημαντικά από τις παραμέτρους της προσομοίωσης και κατά συνέπεια δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γενικότερους υπολογισμούς. Χρησιμοποιώντας ασαφή λογική αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα της αβεβαιότητας και διακύμανσης που είναι έμφυτο σε όλες τις εκτιμήσεις. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης

είναι ότι οι προβλέψεις δεν επηρεάζονται δραστικά από μικρό αριθμό λανθασμένων ή μη ενδεικτικών μετρήσεων.

3.6.2 Δείκτες Ποιότητας για Ήχο και Βίντεο

Οι δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs) είναι ένα σετ μετρικών που χρησιμοποιούνται για να καταγράφουν την απόδοση ενός δικτύου και μπορεί να περιγράφουν είτε τους πόρους του δικτύου είτε την παρεχόμενη SQoS. Τα δίκτυα που λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα μελέτη είναι τα GSM και UMTS, οι KPIs των οποίων είναι [52][53][54]

- Για το GSM:
  - *RxLevSub*: Ισχύς λαμβανόμενου σχήματος [dBm] σε ένα υποσύνολο των θυρίδων
  - *RxQualSub*: Εκτιμώμενη BER σε ένα υποσύνολο των θυρίδων, λαμβάνει τιμές από 1 έως 7
- Για το UMTS:
  - *RSCP* (Received Signal Code Power): Λαμβανόμενη ισχύς [dBm]
  - E_c/N_0: Λαμβανόμενη ισχύς ανά chip διαιρούμενη με την πυκνότητα θορύβου [dB]

Στην τηλεφωνία η κλίμακα MOS (Mean Opinion Score) παρέχει μια αριθμητική ένδειξη της ποιότητας του λαμβανόμενου ήχου. Οι τιμές που παίρνει είναι από 1 (κακή ποιότητα) έως 5 (άριστη ποιότητα). Η ποιότητα βίντεο εκφράζει τη λαμβανόμενη υποβάθμιση ποιότητας κατά τη μετάδοση ενός βίντεο. Ο πιο συνήθης τρόπος για την εκτίμηση της ποιότητας είναι ο υπολογισμός του λόγου *PSNR* (Peak Signal-to-Noise Ratio), δηλαδή το λόγο του αρχικού σήματος προς το λαμβανόμενο σήμα. Η συνολική ποιότητα εικόνας και ήχου μπορεί να προβλεφτεί μέσω πειραμάτων που έχουν πραγματοποιηθεί για ήχο και εικόνα ξεχωριστά. Σύμφωνα με την προδιαγραφή ITU-T P.911 [55], η συνολική ποιότητα MOS_t ενός βίντεο μπορεί να υπολογιστεί από την ποιότητα του ήχου MOS_a, και της εικόνας MOS_v ως

$$MOS_t = a + b \cdot MOS_a \cdot MOS_v \tag{3.57}$$

όπου οι παράμετροι παίρνουν τις τιμές $a = 0.765$ και $b = 0.1925$. Ένας σημαντικός παράγοντας της υποβάθμισης του βίντεο, που ωστόσο δεν αντικατοπτρίζεται στην παραπάνω εξίσωση, είναι ο μη συγχρονισμός εικόνας και ήχου.

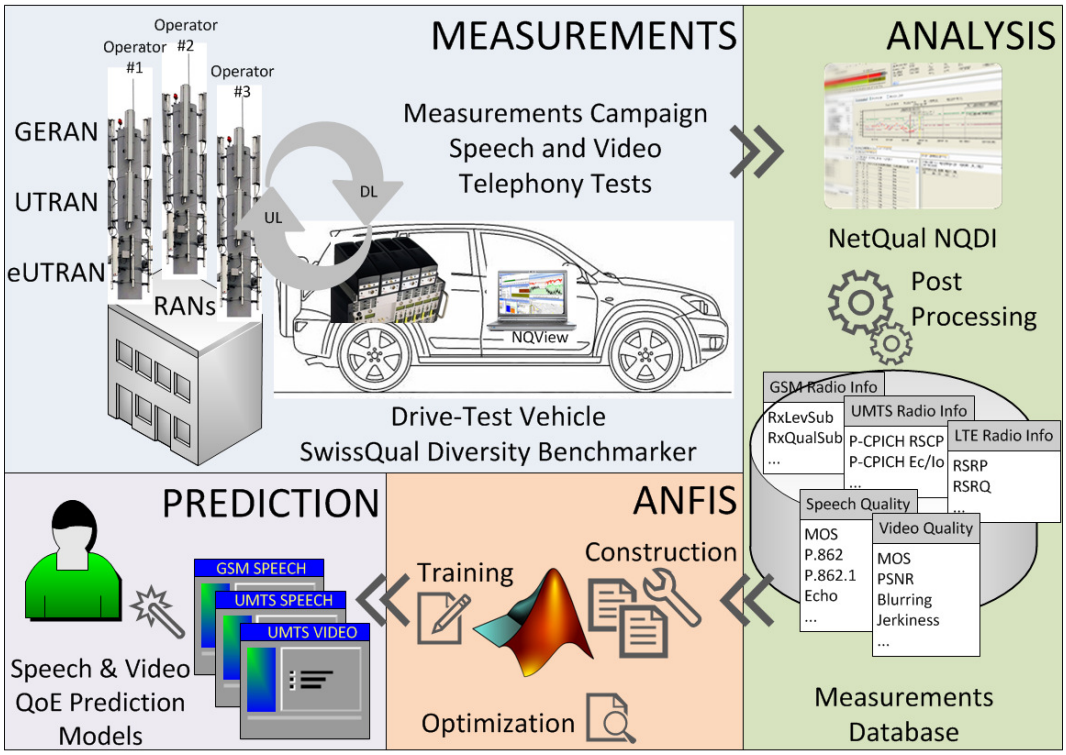
3.6.3 Μεθοδολογία Πρόβλεψης Ποιότητας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία στοχεύει στην αξιοποίηση μετρήσεων από αληθινά δίκτυα και την κατασκευή μοντέλων για ακριβείς προβλέψεις τιμών MOS. Τα βήματα που την απαρτίζουν φαίνονται στην Εικόνα 3.33 και είναι τα εξής:

1. *Συγκέντρωση μετρήσεων*: το βήμα αυτό αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες. Αρχικά πρέπει να παραμετροποιηθεί ο πειραματικός εξοπλισμός για την καταγραφή μετρήσεων με βάση ένα σενάριο. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η διαδικασία καταγραφής κατά μήκος

μιας διαδρομής που μπορεί να καλύπτεται από διάφορους παρόχους.

2. *Ανάλυση μετρήσεων*: Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία καταγραφής, οι μετρήσεις εισάγονται σε μια σχεσιακή βάση δεδομένων.
3. *Κατασκευή FIS*: Στο βήμα αυτό κατασκευάζονται συστήματα ασαφούς λογικής και εκπαιδεύονται μέσω του ANFIS με τις καταγεγραμμένες μετρήσεις. Το σύστημα στη συνέχεια βελτιστοποιείται μέσω επιπρόσθετων μετρήσεων. Το αποτέλεσμα αυτό του βήματος είναι η εξαγωγή συστημάτων πρόβλεψης ποιότητας σε τιμές MOS για συγκεκριμένες τιμές εισόδου.
4. *Πρόβλεψη ποιότητας*: Για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα σενάρια το FIS εξάγεται στη μορφή εκτελέσιμου αρχείου. Ανάλογα με την περίπτωση καλείται το κατάλληλο FIS και υπολογίζεται η πρόβλεψη με βάση τα δεδομένου εισόδου. Με τον τρόπο αυτό η πρόβλεψη γίνεται ταχύτατα, αφού όλος ο υπολογιστικός φόρτος βρίσκεται στην εκπαίδευση του FIS και όχι στην ίδια τη διαδικασία της πρόβλεψης.



Εικόνα 3.33. Μεθοδολογία πρόβλεψης ποιότητας

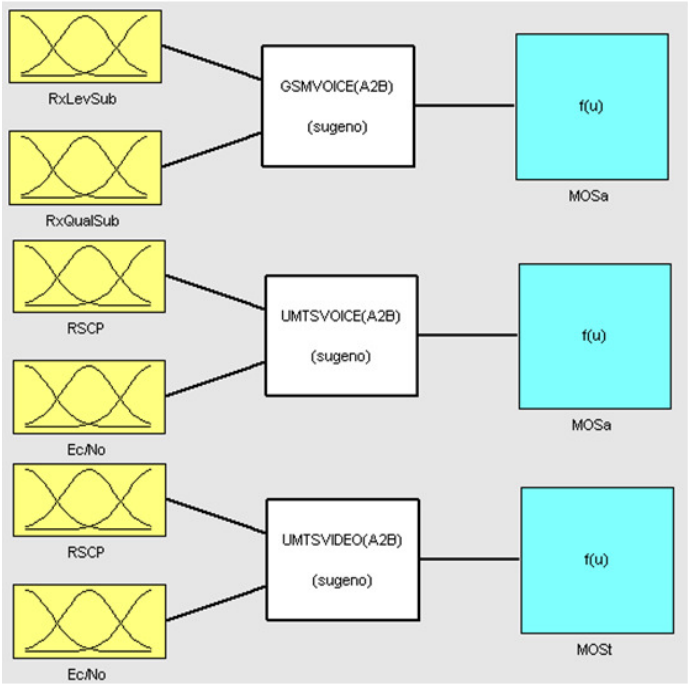
Τα σετ μετρήσεων στην παρούσα μελέτη συλλέχθηκαν μέσω του εξοπλισμού *SwissQual Diversity* [56], ο οποίος καταγράφει μετρικές ποιότητας για υπηρεσίες circuit-switched (CS) και packet-switched (PS) σε μια οδική διαδρομή. Η αξιολόγηση της ποιότητας ήχου και εικόνας πραγματοποιείται μέσω αλγορίθμων οι οποίοι εμπεριέχονται στο *SwissQual*. Με προσομοίωση της αντίληψης του ανθρώπου για ήχο και εικόνα εξάγονται τα αποτελέσματα σε τιμές της κλίμακας MOS. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι εξετάζονται ξεχωριστά οι μεταδόσεις στην άνω και κάτω ζεύξη, οι οποίες θα συμβολίζονται ως UL και DL αντίστοιχα.

3.6.4 Παραμετροποίηση του ANFIS

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, λαμβάνονται υπόψη τρία σενάρια, για κάθε ένα από τα οποία κατασκευάζεται ένα διαφορετικό FIS το οποίο στη συνέχεια εκπαιδεύεται μέσω του ANFIS. Για τα σενάρια ήχου θεωρούμε ως έξοδο του FIS την ποιότητα ήχου (υποκειμενική MOS_a), ενώ για το σενάριο βίντεο την ποιότητα βίντεο (υποκειμενική MOS_t), όπως αυτή υπολογίζεται από την εξίσωση (3.57). Κάθε FIS έχει δύο εισόδους και μία έξοδο ως εξής:

A. Μετάδοση ήχου σε GSM: Είσοδοι: *RxLevSub*, *RxQualSub,* Έξοδος: MOS_a
B. Μετάδοση ήχου σε UMTS: Είσοδοι: *RSCP*, E_c/N_0, Έξοδος: MOS_a
C. Μετάδοση βίντεο σε UMTS: Είσοδοι: *RSCP*, E_c/N_0, Έξοδος: MOS_t

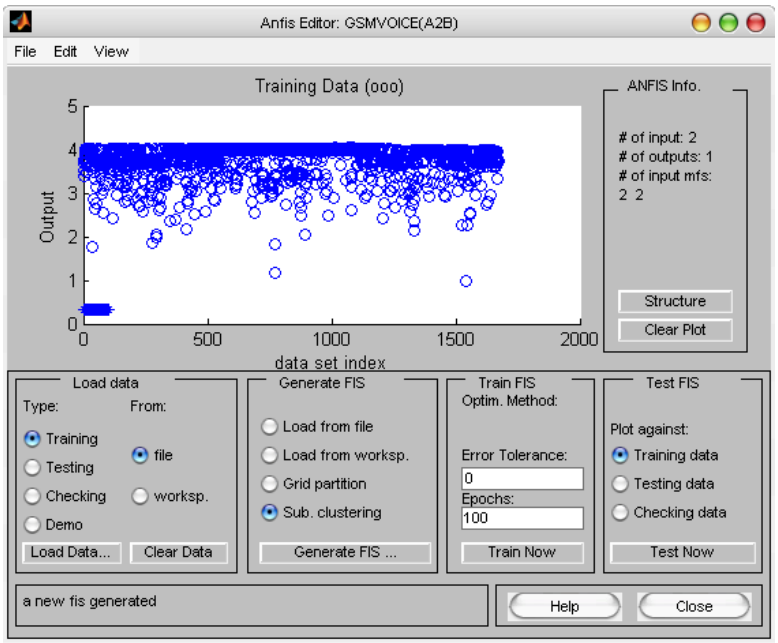
Όσον αφορά στις καταγεγραμμένες μετρήσεις, τις διαφοροποιούμε ανάλογα με την κατεύθυνση του σήματος (άνω και κάτω ζεύξη). Κατά συνέπεια για κάθε σενάριο εξετάζουμε ξεχωριστά τις δύο ζεύξεις, γεγονός που υποθέτει τη δημιουργία δύο ξεχωριστών FIS για κάθε σενάριο. Ως αποτέλεσμα, κατασκευάζονται συνολικά έξι FIS. Η παρακάτω εικόνα απεικονίζει τα FIS που κατασκευάστηκαν για την άνω ζεύξη.



Εικόνα 3.34. Ασαφή μοντέλα πρόβλεψης ποιότητας για δίκτυα GSM και UMTS

Προκειμένου να εκπαιδευτεί το FIS, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η οθόνη παραμετροποίησης του ANFIS (Εικόνα 3.35). Η δημιουργία του FIS μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με τη μέθοδο *Grid Partitioning* είτε με την *Subtractive Clustering,*με διάφορες παραμετροποιήσεις. Με βάση τη διασπορά των εκάστοτε μετρήσεων πρέπει να πραγματοποιηθεί μελέτη με πληθώρα πειραμάτων προκειμένου να καθοριστεί εκείνη η παραμετροποίηση που εξασφαλίζει τις βέλτιστες προβλέψεις. Γενικά η παραμετροποίηση του ANFIS παίζει σημαντικό ρόλο στην αποδοτικότητα του συστήματος

πρόβλεψης και εξαρτάται από τις στατιστικές παραμέτρους των σετ μετρήσεων που χρησιμοποιούνται. Μετά τη φάση εκπαίδευσης χρησιμοποιούνται επιπλέον σετ μετρήσεων για να ελεγχθεί το FIS. Λόγω της προσαρμοστικής και δυναμικής φύσεως του ANFIS, το FIS τροποποιείται αυτόματα ώστε να προσαρμόζεται στις νέες μετρήσεις και συνεπώς να βελτιστοποιεί την απόδοσή του.



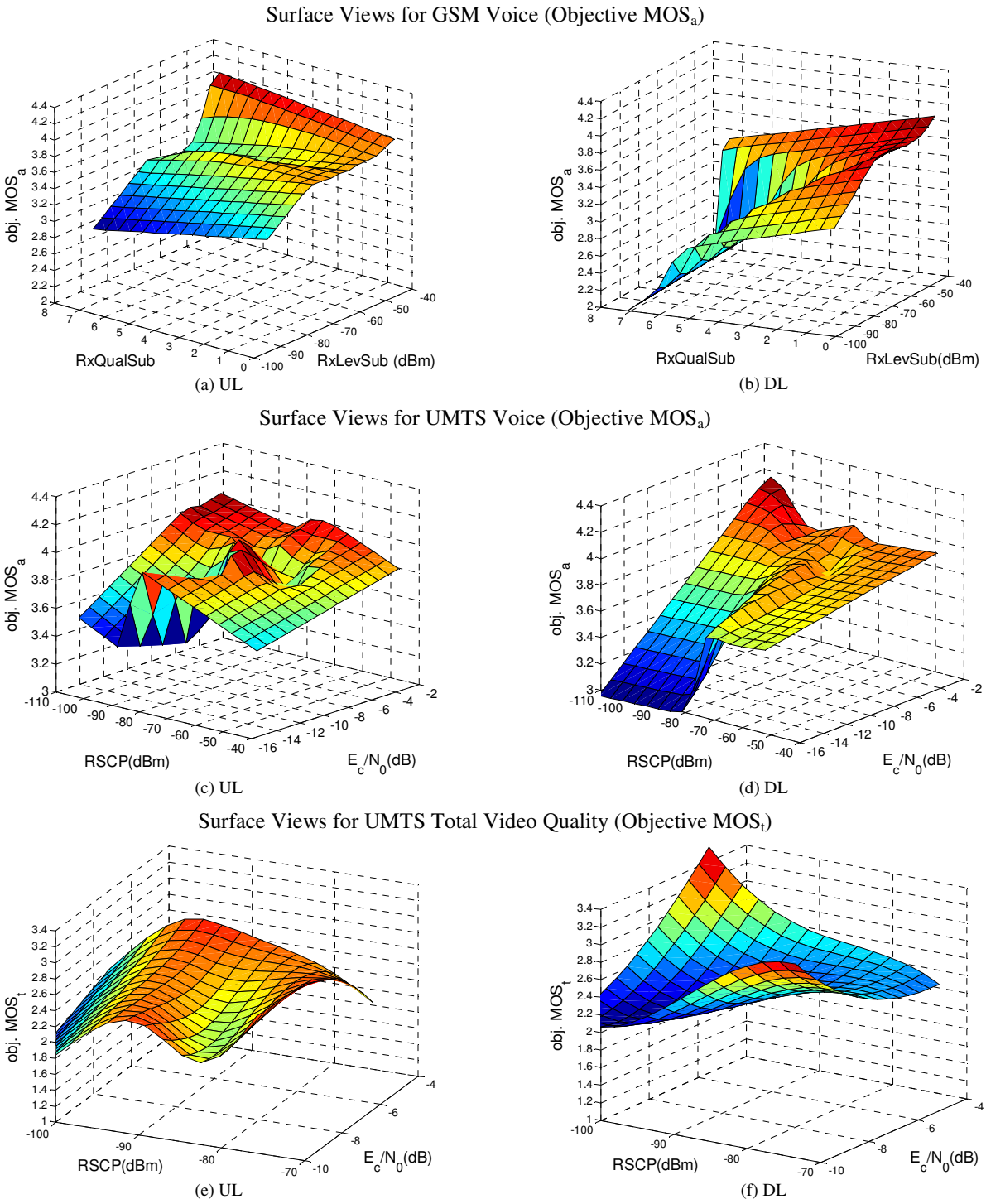
Εικόνα 3.35. Παραμετροποίηση ANFIS για εκπαίδευση του GSM FIS (άνω ζεύξη)

3.6.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα

3.6.5.1 Μοντέλο Πρόβλεψης

Η Εικόνα 3.36 συγκεντρώνει την τρισδιάστατη αναπαράσταση των συστημάτων FIS που κατασκευάστηκαν. Κάθε επιφάνεια επιδεικνύει με ποιο τρόπο επηρεάζεται η έξοδος, δηλαδή η ποιότητα σε κλίμακα MOS, από τις παραμέτρους εισόδου. Με βάση τις εικόνες αυτές μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Για το GSM, επιτυγχάνεται βέλτιστη ποιότητα μεγαλύτερη από 3.5 στην κλίμακα MOS για $RxLevSub > -60\,dBm$. Για το σενάριο κάτω ζεύξης παρατηρείται αύξηση της ποιότητας καθώς μειώνεται η παράμετρος *RxQualSub*, ενώ για το σενάριο άνω ζεύξης αυτό είναι αληθές μόνο για χαμηλές τιμές της παραμέτρου $RxLevSub(< -70\,dBm)$. Για $RxLevSub > -70\,dBm$ η προηγούμενη δήλωση δεν είναι απόλυτα αληθής, εξαιτίας της έμφυτης διακύμανσης στα σετ δεδομένων. Επιπλέον, η χειρότερη ποιότητα που παρατηρείται για την άνω ζεύξη είναι 2.9, ενώ για την κάτω ζεύξη είναι 2.
- Για τη μετάδοση ήχου σε UMTS επιτυγχάνεται βέλτιστη ποιότητα για $E_c/N_0 > -5\,dB$. Στο σενάριο κάτω ζεύξης, για μέτριες τιμές της παραμέτρου E_c/N_0, η εκτιμώμενη MOS αυξάνεται καθώς αυξάνεται και η παράμετρος *RSCP*. Στην περίπτωση του σεναρίου άνω ζεύξης δεν



Εικόνα 3.36. Τρισδιάστατες επιφάνειες των FIS: i) GSM Voice (a: UL, b:DL), ii) UMTS Voice (c: UL, d: DL), iii) UMTS Total Video Quality (e: UL, f: DL)

υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των MOS και *RSCP*, που είναι αποτέλεσμα της διακύμανσης στα δεδομένα μετάδοσης. Η ελάχιστη προβλεπόμενη MOS είναι 3.3 και 3.1 για τα σενάρια άνω και κάτω ζεύξης αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει ότι τα δύο σενάρια αποδίδουν με παρόμοιο τρόπο. Όμοια, η μέγιστη προβλεπόμενη τιμή είναι 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

- Για τη μετάδοση βίντεο σε UMTS τα αποτελέσματα είναι αρκετά αντιφατικά, αφού περιέχουν κάποιες μη αναμενόμενες εκτιμήσεις για μέτριες τιμές και των δυο παραμέτρων εισόδου. Για την άνω και κάτω ζεύξη οι μέγιστες προβλεπόμενες τιμές είναι 2.5 και 3.1 αντίστοιχα, ενώ οι ελάχιστες είναι 1.2 και 2.05 αντίστοιχα. Η ανωμαλία της επιφάνειας είναι αποτέλεσμα της υψηλής αβεβαιότητας του αποτελέσματος της πρόβλεψης, που οφείλεται στο γεγονός ότι η απόδοση της βίντεο τηλεφωνίας συνήθως δεν είναι επαρκής σε δυναμικά περιβάλλοντα (όπως αυτοκινητόδρομοι) όπου η ραδιοκάλυψη δεν είναι συνεχής.

Σε γενικές γραμμές η ποιότητα του βίντεο στις κινητές επικοινωνίες χαρακτηρίζεται από σημαντικά χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τη φωνή. Εξάλλου, η μετάδοση βίντεο μπορεί να επηρεαστεί από μια πληθώρα παραμέτρων οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του βίντεο. Τα προβλήματα μετάδοσης και κωδικοποίησης βίντεο μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτά που φαίνονται σε κάθε frame ξεχωριστά (π.χ. blurring, edge noise, αλλοιωμένα χρώματα, κ.α.) και σε αυτά που αποτελούν αλλοιώσεις του χρονισμού (π.χ. πάγωμα, delay, jitter). Ως αποτέλεσμα, είναι πιο δύσκολο να προβλεφτεί με ακρίβεια η ποιότητα μετάδοσης βίντεο σε σχέση με τη μετάδοση ήχου.

Για πειραματικούς υπολογισμούς παρουσιάζουμε τις προβλεπόμενες τιμές ποιότητας για συνηθισμένες τιμές των παραμέτρων εισόδου σε όλα τα σενάρια υπό εξέταση. Τα αποτελέσματα βρίσκονται στην Εικόνα 3.37 και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κατά προσέγγιση εκτιμήσεις με αποδεκτή ακρίβεια όταν δεν είναι δυνατή η μέτρηση / καταγραφή της *ESQoS*. Πιο συγκεκριμένα, θεωρούμε τα ακόλουθα σενάρια:

- Μετάδοση ήχου σε GSM για $RxQualSub \in \{0, 1, 2\}$: Οι Εικόνες 3.37a και 3.37b δείχνουν ότι για *RxLevSub* χαμηλότερο από $-80dB$ ή υψηλότερο από $-65dB$ παρατηρείται μια γραμμική σχέση μεταξύ της προβλεπόμενης MOS και της παραμέτρου *RxLevSub*. Για όλο το εύρος τιμών του *RxLevSub* η εξάρτηση μπορεί να θεωρηθεί ως μερικώς γραμμική.
- Μετάδοση ήχου σε UMTS για $E_c/N_0 \in \{-8, -5, -3\}\ dB$: Στην περίπτωση αυτή μπορεί να παρατηρηθεί από τις Εικόνες 3.37c και 3.37d ότι η προβλεπόμενη ποιότητα αυξάνεται σημαντικά όταν η παράμετρος *RSCP* είναι υψηλότερη από $-80dB$.
- Μετάδοση βίντεο σε UMTS για $E_c/N_0 \in \{-9, -7, -5\}\ dB$: Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει γραμμικότητα, όπως φαίνεται από τις Εικόνες 3.37e και 3.37f.

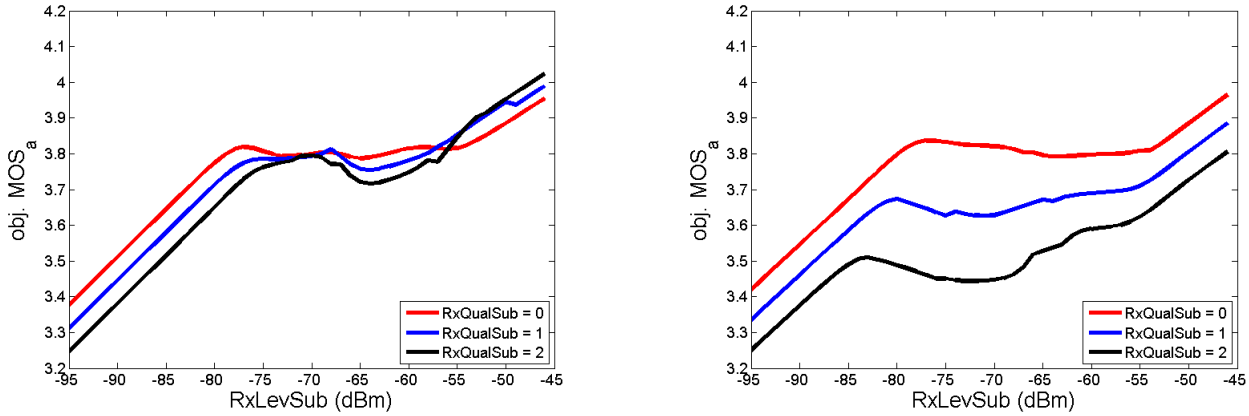
3.6.5.2 Αξιολόγηση του Μοντέλου Πρόβλεψης

Η απόδοση του μοντέλου πρόβλεψης αξιολογείται με τους παρακάτω τρόπους:

1. Πρώτον, εισάγονται στην οθόνη παραμετροποίησης του ANFIS επιπρόσθετα σετ δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα επαλήθευσης. Το ANFIS στη συνέχεια σχεδιάζει τη μετρούμενη και την προβλεπόμενη τιμή και υπολογίζεται το ποσοστό σφάλματος.

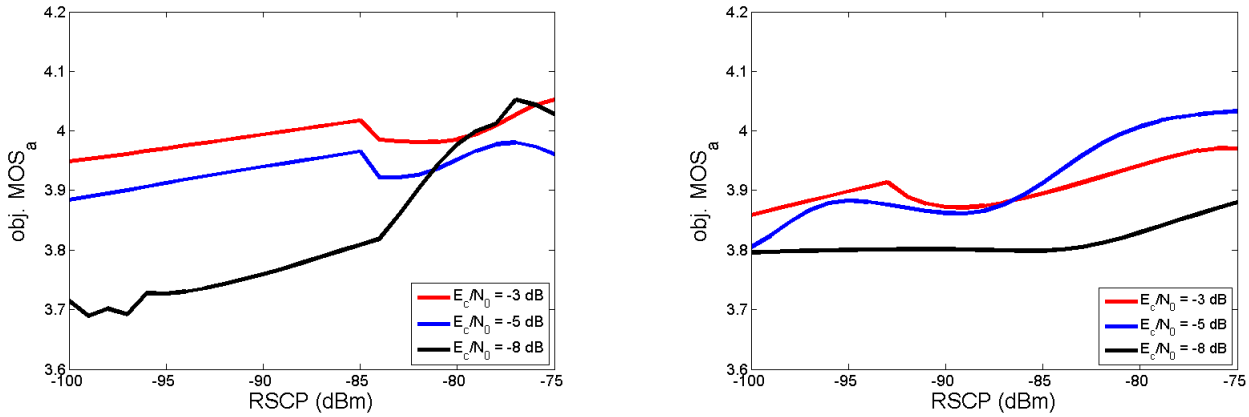
2. Δεύτερον, για επιπρόσθετα σετ δεδομένων εφαρμόζεται το μοντέλο πρόβλεψης και υπολογίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root-Mean-Square Error - RMSE) ανάμεσα στις προβλεπόμενες και τις καταγεγραμμένες τιμές. Το RMSE έχει τις ίδιες μονάδες μέτρησης με το μέγεθος το οποίο εκτιμάται.

Impact of RxLevSub to objective MOS_a for various values of RxQualSub.



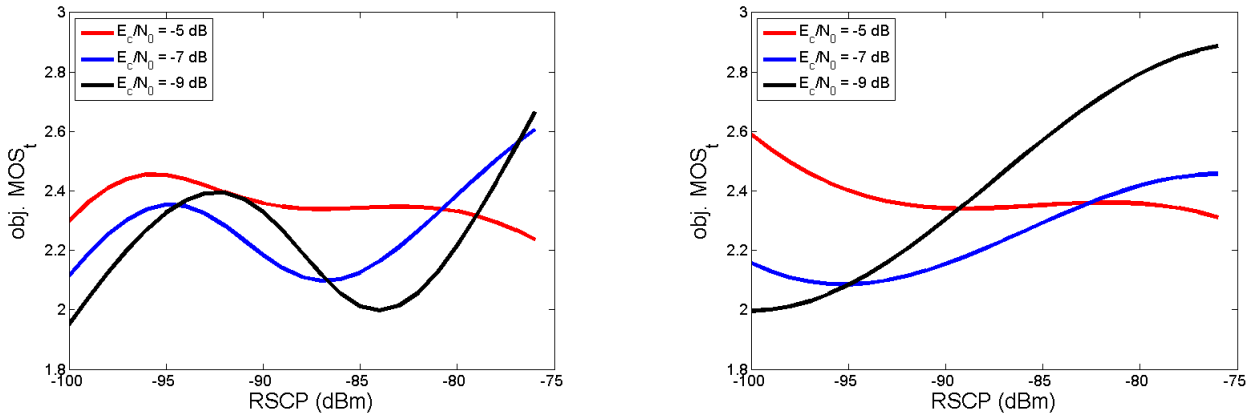
(a) UL (b) DL

Impact of RSCP to objective MOS_a for various values of E_c/N_0.



(c) UL (d) DL

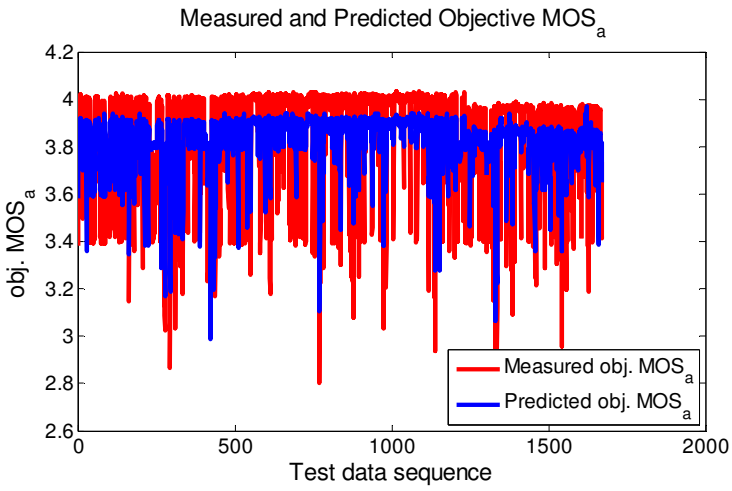
Impact of RSCP to objective MOS_t for various values of E_c/N_0.



(e) UL (f) DL

Εικόνα 3.37. Επίδραση των παραμέτρων εισόδου στην ESQoS (αντικειμενική MOS): i) Επίδραση RxLevSub σε MOS_a σε GSM Voice για διάφορες τιμές RxQualSub (a: UL, b: DL), ii) Επίδραση RSCP σε MOS_a σε UMTS Voice για διάφορες τιμές E_c/N_0(c: UL, d: DL), iii) Επίδραση RSCP σε MOS_t σε UMTS Video για διάφορες τιμές E_c/N_0 (e: UL, f: DL)

Η αξιολόγηση του μοντέλου πρόβλεψης είναι μια συνεχής διαδικασία και πραγματοποιείται κάθε φορά που ενημερώνεται το σύστημα με νέα σετ δεδομένων. Το σφάλμα που υπολογίζεται από το ANFIS έχει σχεδόν πανομοιότυπες τιμές με το RMSE που υπολογίζεται. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το RMSE εξετάστηκε ένας μεγάλος αριθμός από συνδυασμούς παραμετροποίησης. Με τις προτεινόμενες παραμετροποιήσεις και μοντέλα επιτεύχθηκε ένα συνολικό RMSE μεταξύ 0.206 και 0.265. Ακόμη και αν οι τιμές αυτές δεν είναι βέλτιστες, θεωρούνται ικανοποιητικές δεδομένης της διακύμανσης των δεδομένων μέτρησης. Η ακρίβεια διαφοροποιείται ανάλογα με την περίπτωση, αφού επηρεάζεται από το συνδυασμό των χαρακτηριστικών των δεδομένων και της παραμετροποίησης του ANFIS. Σε περιπτώσεις όπου για συγκεκριμένες τιμές αναφέρονται ελάχιστες μετρήσεις, η ακρίβεια μπορεί να αυξηθεί προσαρμόζοντας ανάλογα την ευαισθησία του ANFIS, έτσι ώστε να μην τις αγνοεί. Υψηλότερη ευαισθησία οδηγεί φυσικά σε μεγαλύτερο αριθμό συναρτήσεων συμμετοχής και κανόνων. Συνεπώς, σε ένα τέτοιο σενάριο, ο σχεδιαστής θα έπρεπε να αναπροσαρμόσει το ANFIS ώστε να παρέχει πιο ακριβείς προβλέψεις.



Εικόνα 3.38. Μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές της αντικειμενικής MOS$_a$ για μετάδοση φωνής σε GSM (UL).

Μια γενική παρατήρηση είναι ότι το μοντέλο πρόβλεψης είναι αυστηρό σε σχέση με τις αληθινές μετρήσεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι προβλεπόμενες τιμές είναι ελαφρώς χαμηλότερες από τις καταγεγραμμένες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται σημαντική υποβάθμιση της *SQoS*, πιθανότατα εξαιτίας εξωτερικών παραγόντων ή λανθασμένων μετρήσεων, τα οποία δεν αντικατοπτρίζονται στις προβλέψεις του FIS. Με τον τρόπο αυτό το μοντέλο πρόβλεψης δεν επηρεάζεται δραματικά από έναν αριθμό άκυρων δεδομένων και επιτυγχάνει στο να παρέχει μια σταθερή κατάσταση του δικτύου, που σημαίνει ότι η διασπορά των προβλεπόμενων τιμών είναι μικρότερη από αυτή των δεδομένων μετρήσεων. Στην Εικόνα 3.38 παρουσιάζονται ενδεικτικά συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των προβλέψεων και των πραγματικών δεδομένων για την περίπτωση της μετάδοσης φωνής σε GSM (άνω ζεύξη) με περίπου 1670 μετρήσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΤΡΙΤΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

[1] Χατζηχρήστος Θ., «Τα ΓΣΠ και η Λογική της Ασάφειας στην Ανάλυση του Χώρου», Εκπαιδευτικές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2001.

[2] B. Schweizer, A. Sklar, "Associative functions and abstract semi-groups", Publ. Math. Debrecen 10, 69-81, 1963.

[3] B. Schweizer, A. Sklar, "Associative functions and statistical triangle inequalities", Publ. Math. Debrecen, 8, 169-186, 1961.

[4] M. Sugeno, "Fuzzy measures and fuzzy integrals. a survey", in Fuzzy Automata and Decision Process, (North-Holland, Amsterdam), 89-102,1977.

[5] H.-J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and its Applications", Kluwer Academic Publishers, USA, 1996.

[6] L. A. Zadeh. "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning I", Information Sciences, 8, pp. 199–249, 1975.

[7] L. A. Zadeh. "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning II", Information Sciences, 8, pp. 301–357, 1975.

[8] Mathworks - Fuzzy Inference Systems :: Tutorial (Fuzzy Logic Toolbox). http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/fuzzy/fp351dup8.html

[9] L.A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, 8, pp. 338-353, 1965.

[10] Mathworks - anfis and the ANFIS Editor GUI :: Tutorial (Fuzzy Logic Toolbox), http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/fuzzy/fp715dup12.html

[11] Vinod Tipparaju, "Local Multipoint Distribution Service (LMDS)", Survey Paper, 2000.

[12] Clint Smith, "LMDS", McGraw-Hill Professional Telecom, 2000.

[13] Ana Bolea Alamañac, Michel Bousquet, "Millimetre-Wave Radio Systems: Guidelines on Propagation Modelling and Impairment Mitigation Techniques Research Needs", Propagation Impairment Mitigation for Millimetre Wave Radio Systems, COST Action 280, 1st International Workshop, 2002.

[14] Χ. Καψάλης, Π. Κωττής, "Δορυφορικές Επικοινωνίες", Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.

[15] H. Sari, "A multimode CDMA with reduced intercell interference for broadband wireless networks," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 19, no. 7, pp. 1316–1323, Jul. 2001.

[16] H. Halbauer, P. Jaenecke, and H. Sari, "An analysis of code-division multiple access for LMDS networks," in Proc. 7th Eur. Conf. Fixed Radio Syst. Netw., Sep. 2000, pp. 173–180.

[17] M. K. Tsay and F. T. Wang, "Cellular architecture on CDMA-based LMDS," in Proc. 3rd Int. Symp. CSNDSP, Staffordshire, U.K., Jul. 2002.

[18] W. C. Y. Lee, "Overview of cellular CDMA," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 40, no. 2, pp. 291–302, May 1991.

[19] R. R. Gejji, "Forward-link-power control in CDMA cellular systems," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 41, no. 4, pp. 532–536, Nov. 1992.

[20] M. Zorzi, “Simplified forward-link power control law in cellular CDMA,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, no. 4, pp. 1088–1093, Nov. 1994.

[21] L. Nuaymi, P. Godlewski, and X. Lagrange, “Power allocation and control for the downlink in cellular CDMA networks,” in Proc. 12th IEEE Int. Symp. PIMRC, San Diego, CA, 2001, vol. 1, pp. c29–c31.

[22] W.-M. Tam and F. C. M. Lau, “Analysis of power control and its imperfections in CDMA cellular systems,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 48, no. 2, pp. 1706–717, Sep. 1999.

[23] P.-D. M. Arapoglou, A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, and P. G. Cottis, “Intercell radio interference studies in CDMA-based LMDS networks,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 8, pp. 2471–2479, Aug. 2005.

[24] S. Q. Gong and D. Falconer, “Cochannel interference in cellular fixed broadband access systems with directional antennas,”Wireless Pers. Commun., vol. 10, no. 1, pp. 103–117, Jun. 1999.

[25] A. D. Panagopoulos, J. D. Kanellopoulos, “Statistics of differential rain attenuation on converging terrestrial propagation paths”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 51(9), 2514–2517, 2003.

[26] M. K. Tsay, Z. S. Lee and C. H. Liao, “Fuzzy power control for downlink CDMA-based LMDS network”, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 57, no. 6, pp. 3917-3921, Nov. 2008.

[27] Konstantinos S. Chaloulos, Dimitris E. Charilas, Athanasios D. Panagopoulos, “Power Control Optimization in LMDS Networks operating above 20GHz through Fuzzy Inference Systems”, IEEE symposium on Computers and Communications, June 2011, Corfu, Greece.

[28] ITU-R P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling”, Geneva 2007.

[29] ITU-R P.838-3, “Specific attenuation model for rain for use in prediction”, 2005.

[30] Dimitris E. Charilas, Konstantinos Chaloulos, Athanasios D. Panagopoulos, “Climate-Driven Fuzzy Inference System for Downlink Power Control in CDMA Millimeter Wireless Access Networks”, IEEE Communications Letters, Vol. 5, Issue 11, November 2011, pp. 1162 - 1165.

[31] ITU-R Recommendation P.837-5, “Characteristics of precipitation for propagation modeling”, Geneva, 2007.

[32] ITU-R Recommendation P.1410-4, “Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial broadband radio access systems operating in a frequency range from 3 to 60 GHz”, Geneva, 2007.

[33] Z. Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, Springer-Verlag, 1999.

[34] R. C. Eberhart, Y. Shi, “Particle swarm optimization: developments, applications and resources”, Congress on Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 81–86, Seoul, 2001.

[35] A. Morello, V. Mignone, "DVB-S2: The second generation standard for satellite broad-band services," Proceedings of IEEE, vol. 94, no. 1, pp. 210-227, 2006.

[36] ETSI EN 301 790,"Digital Video Broadcasting (DVB); Interaction channel for satellite distribution systems", 2003.

[37] A. D. Panagopoulos, P.-D. M. Arapoglou, P.G. Cottis, "Satellite communications at Ku, Ka, and V bands: Propagation impairments and mitigation techniques," IEEE Communication Surveys & Tutorials, vol. 6, no. 3, Third Quarter 2004.

[38] ITU-R Recommendation P.618-12, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems", October 2009.

[39] A. D. Panagopoulos and J. D. Kanellopoulos, "On the Rain Attenuation Dynamics: Spatial-Temporal Analysis of Rainfall Rate and Fade Duration Statistics," Int'l. J. Satellite Communication and Networking, vol. 21, no. 6, 2003, pp. 595–611.

[40] A. D. Panagopoulos, "Time Varying Interference Statistical Distribution for Direct-to-User Satellite Applications", IEEE Communication Letters, Volume 13 , Issue 6, pp. 387-389, June 2009.

[41] K. Sakarellos, D. Skraparlis, A. D. Panagopoulos A. D., J. D. Kanellopoulos, "Optimum Placement of Radio Relays in Millimeter-Wave Wireless Dual-Hop Networks", IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 51, issue 2, pp. 190-199, April 2009.

[42] G. Maral, M. Bousquet, "Satellite Communications Systems, Techniques and Technology", 3nd Edition, John Wiley & Sons. ISBN 0471970379, 1998.

[43] ITU-R Study Group 3 Databank, http://www.itu.int/ITU-R/index.asp?category=study-groups&rlink=sg3-dtbank-vhf-uhf&lang=en

[44] COST Project 25, "Radiowave Propagation Modeling for Satcom Services at Ku band and above," Final Report, ESA Publication Division, ISBN 92-9092-608-2, 2002.

[45] H. Berger, M. Bever and R. Jue, "An air interface for high bandwidth systems", 20th AIAA International Communication Satellite Systems Conference and Exhibit, 2002.

[46] L. Castanet, D. Mertens D., M. Bousquet: "Simulation of the performance of a Ka-band VSAT videoconferencing system with uplink power control and data rate reduction to mitigate atmospheric propagation effects", International Journal of Satellite Communications., Vol. 20, nº4, July-August 2002, pp. 231-249.

[47] A. Bolea-Alamanac, M. Bousquet, L. Castanet, M. Van de Kamp, "Implementation of short-term prediction models in fade mitigation techniques control loops", Joint COST 272 / 280 Workshop, 26-28 May 2003, ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.

[48] K. Vlachodimitropoulos, and E. Katsaros, "Monitoring the end user perceived speech quality using the derivative mean opinion score (MOS) key performance indicator," 18th IEEE Int'l Symp. On PIMRC, Athens, Sep. 3-7, 2007, doi: 10.1109/PIMRC.2007. 4394256.

[49] ETSI TS 102 250, Parts 1-7, "Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); QoS aspects for popular services in GSM and 3G networks."

[50] M. Malkowski, and D. Claßen, "Performance of video telephony services in UMTS using live measurements and network emulation," Wireless Personal Communications, vol. 46, no. 1, 2008, pp. 19–32, doi: 10.1007/s11277-007-9353-5.

[51] A. Khan et al., "Video Quality Prediction Models Based on Video Content Dynamics for H.264 Video over UMTS Networks," Int'l Journal of Digital Multimedia Broadcasting, vol. 2010, 2010, pp.1-17, doi:10.1155/2010/608138.

[52] ECC Rep.118, “Monitoring Methodology to Assess the Performance of GSM Networks,” ECC-CEPT, Athens, Feb. 2008.

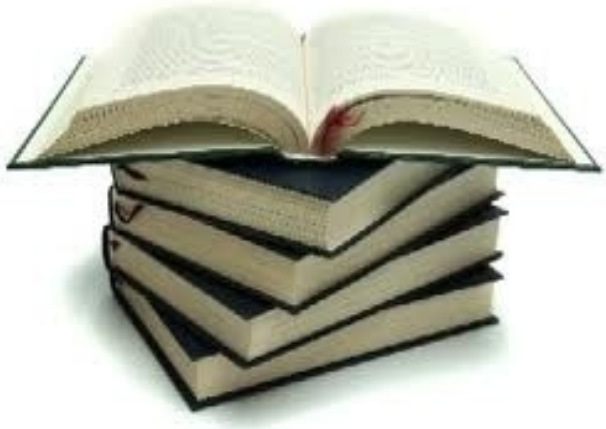
[53] ECC Rep. 103, “UMTS Coverage Measurements,” ECC-CEPT, Nice, May 2007.

[54] ETSI TS 136 214, v10.1.0 Rel.10, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (3GPP TS 36.214),” Apr.2011.

[55] ITU-T Rec. P.911, “Subjective audiovisual quality assessment methods for multimedia applications (PAVQ),” Dec. 1998.

[56] SwissQual AG, “Diversity Benchmarker”; http://www.swissqual.com/

ΕΠΙΛΟΓΟΣ



ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εξέτασε μια πληθώρα θεμάτων κατανομής πόρων σε ασύρματα δίκτυα, δίνοντας έμφαση στη βελτιστοποίηση της παρεχόμενης Ποιότητας Υπηρεσιών, διατηρώντας ωστόσο την υπάρχουσα υποδομή δικτύων. Φυσικά λύσεις αυτού του είδους παραμένουν σε θεωρητικό επίπεδο και απέχουμε ακόμα αρκετά από το σημείο που θα μπορέσουν να ενσωματωθούν και εφαρμοστούν επιτυχώς σε αληθινά δίκτυα και υποδομές. Στη συνέχεια θα συζητηθούν ορισμένες μελλοντικές κατευθύνσεις για τα θέματα που εξετάστηκαν.

Όσον αφορά στο πρόβλημα της επιλογής δικτύου, η σημαντικότερη ίσως πρόκληση είναι ο προσδιορισμός της βαρύτητας που φέρει κάθε κριτήριο απόφασης με ντετερμινιστικό τρόπο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον φέρει και ο στόχος για συμμετοχή του χρήστη στην διαδικασία επιλογής, οδηγώντας έτσι τις τηλεπικοινωνίες σε μια προσωποποιημένη προσέγγιση. Εκτός από την εύρεση και υλοποίηση αποδοτικών αλγορίθμων, θα πρέπει παράλληλα να αναπτυχθεί και η τεχνολογία των κινητών τερματικών, προκειμένου τα τελευταία να μπορούν να υποστηρίξουν τις σύνθετες διαδικασίες απόφασης. Ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί μέσω κατάλληλων επιφανειών διεργασίας να επηρεάσει τη συμπεριφορά του κινητού τερματικού, δημιουργώντας έτσι ένα μοναδικό προφίλ. Παράλληλα, η πολυπλοκότητα των αλγόριθμων σε μη κεντροποιημένες αρχιτεκτονικές θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή, έτσι ώστε οι τελευταίοι να εκτελούνται σε μικρό χρονικό διάστημα από το τερματικό και να λαμβάνεται άμεσα η οποιαδήποτε απόφαση. Εξάλλου οι πόροι των συσκευών είναι περιορισμένοι και δεν μπορούν να εκτελούν με μεγάλη συχνότητα αλγορίθμους που επιφέρουν υψηλό υπολογιστικό φόρτο. Το θέμα αυτό εξετάστηκε και στα Κεφάλαια 1.4 και 1.5 της διατριβής, ωστόσο απαιτείται πιο λεπτομερής μελέτη στη περίπτωση εφαρμογής των αλγορίθμων σε πραγματικές συσκευές. Τέλος, ανεξάρτητα από τον αλγόριθμο της απόφασης, θα πρέπει να υπάρχει μέριμνα ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του ping pong, δηλαδή η συνεχής διαπομπή μεταξύ δύο δικτύων.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής εξετάστηκε κυρίως η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων σε προβλήματα κατανομής πόρων σε ετερογενή περιβάλλοντα. Ως μελλοντική έρευνα μπορεί να θεωρηθεί κι εδώ η εφαρμογή των αλγορίθμων σε πραγματικές υποδομές και τερματικά, με έμφαση στην πολυπλοκότητα που επιφέρουν οι αλγόριθμοι. Ειδικότερα, σημαντικοί παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν διεξοδικά σε αυτά τα σενάρια είναι η συχνότητα με την οποία τα δίκτυα ανανεώνουν τα στατιστικά τους, αλλά και η ελαστικότητα ως προς την παρεχόμενη ποιότητα υπηρεσία από τους χρήστες. Όπως συζητήθηκε στο Κεφάλαιο 2.5 οι παράμετροι αυτοί μπορούν να επηρεάσουν δραματικά τα αποτελέσματα και πρέπει να καθορίζονται πάντα με βάση το σύστημα υπό εξέταση.
Επιπλέον η απόδοση των προτεινόμενων αλγορίθμων πρέπει να εξεταστεί για περισσότερους τύπους υπηρεσιών, για διαφορετικά προφίλ χρηστών και πιο σύνθετα ετερογενή περιβάλλοντα. Όσον

αφορά στους μηχανισμούς κινήτρων, είναι πλέον εμφανές ότι θα αποτελέσουν θεμελιώδη λίθο των δικτύων επόμενης γενιάς. Αποτελεί μεγάλη πρόκληση η ανάπτυξη δυναμικών αλγορίθμων που μπορούν επιτυχώς να υποκινήσουν τη συνεργασία μεταξύ οντοτήτων δικτύων, παρέχοντας κατάλληλα κίνητρα αλλά και διατηρώντας τη δικαιοσύνη. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι ζωτική η μελέτη θεμάτων ασφαλείας και προστασίας των δικτύων από κακόβουλες οντότητες, συνεπώς θα πρέπει να αναπτυχθούν μέθοδοι ταυτοποίησης και επιτήρησης. Όλα τα παραπάνω θα πρέπει φυσικά να επιφέρουν τον ελάχιστο δυνατό φόρτο στο δίκτυο.

Στο τρίτο μέρος της διδακτορικής διατριβής δόθηκε έμφαση στη χρησιμοποίηση των συστημάτων ασαφούς συμπερασμού για κατανομή ισχύος. Στα διάφορα σενάρια που εξετάστηκαν προτάθηκε μια συνάρτηση κατανομής ισχύος, η οποία μέσω ορισμένων σταθερών μπορεί να επηρεάσει την ισχύ που ανατίθεται (Κεφάλαια 1.3-1.5). Στη μελέτη αυτή προτάθηκαν ενδεικτικές τιμές για τα υπό μελέτη συστήματα και διαμορφώθηκαν τα γενικά προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν από το σχεδιαστή προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση. Ως μελλοντική έρευνα κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω μελέτη και επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης μέσω ειδικών εργαλείων για επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Ο στόχος είναι η ύπαρξη ενός αυτοματοποιημένου τρόπου για εξαγωγή της βέλτιστης συνάρτησης κατανομής ισχύος, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του συστήματος υπό εξέταση (τοπολογία, συχνότητα, κλίμα, κ.α.). Στο τέλος της διατριβής προτάθηκε και η χρήση των συστημάτων ασαφούς λογικής για πρόβλεψη Ποιότητας Υπηρεσίας σε ασύρματα δίκτυα. Η μελέτη επικεντρώθηκε σε GSM και UMTS για τις υπηρεσίας Τηλεφωνίας και Βίντεο Τηλεφωνίας. Ως επέκταση της εργασίας αυτής μπορεί να θεωρηθεί η εφαρμογή του μοντέλου σε περισσότερα είδη υπηρεσιών, καθώς και ο εντοπισμός των παραμέτρων που μπορούν να αποτελέσουν ικανά κριτήρια εισόδου, ώστε να κατασκευαστούν συστήματα πρόβλεψης και για άλλα δίκτυα, π.χ. LTE, WiMAX, κ.α.

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω δημοσιεύσεις. Άμεσα σχετιζόμενες με το αντικείμενο της διδακτορικής διατριβής είναι οι:

- **Σ1, Σ2, Σ3, Σ6, Σ9, Σ10, Σ11, Σ12, Σ13**
- **Π1, Π2, Π3, Π4, Π5, Π6, Π7, Π9**
- **Κ1, Κ2, Κ3, Κ6, Κ7.**

ΣΥΝΕΔΡΙΑ

[Σ1] Konstantinos S. Chaloulos, **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos, “Power Control Optimization in LMDS Networks operating above 20GHz through Fuzzy Inference Systems”, IEEE symposium on Computers and Communications, June 2011, Corfu, Greece.

[Σ2] **Dimitris Charilas**, Polychronis Mathioudakis, Athanasios Panagopoulos, Philip Constantinou, "Federation Agreements Performance in Heterogeneous Environments: Non-Cooperative Games Approach", GLOBECOM 2010, Workshop on Mobile Computing and Emerging Communication Networks (MCECN 2010), December 2010, Miami, USA.

[Σ3] **Dimitris E. Charilas**, Konstantinos Chaloulos, Athanasios D. Panagopoulos, “Fuzzy Inference Uplink Power Control System in End-to-end Broadband Satellite Links”, 16th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, October 2010, Milan, Italy.

[Σ4] Ourania I. Markaki, **Dimitris E. Charilas**, Dimitris Askounis, “Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process to Evaluate the Quality of E-Government Web Sites”, Developments in E-Systems Engineering (DESE) 2010, September 2010, London, England.

[Σ5] Ourania I. Markaki , **Dimitris E. Charilas**, Yannis Charalabidis, Dimitris Askounis, “A framework to evaluate the impact of e-government services in the improvement of the citizens’ quality of life”, 2nd World Summit on the Knowledge Society, September 2009, Crete, Greece.

[Σ6] **Dimitris E. Charilas**, Ourania I. Markaki, Panagiotis Vlacheas, “Admission Control as a Non-cooperative Multi-Stage Game between Wireless Networks”, 16th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP’09), June 2009, Chalkida, Greece.

[Σ7] **Dimitris E. Charilas**, Ourania I. Markaki, "PIDALION: Implementation issues of a Java-based Multimedia Search Engine over the web", 16th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP'09), June 2009, Chalkida, Greece.

[Σ8] Ourania I. Markaki, **Dimitris E. Charilas**, "Personalization mechanisms for content indexing, search, retrieval and presentation in a multimedia search engine", 16th International Workshop on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP'09), June 2009, Chalkida, Greece.

[Σ9] **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos, Panagiotis Vlacheas, Ourania I. Markaki and Philip Constantinou, "Congestion avoidance control through non-cooperative games between customers and service providers", The 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (Mobilight 2009), May 2009, Athens, Greece.

[Σ10] **Dimitris E. Charilas**, Ourania I. Markaki, John Psarras and Philip Constantinou, "Application of Fuzzy AHP and ELECTRE to Network Selection", The 1st International Conference on Mobile Lightweight Wireless Systems (Mobilight 2009), May 2009, Athens, Greece.

[Σ11] Panagiotis Vlacheas, **Dimitris Charilas**, Elias Tragos, Ourania Markaki, "Maximizing Quality of Service for Customers and Revenue for Service Providers through a Noncooperative Admission Control Game", ICT Mobile Summit 2008, June 2008, Stockholm, Sweden.

[Σ12] **Dimitris Charilas**, Ourania Markaki, Elias Tragos, "A Theoretical Scheme for applying game theory and network selection mechanisms in access admission control", International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC) 2008, May 2008, Santorini, Greece.

[Σ13] Ourania Markaki, **Dimitris Charilas**, Dimitris Nikitopoulos, "Enhancing Quality of Experience in Next Generation Networks through Network Selection Mechanisms", Mobile Terminal Assisted Enhanced Services Provisioning in a B3G Environment Workshop, PIMRC, September 2007, Athens, Greece.

ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ

[Π1] Charalampos N. Pitas, **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos and Philip Constantinou, "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Models for Speech and Video Quality Prediction in Real-World Mobile Networks", accepted for publication in Wireless Communications Magazine, IEEE, 2012.

[Π2] **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos and Konstantinos S. Chaloulos, "Fuzzy-Based Uplink Power Control in Forward Broadband Satellite Links", by accepted for publication in Wireless Personal Communications, Springer, 2012.

[Π3] **Dimitris E. Charilas**, Konstantinos D. Georgilakis, Athanasios D. Panagopoulos, "ICARUS: hybrId inCentive mechAnism for coopeRation stimUlation in ad hoc networks", accepted for publication in Ad Hoc Networks, Elsevier, 2012.

[Π4] **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos, "Fuzzy-based handover decision with multi-attribute auctions in heterogeneous network environments", International Journal of Wireless and Mobile Computing, Vol. 5, No.1, 2011, pp. 1 – 11.

[Π5] **Dimitris E. Charilas,** Konstantinos Chaloulos, Athanasios D. Panagopoulos, "Climate-Driven Fuzzy Inference System for Downlink Power Control in CDMA Millimeter Wireless Access Networks", IEEE Communications Letters, Vol. 5, Issue 11, November 2011, pp. 1162 - 1165.

[Π6] **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos, "Multi-Access Radio Network Environments", IEEE Vehicular Technology Magazine, Vol. 5, Issue 4, December 2010, Pages 40 – 49.

[Π7] **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos, "A Survey on Game Theory Applications in Wireless Networks", Elsevier Computer Networks, Vol. 54, Issue 18, December 2010, Pages 3421-3430.

[Π8] Ourania I. Markaki , **Dimitris E. Charilas**, Yannis Charalabidis, Dimitris Askounis, "Evaluating the effect of e-government services on the citizens' quality of life: the case of Greece", International Journal of Knowledge and Learning, Volume 5, Issue 1, Pages 505-518, 2009, Inderscience Publishers (extended paper).

[Π9] **Dimitris Charilas**, Ourania Markaki, Dimitris Nikitopoulos and Michael Theologou, "Packet-Switched Network Selection with the Highest QoS in 4G Networks", Elsevier Computer Networks, Volume 52, Issue 1, 18 January 2008, Pages 248-258.

ΚΕΦΑΛΑΙΑ ΒΙΒΛΙΩΝ

[Κ1] Andreas P. Fatouros, Ioannis C. Fousekis, **Dimitris E. Charilas**, and Athanasios D. Panagopoulos, "Cooperative Services in Next Generation Wireless Networks: Internet of Things Paradigm", accepted for publication in "Building Next-Generation Converged Networks: Theory and Practice", CRC Press, to be published in 2012.

[Κ2] **Dimitris E. Charilas,** Ourania I. Markaki, Athanasios D. Panagopoulos, "Network Selection and Congestion Avoidance Control in Multi-Access Network Environments",

published in "Emerging Wireless Networks: Concepts, Techniques and Applications", Pages 349-380, CRC Press, February 2012.

[K3] **Dimitris E. Charilas,** Stavroula G. Vassaki, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Cooperation Incentives in 4G Networks", published in "Game Theory for Wireless Communications and Networking", CRC Press, pp. 295-314, June 2011.

[K4] Ourania I. Markaki, **Dimitris E. Charilas**, Dimitris Askounis, "Evaluation of the Impact and Adoption of E-government Services in the Balkans", published in "Comparative E-Government: An Examination of E-Government Adoption across Countries", Pages 91-114, Springer, 2010.

[K5] Ourania I. Markaki, **Dimitris E. Charilas**, Dimitris Askounis, "Evaluating the Quality Attributes of E-Government Web Sites", published in "E-Government Website Development: Future Trends and Strategic Models", Pages 65-86, IGI Global, 2010.

[K6] **Dimitris E. Charilas**, Athanasios D. Panagopoulos, Philip Constantinou, "Enhanced QoS through Cooperating Schemes in Next Generation Wireless Networks", published in "Wireless Network Traffic and Quality of Service Support: Trends and Standards", Pages 400-426, IGI Global, 2010.

[K7] **Dimitris E. Charilas**, Theodore V. Anagnostopoulos, Athanasios D. Panagopoulos, Christos V. Anagnostopoulos, "Cooperative Networks: Optimization through Game Theory and Mobility Prediction", published in "Planning and Optimisation of Broadband Wireless IP networks", Pages 265-304, River Publishers, 2009.

Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ των δημοσιεύσεων και του περιεχομένου της διδακτορικής διατριβής.

Κεφάλαιο	**Τίτλος**	**Δημοσιεύσεις**
1.1	ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	Π6, Κ2
1.2	ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ	-
1.3	ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΜΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕΘΟΔΩΝ	Π9, Σ13, Σ10
1.4	ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ	-
1.5	ΑΠΟΦΑΣΗ ΔΙΑΠΟΜΠΗΣ ΜΕ ΑΝΑΚΡΙΒΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ	Π4
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΠΑΙΓΝΙΩΝ	-
2.2	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΠΑΙΓΝΙΩΝ ΣΕ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΔΙΚΤΥΑ	Π7, Κ6, Κ7
2.3	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ	Κ2
2.4	ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΚΛΗΣΕΩΝ ΜΕ ΜΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΠΑΙΓΝΙΑ	Σ6, Σ12
2.5	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΠΟΦΥΓΗΣ ΣΥΜΦΟΡΗΣΗΣ ΜΕ ΜΗ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΑ ΠΑΙΓΝΙΑ	Σ2, Σ9, Σ11
2.6	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΙΝΗΤΡΩΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ	Κ3
2.7	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΚΙΝΗΤΡΩΝ	Π3
3.1	ΑΣΑΦΗΣ ΛΟΓΙΚΗ	-
3.2	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ	-
3.3	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ LMDS	Σ1
3.4	ΓΕΝΙΚΕΥΣΗ FIS ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CDMA	Π5
3.5	ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΕΙΑΣ	Π2, Σ3

	ΖΩΝΗΣ	
3.6	ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ	Π1