



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ»

**«Μοντελοποίηση του χρονοπρογραμματισμού πακέτων
σε δίκτυο WCDMA»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΖΙΩΡΤΖΙΔΗ Γ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΜΟΣΧΟΛΙΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Καλαμάτα, Ιούλιος 2012

Πρόλογος

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας κατά τη διάρκεια του 3^{ου} εξαμήνου του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Δίκτυα» του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, αποφάσισα να ασχοληθώ με τη μελέτη του αντικειμένου της συμπίεσης που μπορεί να εφαρμοστεί στις τηλεπικοινωνιακές κλήσεις (φωνή, εικόνα, video, data) που δέχονται τα σύγχρονα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα.

Το ενδιαφέρον μου το προκάλεσε το μάθημα «Προχωρημένα Θέματα Δικτύων» που είχα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο 2^ο εξάμηνο της φοίτησης του προγράμματος με τον καθηγητή μου Μοσχολιό Ι. αναλύοντας σε κάποια διάλεξη τις εναλλακτικές μορφές εξοικονόμησης πόρων για μεγαλύτερη απόδοση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων όπως για παράδειγμα η εναλλακτική δρομολόγηση, η θεωρία της ελαστικότητας και άλλες μορφές.

Μία από τις εναλλακτικές μορφές αυτές που μου προκάλεσε το ενδιαφέρον, είναι η δυνατότητα συμπίεσης των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης από τη χωρητικότητα του συστήματος των κλήσεων που εισέρχονται μέσα στο σύστημα, έτσι ώστε να απασχολούνται όσο το δυνατόν λιγότεροι πόροι του συστήματος. Ως αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας είναι να αυξάνεται η απόδοση του συστήματος διεκπεραιώνοντας μεγαλύτερο φορτίο κίνησης όταν απαιτηθεί, χωρίς όμως να «θυσιάζεται» η ποιότητα της παρεχόμενης εξυπηρέτησης (Quality of Service).

Η έννοια της εφαρμογής της συμπίεσης στη θεωρία της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης είναι σχετικά καινούργια αλλά στην εξέλιξη των νέων τεχνολογιών, στο αντικείμενο της πληροφορικής αλλά και στην καθημερινότητά μας όμως εφαρμόζεται πάρα πολύ συχνά. Ας μην ξεχνάμε για παράδειγμα ότι αν θέλουμε να εξοικονομήσουμε χώρο σε ένα αποθηκευτικό μέσο στον Η/Υ μας, εφαρμόζουμε άμεσα τη συμπίεση των αρχείων ή όταν θέλουμε να αποστείλουμε μία εικόνα ή ένα μεγάλο σε μέγεθος αρχείο μέσω ηλεκτρονικής αλληλογραφίας πάλι εκτελούμε την ίδια μέθοδο, της συμπίεσης.

Η μελέτη της Διπλωματικής Εργασίας αναπτύσσεται σε πέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα ως εξής:

Στο 1^ο κεφάλαιο αναφέρονται οι γενικές αρχές τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύεται το Μοντέλο Πολυδιάστατης Τυχαίας Κίνησης (Erlang Multirate Loss Model) με Πολιτική Πλήρους Διάθεσης (Complete Sharing Policy) και η εφαρμογή της φόρμουλας των Kaufman – Roberts.

Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται ο αλγόριθμος της συμπίεσης των κλήσεων στα δίκτυα UMTS με WCDMA Interface και στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθενται παραδείγματα και διαγράμματα από τις μετρήσεις καθώς και τα συμπεράσματα από αυτά.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δυνατότητες και οι προοπτικές για περαιτέρω μελέτη και προοπτικές που αναπτύσσονται από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Τέλος στο παράρτημα παρέχεται ο κώδικας προγραμματισμού υλοποίησης των μετρήσεων. Στον επισυναπτόμενο οπτικό δίσκο (CD) περιλαμβάνονται εκτός από την παρούσα Διπλωματική Εργασία σε ηλεκτρονική μορφή, αυτούσιος ο κώδικας προγραμματισμού.

Καλαμάτα, Ιούλιος 2012

Τζιωρτζίδης Γ. Παναγιώτης
Μεταπτυχιακός φοιτητής
Πανεπιστημίου Πελοποννήσου

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου για την πολύτιμη βοήθεια, συνδρομή και παραινέσεις στο να καταστεί δυνατή η εκπόνηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά:

Τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δρ. Ιωάννη Μοσχολιό για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και μου ανέθεσε την εκπόνηση αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, τις κατάλληλες οδηγίες και συμβουλές του.

Τον αγαπητό συνάδελφο, φίλο και συμφοιτητή Πουλουπάτη Κωνσταντίνο που με την αμέριστη βοήθειά του, τόσο κατά τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος όσο και κατά την εκπόνηση της εργασίας μου, μου στάθηκε πραγματικά δίπλα μου, με στήριξε με τις γνώσεις του και με βοήθησε για την περάτωσή της.

Τον προϊστάμενό μου Δόσα Λεωνίδα αλλά και τους υπόλοιπους συναδέλφους του Γραφείου μου, για την ηθική υποστήριξη τους κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης των μαθημάτων αλλά και των εξεταστικών περιόδων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών.

Επίσης όλους τους καθηγητές μου και ιδιαίτερα τον Πρόεδρο του Τμήματος Καθηγητή Μπουκουβάλα Αντώνη και τον υπεύθυνο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Αναπληρωτή Καθηγητή Τσούλο Γεώργιο, για την εμπιστοσύνη και την πολύτιμη στήριξη τους που μου πρόσφεραν σε μία ιδιαίτερα δύσκολη οικογενειακή στιγμή, κατά τη διάρκεια του φοίτησής μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα.

Τέλος οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αμέριστη στήριξη, κατανόηση, βοήθεια και παρότρυνση καθ' όλη τη διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος, που πραγματικά χωρίς αυτήν δεν θα γραφόταν αυτές οι γραμμές και δεν θα μπορούσα να ολοκληρώσω τις σπουδές μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	i
Ευχαριστίες.....	iii
Πίνακας Περιεχομένων	iv
Περίληψη	viii
Κεφάλαιο 1 ^ο	1
1. Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης	1
Κεφάλαιο 2 ^ο	10
2. Το Μοντέλο Απωλειών Πολυδιάστατης Τυχαίας Κίνησης (Erlang Multirate Loss Model – EMLM).....	10
Κεφάλαιο 3 ^ο	20
3. Μοντέλο Απωλειών Κλήσεων Πολιτικής Πλήρους Διάθεσης με Συμπίεση και Εφαρμογή αυτού σε Συστήματα 3 ^{ης} Γενιάς (UMTS).....	20
Κεφάλαιο 4 ^ο	35
4. Παράδειγμα – Εφαρμογή του Μοντέλου	35
Κεφάλαιο 5 ^ο	43
5. Συμπεράσματα – Μελλοντικές Εργασίες.....	43
Παράρτημα	46
Βιβλιογραφία.....	58

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ ΣΧΗΜΑΤΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
1.1	Διάγραμμα Μεταπτώσεων Καταστάσεων	7
1.2	Σύστημα Απωλειών Κλήσεων	8
1.3	Σύστημα Αναμονής Κλήσεων	8
2.1	Παράδειγμα Μοντέλου Απωλειών Εξυπηρέτησης δύο Κατηγοριών Κλήσεων με Πολιτική Πλήρους Διάθεσης	12
2.2	Διάγραμμα Καταστάσεων δύο Κατηγοριών Κλήσεων	13
2.3	Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων (χωρίς φραγή των κλήσεων)	14
2.4	Διάγραμμα Οριακών Καταστάσεων - Πρώτη Κατηγορία Κλήσεων	17
2.5	Διάγραμμα Καταστάσεων του παραδείγματος EMLM (σφαιρική ισορροπία)	19
3.1	Υποδειγματικό Σύστημα με Συμπίεση	27
3.2	Δομή του δικτύου UMTS	29
3.3	Παράδειγμα Λειτουργίας του Χρονοπρογραμματιστή Πακέτων	31

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ	ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	ΣΕΛΙΔΑ
1	Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 1 ^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης	36
2	Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 2 ^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης	36
3	Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 3 ^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης	37
4	Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 4 ^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης	37
5	Ποσοστιαία πιθανότητα απωλειών κλήσεων μεταξύ των δύο μοντέλων	41

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ	ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	ΣΕΛΙΔΑ
4.1	Πιθανότητα απωλειών κλήσεων (PB) 1ης κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM).	39
4.2	Πιθανότητα απωλειών κλήσεων (PB) της 2ης της δεύτερης κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM).	40
4.3	Πιθανότητα απωλειών κλήσεων (PB) της 3ης κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM)	40
4.4	Πιθανότητα απωλειών κλήσεων (PB) της 4ης κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM)	41
4.5	Πιθανότητα απωλειών κλήσεων όλων των κατηγοριών μεταξύ μοντέλου Stasiak και EMLM.	42

Περίληψη

Η συνεχιζόμενη αύξηση του αριθμού των χρηστών σταθερής και κινητής επικοινωνίας σε συνδυασμό με την ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για υπηρεσίες ήχου, εικόνας και δεδομένων μέσω των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, οδηγούν στην ανάγκη για εξεύρεση νέων και σύγχρονων μεθόδων κάλυψης των αναγκών αυτών. Μία τέτοια μέθοδος είναι για παράδειγμα η επεξεργασία και η εφαρμογή νέων και σύγχρονων αλγορίθμων στα συστήματα αυτά όπου μπορούν κι αξιοποιούν στο μέγιστο δυνατό τον υπάρχον εξοπλισμό τους αλλά και το διατιθέμενο εύρος ζώνης των καναλιών.

Με την ανάλυση μιας τέτοιας μεθόδου θα ασχοληθούμε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Θα αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας και εφαρμογής ενός σύγχρονου αλγόριθμου συμπίεσης εύρους ζώνης σε συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G), τεχνολογίας WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), τα οποία είναι συστήματα που εξυπηρετούν διαφορετικές κατηγορίες κίνησης με διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης. Ο αλγόριθμος που θα αναλύσουμε μελετά την συμπίεση εύρους ζώνης σε κλήσεις που ήδη εξυπηρετούνται από το σύστημα. Η συμπίεση εύρους ζώνης αποσκοπεί στην απελευθέρωση εύρους ζώνης προς όφελος νέων κλήσεων, ενώ δεν αλλοιώνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των κλήσεων που ήδη εξυπηρετούνται. Έτσι θα εξετάσουμε τις κλήσεις οι οποίες μπορούν και μεταβάλλουν το εύρος ζώνης που έχουν δεσμεύσει από το σύστημα (ελαστικός ρυθμός μετάδοσης) προκειμένου να δεχτεί το σύστημα περισσότερες κλήσεις.

Η διπλωματική αυτή εργασία χωρίζεται σε πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο περιγράφονται οι βασικές έννοιες και ορολογίες τις οποίες θα συναντήσουμε στη συνέχεια, όπως για παράδειγμα τι καλείται κλήση, τι είναι ο χρόνος εξυπηρέτησης μιας κλήσης, τι ορίζεται φορτίο κίνησης κλπ [1]. Επίσης αναλύεται το μοντέλο απωλειών μίας κατηγορίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Στο δεύτερο κεφάλαιο θα αναλύσουμε το μοντέλο απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης (Erlang Multirate Loss Model) με πολιτική πλήρους διάθεσης (Complete Sharing Policy) του εύρους ζώνης και την εφαρμογή της φόρμουλας των Kaufman – Roberts [2], [3], με σκοπό τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε έναν

αλγόριθμο συμπίεσης του εύρους ζώνης των κλήσεων καθώς και την εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού σε δίκτυο WCDMA όπως περιγράφεται στην εργασία [4]. Κύριο χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι ότι βασίζεται στην φόρμουλα των Kaufman-Roberts και δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της πιθανότητας απώλειας κλήσεων με ελαστικό ή μη ελαστικό εύρος ζώνης. Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παραθέσουμε μερικά παραδείγματα και διαγράμματα καθώς και τα συμπεράσματα από την παρούσα διπλωματική εργασία. Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο θα αναπτύξουμε τις δυνατότητες και τις προοπτικές που απορρέουν για μελλοντικές εργασίες.

Κεφάλαιο 1^ο

1. Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

1.1. Ορισμοί και Συνθήκες

1.1.1. Κλήση

Κλήση (call) ονομάζεται το αίτημα ενός χρήστη που καλείται *συνδρομητής (subscriber)*, για σύνδεση σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα μέσω μιας γραμμής η οποία λέγεται *συνδρομητική γραμμή (subscriber's line)* ή *trunk*.

1.1.2. Φορτίο Κίνησης

Ως *φορτίο κίνησης (traffic load)* ορίζεται η συνολική διάρκεια όλων των κλήσεων που διεκπεραιώθηκαν από το σύστημα, εντός καθορισμένου χρονικού διαστήματος το οποίο λαμβάνεται ως μονάδα μέτρησης και συμβολίζεται με το (α) [1, κεφ. 2]. Το φορτίο κίνησης είναι αδιάστατο μέγεθος αλλά το μετράμε με το Erlang (erl) το οποίο έχει καθιερωθεί ως μονάδα μέτρησης προς τιμήν του Δανού μαθηματικού A. K. Erlang του ιδρυτή της θεωρίας της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης. Το Erlang ορίζεται με χρόνο αναφοράς τη μία ώρα.

Το φορτίο κίνησης (α) που φθάνει σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\alpha = c \cdot h \quad (\text{erl}) \quad (1.1)$$

όπου (c) είναι ο αριθμός των κλήσεων που φθάνουν στο σύστημα και (h) είναι η μέση διάρκεια εξυπηρέτησής τους, δηλαδή ο μέσος χρόνος κατά τον οποίο απασχολούν το σύστημα. Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων (arrival rate) συμβολίζεται με (λ) και είναι ένας σταθερός και ακέραιος αριθμός. Έτσι το φορτίο κίνησης (α) που διεκπεραιώνεται από μία μόνο γραμμή, είναι ισοδύναμο με την πιθανότητα ότι η γραμμή αυτή χρησιμοποιείται, δηλαδή είναι το ποσοστό του χρόνου που η γραμμή είναι κατειλημμένη. Επομένως μία γραμμή μπορεί να μεταφέρει μόνο ένα (1) erlang το πολύ (αφού η μέγιστη τιμή της πιθανότητας είναι 1).

1.1.3. Διάρκεια κλήσης

Διάρκεια κλήσης (holding time) καλείται το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται αποδεκτή μία κλήση από το σύστημα έως ότου αυτή η κλήση τερματιστεί και

συμβολίζεται με (h). Το διάστημα αυτό ονομάζεται επίσης και *χρόνος εξυπηρέτησης* (*service time*) της κλήσης [1].

1.1.4. Πολυδιάστατη Κίνηση

Ορίζουμε ως *πολυδιάστατη κίνηση* (*multi – rate traffic*) όλες τις κατηγορίες των κλήσεων που εισέρχονται σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με διαφορετικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης μεταξύ. Ως παράδειγμα *πολυδιάστατη κίνησης* μπορούμε να αναφέρουμε τα συστήματα που διεκπεραιώνουν κλήσεις φωνής (*voice*), δεδομένων (*data*) και *video* με διαφορετικές ταχύτητες μετάδοσης το καθένα.

Επίσης θα πρέπει να ορίσουμε ότι στα συστήματα της *πολυδιάστατη κίνησης* που θα εξετάσουμε παρακάτω, θεωρούμε ότι οι απαιτήσεις των κλήσεων σε εύρος ζώνης μετρώνται σε ακέραιες τιμές.

1.1.5. Βαθμός Εξυπηρέτησης

Βαθμός εξυπηρέτησης (*Grade of Service, GoS*) είναι ένας δείκτης όπου συμβολίζει την ποιότητα εξυπηρέτησης ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και ορίζεται ως το ποσοστό των κλήσεων που δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί –λόγω πληρότητας του συστήματος– κι οι κλήσεις αυτές είτε χάνονται είτε μπαίνουν σε μία ουρά αναμονής για να εξυπηρετηθούν. Έτσι σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα όπου έχουμε απώλειες των κλήσεων ο *βαθμός εξυπηρέτησης* μαθηματικά μπορεί να εκφραστεί με την παρακάτω σχέση [1]:

$$B = \frac{\text{Συνολικός Αριθμός Χαμένων Κλήσεων}}{\text{Συνολικός Αριθμός Προσφερόμενων Κλήσεων}} \quad (1.2)$$

Συνεπώς όσο μεγαλύτερο είναι το *GoS* έπεται ότι το ποσοστό των κλήσεων που θα χάνονται σε περιπτώσεις με αυξημένη ζήτηση είναι πολύ μεγάλο. Από την παραπάνω σχέση προκύπτει επίσης ότι ο *βαθμός εξυπηρέτησης* θα πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος της μονάδας.

Θα πρέπει να σημειώσουμε δύο πολύ σημαντικούς παράγοντες για το *βαθμό εξυπηρέτησης* που είναι:

- Οι ώρες αιχμής κατά τις οποίες υπάρχει αυξημένη ζήτηση για μεγαλύτερη εξυπηρέτηση αλλά και καλύτερης ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών (*Quality of Service, QoS*) και

- Οι περιπτώσεις όπως σε προγραμματισμένες χρονικές περιόδους όπως οι περίοδοι των εορτών (π.χ. αλλαγή νέου χρόνου) ή κάποιο ξαφνικό γεγονός.

Επομένως ο βαθμός εξυπηρέτησης για ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα καθορίζεται κυρίως στις παραπάνω περιπτώσεις που αναφέραμε, γιατί στις υπόλοιπες ώρες λειτουργίας του συστήματος η παρεχόμενη ποιότητα εξυπηρέτησης είναι πολύ καλύτερη από αυτή που δείχνει ο βαθμός εξυπηρέτησης. Έτσι αν έχουμε ένα πολύ μεγάλο βαθμός εξυπηρέτησης (π.χ. GoS = 20%) τότε θα έχουμε ένα πολύ μεγάλο αριθμό αποκλεισμένων χρηστών όπου δεν θα μπορούν να εξυπηρετηθούν. Αντίστοιχα αν έχουμε ένα πάρα πολύ μικρό βαθμός εξυπηρέτησης (GoS \rightarrow 0) τότε αυτό συνεπάγεται ότι το σύστημα διαθέτει ένα πολύ μεγάλο αριθμό πηγών (resources) σε σύγκριση με τις απαιτήσεις, με αποτέλεσμα να υπάρχει επιπλέον εξοπλισμός και το σύστημα να υπολειτουργεί τις περισσότερες ώρες.

1.1.6. Συμφόρηση Τηλεπικοινωνιακού Συστήματος

Συμφόρηση (congestion) σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα δημιουργείται όταν όλες οι γραμμές του συστήματος τυγχάνει να είναι κατειλημμένες κι έτσι να μην μπορεί το σύστημα να δεχθεί άλλες κλήσεις [1, Κεφ. 1]. Στην περίπτωση αυτή οι κλήσεις που θα αφιχθούν στο σύστημα θα απορριφθούν με αποτέλεσμα το φορτίο που θα διεκπεραιωθεί τελικά από το σύστημα να είναι μικρότερο του προσφερόμενου φορτίου που θα αφιχθεί σε αυτό.

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι ισχύει η σχέση:

$$\text{Διεκπεραιούμενη Κίνηση} = \text{Προσφερόμενη Κίνηση} - \text{Απώλειες Κλήσεων} \quad (1.3)$$

1.2. Διαδικασίες Άφιξης και Εξυπηρέτησης Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

1.2.1. Διαδικασία Άφιξης των Κλήσεων

Όπως είδαμε παραπάνω σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα φθάνουν πολλές κλήσεις. Ο τρόπος γέννησης των κλήσεων αυτών είναι τυχαίος και όχι χρονικά προγραμματισμένος. Έτσι οι χρήστες όπου δημιουργούν τις κλήσεις με αποτέλεσμα αυτές να φθάνουν στο σύστημα, δεν ακολουθούν κάποιο χρονοδιάγραμμα για το πότε θα καλέσουν. Επίσης θα πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις [1, κεφ. 1]:

Σε οποιοδήποτε χρονικό διάστημα (Δt), τείνοντας στο μηδέν ($\Delta t \rightarrow 0$):

1. Η πιθανότητα $P_1(\Delta t)$ ότι μια κλήση θα γεννηθεί σε χρονικό διάστημα $(t, t + \Delta t)$ τείνει στο $(\lambda \Delta t)$, ανεξάρτητα από το χρόνο (t) , όπου (λ) είναι σταθερός αριθμός.
2. Η πιθανότητα $P_{2+}(\Delta t)$ ότι δύο ή περισσότερες κλήσεις γεννιούνται εντός του χρονικού διαστήματος $(t, t + \Delta t)$ τείνει στο μηδέν.
3. Οι κλήσεις γεννιούνται ανεξάρτητα η μία από την άλλη.

Αν ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις τότε η τυχαία αυτή διαδικασία γεννήσεως των κλήσεων καλείται διαδικασία Poisson και είναι το φυσικό επακόλουθο των παρακάτω δύο γεγονότων:

- i. Ότι οι αφίξεις των κλήσεων δημιουργούνται από πολύ μεγάλο αριθμό χρηστών (θεωρητικά άπειρο) και
- ii. Ότι οι χρήστες αυτοί είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους.

Επίσης θα πρέπει να επισημάνουμε ότι στη διαδικασία Poisson ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων παραμένει σταθερός (λ) , ακόμη κι αν στο πρόσφατο παρελθόν δεν υπήρξε καμία άφιξη κλήσης στο σύστημα [1, κεφ. 1].

Την παραπάνω διαδικασία μπορούμε να την εκφράσουμε μαθηματικά ως εξής:

Έστω (k) οι κλήσεις που γεννιούνται εντός του χρονικού διαστήματος $(0, t]$. Μπορούμε να χωρίσουμε το διάστημα $(0, t]$ σε ένα μεγάλο αριθμό (n) ίσων τμημάτων Δt , όπου $\Delta t = \frac{t}{n}$. Τότε η πιθανότητα $P_1(k, t)$ να γεννηθεί μία ακριβώς κλήση σε (k) διαστήματα ενώ στα υπόλοιπα $(n - k)$ διαστήματα να μη γεννηθεί καμία κλήση δηλ. να έχουμε (k) κλήσεις σε (k) συγκεκριμένα διαστήματα, είναι:

$$P_1(k, t) = [P_1(\Delta t)]^k \cdot [P_0(\Delta t)]^{n-k} = [P_1(\Delta t)]^k \cdot [1 - P_1(\Delta t) - P_{2+}(\Delta t)]^{n-k} = (\lambda \Delta t)^k \cdot (1 - \lambda \Delta t - 0)^{n-k} = (\lambda \Delta t)^k \cdot (1 - \lambda \Delta t)^{n-k} \quad (1.4)$$

Έτσι προκύπτει ότι η πιθανότητα να προκύψουν (k) κλήσεις σε χρονικό διάστημα (t) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P(k, t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (1.5)$$

Η παραπάνω σχέση, η απόδειξη της οποίας βρίσκεται στο [1, κεφ. 1], εκφράζει την κατανομή Poisson με μέση τιμή (λt) . Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέση τιμή της κατανομής Poisson ισούται με τη διασπορά της (σ^2) . Δηλαδή ισχύει:

$$\sigma^2 = \lambda \Delta t \quad (1.6)$$

Από την παραπάνω σχέση (1.5) που εκφράζει την κατανομή Poisson προκύπτει ότι η πιθανότητα να αφιχθούν μηδενικές κλήσεις στο διάστημα $(0, t]$, είναι:

$$P(0, t) = e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

Έτσι συμπεραίνουμε ότι πιθανότητα του χρονικού διαστήματος μεταξύ δύο αφίξεων το οποίο καλείται μεσοδιάστημα (interarrival time), δεν θα υπερβεί την τιμή (t) και μπορούμε να την υπολογίσουμε από τη σχέση:

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1.8)$$

Η σχέση αυτή εκφράζει τη συνάρτηση κατανομής των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των αφίξεων των κλήσεων (Probability Distribution Function, PDF) και είναι εκθετική με μέση τιμή $(\frac{1}{\lambda})$.

1.2.2. Χρόνος Εξυπηρέτησης των Κλήσεων

Είναι ο χρόνος στον οποίο εξυπηρετείται μία κλήση από τη στιγμή που θα γίνει αποδεκτή από το σύστημα έως ότου τερματιστεί. Έτσι στο χρονικό αυτό διάστημα η κλήση δεσμεύει τους πόρους του συστήματος που απαιτεί, μέχρι που θα ολοκληρωθεί και οι πόροι αυτοί θα ελευθερωθούν για τις νέες κλήσεις.

Ο χρόνος εξυπηρέτησης συχνά αναφέρεται και ως εκθετικός χρόνος εξυπηρέτησης (exponential service time) των κλήσεων.

Το φορτίο κίνησης (α) εκφράζεται επίσης και από την παρακάτω σχέση ως εξής:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\mu} \quad (1.9)$$

όπου (μ) ο ρυθμός εξυπηρέτησης (service rate) ή ρυθμός τερματισμού των κλήσεων από το σύστημα.

Έτσι αν θεωρήσουμε σταθερό το (μ) καθ' όλη τη διάρκεια τότε η πιθανότητα να τερματίσει μια κλήση σε διάστημα $(t, t + \Delta t)$ είναι $(\mu \Delta t)$ ανεξάρτητα από το (t) όπως άλλωστε προκύπτει από την υπόθεση του τυχαίου τερματισμού της κλήσης. Έτσι η πιθανότητα μία κλήση να τερματιστεί μετά από χρόνο (t) και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$H(t) = e^{-\mu t} \quad (1.10)$$

Η παραπάνω σχέση είναι η συμπληρωματική συνάρτηση κατανομής $H(t)$ και η απόδειξή της αναφέρεται στο [1, κεφ. 1].

Επειδή στο σύστημά μας όμως θεωρήσαμε ότι έχουμε κατανομή Poisson στις κλήσεις, προκύπτει ότι ο χρόνος εξυπηρέτησης μιας κλήσης είναι $(\frac{1}{\mu})$ και ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Ισχύουν επίσης οι προϋποθέσεις (2) και (3) της προηγούμενης υποενότητας (1.3.1) όπου το (μ) παραμένει σταθερό και ότι στο χρόνο εξυπηρέτησης $(\frac{1}{\mu})$ μπορεί να εξυπηρετηθεί μία μόνο κλήση.

Επομένως αν τη χρονική στιγμή (t) βρίσκονται στο σύστημα (r) κλήσεις, τότε σε ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα Δt (όπου το $\Delta t \rightarrow 0$), ο ελάχιστος αριθμός των κλήσεων που θα παραμείνουν μέσα σε αυτό θα είναι $(k - 1)$ επειδή στο διάστημα αυτό μπορεί να γεννηθεί μία κλήση, να τερματιστεί μία κλήση ή τίποτα από τα δύο. Άρα ο μικρότερος αριθμός των κλήσεων που παραμένει στο σύστημα είναι $(k - 1)$.

1.3. Μοντέλα και Συστήματα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

1.3.1. Γενικά

Με τον όρο μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης εννοούμε την περιγραφή ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος με μαθηματικό τρόπο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξετάσουμε το μοντέλο απωλειών μονοδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης (Erlang) καθώς και το μοντέλο απωλειών πολυδιάστατης τηλεπικοινωνιακής κίνησης (Erlang Multirate Loss Model).

1.3.2. Μοντέλο Απωλειών Erlang

Το μοντέλο αυτό εξετάζει ένα σύστημα που διαθέτει συγκεκριμένη χωρητικότητα (C) και μπορεί να εξυπηρετήσει μία μόνο κατηγορία τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Ο ρυθμός άφιξης των κλήσεων (λ) στο σύστημα είναι σταθερός και ακολουθεί τη διαδικασία Poisson καθώς και ο ρυθμός εξυπηρέτησης των κλήσεων από το σύστημα είναι εκθετικά κατανομημένος και ίσος με $(\frac{1}{\mu})$. Εφ' όσον ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις, όπου τα μεσοδιαστήματα καθώς και ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων ακολουθούν την εκθετική κατανομή, τότε έχουμε το Μαρκοβιανό μοντέλο [1, κεφ. 1].

Επίσης κάθε εισερχόμενη κλήση που γίνεται αποδεκτή, καταλαμβάνει μία μονάδα εύρους ζώνης από τη διατιθέμενη χωρητικότητα (C) του συστήματος. Ο

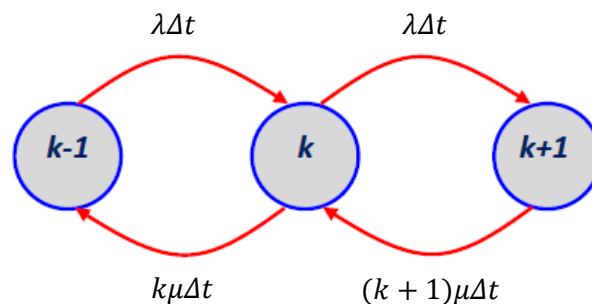
αποκλεισμός μιας κλήσης ισχύει όταν τη στιγμή της άφιξής της η χωρητικότητα (C) του συστήματος είναι πλήρως κατειλημμένη κι έτσι η κλήση μπλοκάρεται και χάνεται.

Σε αυτήν την περίπτωση η πιθανότητα απώλειας των κλήσεων, γνωστή ως **Erlang B** formula, μπορεί να υπολογισθεί σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, η απόδειξη της οποίας είναι στο [1]:

$$P_B = \frac{\frac{a^C}{C!}}{\sum_{i=0}^C \frac{a^i}{i!}} \quad (1.11)$$

όπου (a) το προσφερόμενο φορτίο κίνησης και (C) η χωρητικότητα του συστήματος.

Σε ένα Μαρκοβιανό μοντέλο μπορούμε να απεικονίσουμε διαγραμματικά τις μεταπτώσεις των καταστάσεων των κλήσεων με τη βοήθεια της μονοδιάστατης αλυσίδας Μαρκον, όπως άλλωστε φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



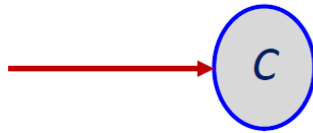
Σχήμα 1.1 Διάγραμμα μεταπτώσεων καταστάσεων

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε ότι, η μετάβαση από μία κατάσταση σε μία άλλη γίνεται με τη «γέννηση» μιας νέας κλήσης ή με τον τερματισμό μιας ήδη υπάρχουσας κλήσης που εξυπηρετήθηκε κι εγκατέλειψε. Έτσι όταν μία εισερχόμενη κλήση γίνει αποδεκτή, τότε θα έχουμε μετάβαση από την κατάσταση $(k - 1) \rightarrow (k)$ ή από την $(k) \rightarrow (k + 1)$ με ρυθμό (λ). Αντίστροφα όταν μία κλήση τερματιστεί τότε, θα έχουμε τη μετάβαση από την κατάσταση $(k + 1) \rightarrow (k)$ ή από την $(k) \rightarrow (k - 1)$ με ρυθμό εξυπηρέτησης (μ).

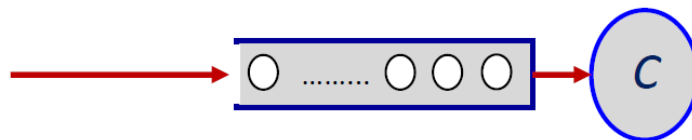
1.3.3. Συστήματα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Είναι τα συστήματα τα οποία διεκπεραιώνουν τις εισερχόμενες κλήσεις. Τα συστήματα αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: Τα συστήματα απωλειών κλήσεων (loss systems) και τα συστήματα με αναμονή κλήσεων (delay ή waiting systems) και

μπορούμε να τα αναπαραστήσουμε σχηματικά με τα παρακάτω σχήματα 1.2 και 1.3 αντίστοιχα:



Σχήμα 1.2 Σύστημα Απωλειών Κλήσεων



Σχήμα 1.3 Σύστημα Αναμονής Κλήσεων

Όπως βλέπουμε και στα παραπάνω σχήματα τα συστήματα αυτά αποτελούνται από: Μία συγκεκριμένη χωρητικότητα (C) του συστήματος που εκφράζεται σε μονάδες εύρους ζώνης (bandwidth units) και από το πλήθος των εισερχομένων κλήσεων. Η διαφορά τους είναι ότι τα συστήματα των απωλειών δεν διαθέτουν ουρά αναμονής κι έτσι οι κλήσεις που φθάνουν στα συστήματα αυτά απορρίπτονται και χάνονται εάν δεν υπάρχει διαθέσιμη η χωρητικότητα που απαιτείται για την διεκπεραίωσή τους.

Επίσης μία άλλη κατηγοριοποίηση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων είναι στα συστήματα που διαθέτουν όλους τους πόρους τους για εξυπηρέτηση των εισερχομένων κλήσεων και τα οποία καλούνται με πολιτική πλήρους διάθεσης (complete sharing policy) και στα συστήματα όπου διαθέτουν ένα μέρος μόνο των πόρων τους (limited sharing policy).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα εξετάσουμε μόνο τα συστήματα απωλειών και με πολιτική πλήρους διάθεσης.

Σύμφωνα με τον συμβολισμό του Kendall τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα με πολιτική πλήρους διαθεσιμότητας, μπορούν να συμβολισθούν ως εξής [1]:

$$A/B/s \quad (1.12)$$

όπου A : είναι η κατανομή πιθανότητας των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων

B : είναι η κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης και

s : είναι ο αριθμός των εξυπηρετητών του συστήματος (servers).

Επειδή όμως η κατανομή των αφίξεων των κλήσεων στο σύστημά μας είναι Poisson και στα πλαίσια της εργασίας αναφέραμε συνώνυμα τον όρο χωρητικότητα (C) του συστήματος αντί του όρου εξυπηρετητές (s), τότε η παραπάνω σχέση (1.12) μπορεί να εκφρασθεί και ως:

$$M/M/C(0) \tag{1.13}$$

όπου M : Markov (Μαρκοβιανή εκθετική κατανομή του χρονικού διαστήματος μεταξύ των αφίξεων των κλήσεων και του χρόνου εξυπηρέτησής τους) και το (0) συμβολίζει ότι το σύστημα δεν έχει ουρά αναμονής κλήσεων.

Κεφάλαιο 2^ο

2. Το Μοντέλο Απωλειών Πολυδιάστατης Τυχαίας Κίνησης (Erlang Multirate Loss Model – EMLM)

2.1. Περιγραφή του μοντέλου

Σε αντίθεση με το μοντέλο απωλειών Erlang, στο μοντέλο αυτό το σύστημα μπορεί να δέχεται τηλεπικοινωνιακή κίνηση όχι μόνο μίας κατηγορίας κλήσεων αλλά περισσότερων. Αυτό συμβαίνει γιατί με τη συνεχή εξέλιξη των επικοινωνιών και ταυτόχρονα τη ραγδαία αύξηση των συνδρομητών των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, σταθερής αλλά και κινητής τηλεφωνίας, δημιουργήθηκε η επιτακτική ανάγκη τα συστήματα αυτά να δέχονται μεγαλύτερο όγκο κίνησης, με διαφορετικές απαιτήσεις αλλά και με μεγαλύτερες ταχύτητες. Έτσι θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα τα συστήματα αυτά να καλύψουν τις απαιτήσεις αυτές με αξιόπιστο τρόπο αλλά και στον ελάχιστο δυνατό χρόνο.

Τέτοιες απαιτήσεις όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι οι υπηρεσίες φωνής, εικόνας και δεδομένων μέσω γραμμών υψηλών ταχυτήτων είτε σταθερής είτε κινητής τηλεφωνίας. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των υπηρεσιών αυτών είναι ότι δεσμεύουν διαφορετικές μονάδες εύρους ζώνης από την χωρητικότητα του συστήματος και για διαφορετικούς χρόνους για κάθε κατηγορία κλήσεων.

Έτσι ο λόγος που θα αναλύσουμε στην εργασία αυτή το μοντέλο των απωλειών της πολυδιάστατης και τυχαίας κίνησης, είναι γιατί το μοντέλο αυτό περιγράφει με ακρίβεια τα σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.

Για τη μελέτη αυτού του μοντέλου θα θεωρήσουμε γενικά ότι δέχεται (K) κατηγορίες κλήσεων. Η άφιξη των κλήσεων κάθε κατηγορίας $k = 1, 2, \dots, K$ ακολουθεί μια διαδικασία Poisson με ρυθμό (λ_k). Αντίστοιχα ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων είναι εκθετικά κατανομημένος με μέση τιμή ($\frac{1}{\mu_k}$). Όλες οι κλήσεις που γίνονται αποδεκτές από το σύστημα, εξυπηρετούνται από μία συγκεκριμένη χωρητικότητα (C) μονάδων εύρους ζώνης.

Μία κλήση της κατηγορίας k απαιτεί από το σύστημα ένα εύρος ζώνης ίσο με (b_k) κι αν αυτό είναι διαθέσιμο τότε η κλήση γίνεται δεκτή και εισέρχεται σ' αυτό. Αλλιώς απορρίπτεται και χάνεται.

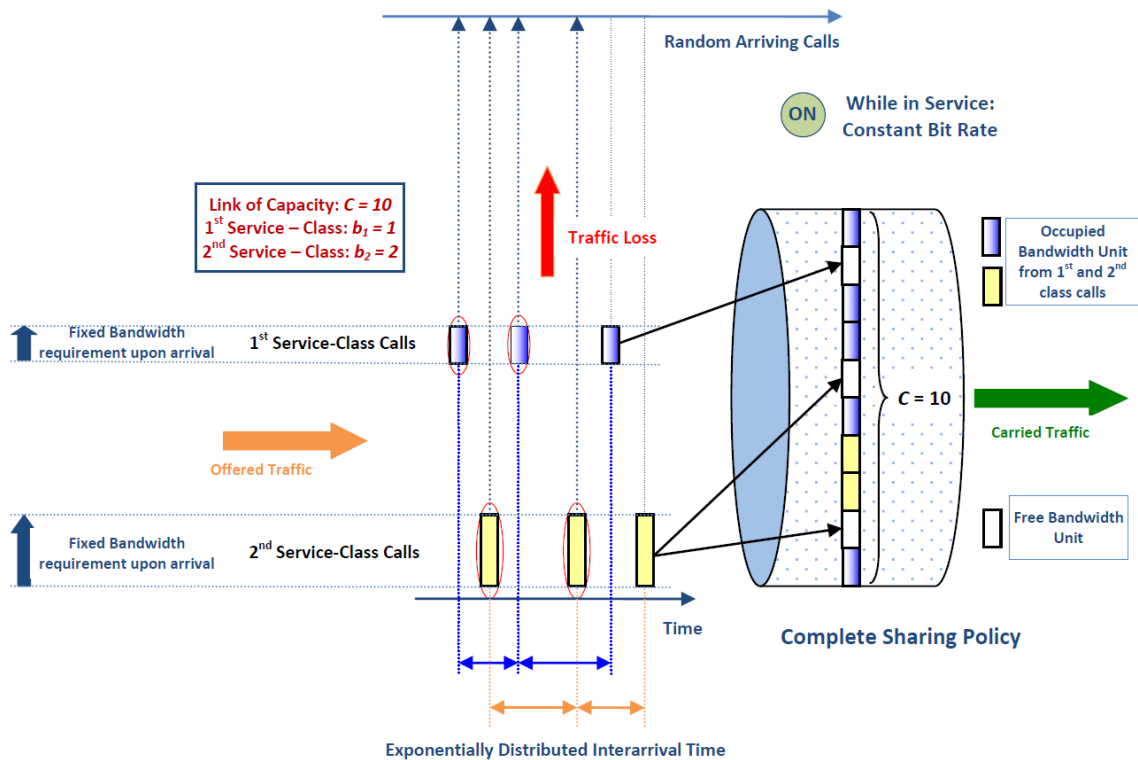
2.2. Ανάλυση του Μοντέλου EMLM

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το μοντέλο αυτό θα μελετήσουμε ένα σύστημα με την εξής μοντελοποίηση. Θεωρούμε ένα σύστημα απωλειών με τυχαία πολυδιάστατη κίνηση και με πολιτική πλήρους διάθεσης της χωρητικότητάς του (σχήμα 2.1).

Πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

- Η χωρητικότητά του αποτελείται από δέκα (10) μονάδες εύρους ζώνης ($C = 10$).
- Στο σύστημα εισέρχονται δύο (2) κατηγορίες κλήσεων, με χαρακτηριστικά τυχαίας κίνησης (κατανομή Poisson) και ρυθμούς άφιξης (λ_1) και (λ_2) και ρυθμούς εξυπηρέτησης (μ_1) και (μ_2), αντίστοιχα. Έτσι η πρώτη κατηγορία των κλήσεων έχει χαρακτηριστικά (λ_1, μ_1) και η δεύτερη κατηγορία (λ_2, μ_2).
- Θεωρούμε επίσης ότι η πρώτη κατηγορία των κλήσεων απαιτεί από το σύστημα μία μόνο μονάδα εύρους ζώνης ($b_1=1$) από τη χωρητικότητα για να εξυπηρετηθεί, ενώ η δεύτερη κατηγορία των κλήσεων απαιτεί δύο μονάδες εύρους ζώνης ($b_2=2$).
- Αυτό σημαίνει ότι όταν εισέλθει στο σύστημα μια νέα κλήση, είτε της πρώτης είτε της δεύτερης κατηγορίας απαιτεί μία ή δύο μονάδες εύρους ζώνης αντίστοιχα και αν βρει διαθέσιμη την απαιτούμενη χωρητικότητα που χρειάζεται, γίνεται αποδεκτή, τη δεσμεύει και εξυπηρετείται, αλλιώς απορρίπτεται (απώλεια κλήσης). Έτσι όλες οι εισερχόμενες κλήσεις της πρώτης κατηγορίας θα απορρίπτονται όταν όλη η χωρητικότητα του συστήματος είναι δεσμευμένη, ενώ οι κλήσεις της δεύτερης κατηγορίας θα φράσσονται όταν η $(C - 1)$ χωρητικότητα του συστήματος είναι δεσμευμένη.
- Τέλος οι διαθέσιμες μονάδες εύρους ζώνης του συστήματος, δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται σε σειρά μέσα στο σύστημα για να εξυπηρετηθεί μία κλήση της δεύτερης κατηγορίας.

Σχηματικά το παράδειγμά μας μπορούμε να το παραστήσουμε σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:

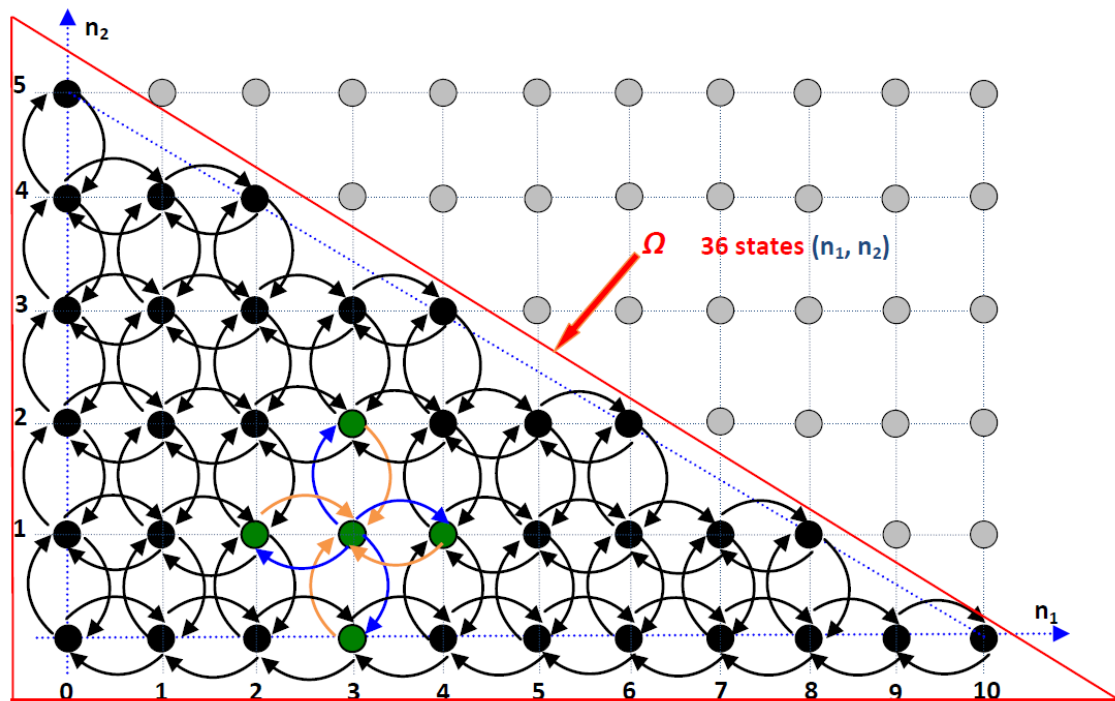


Σχήμα 2.1 Παράδειγμα Μοντέλου Απωλειών Εξυπηρέτησης δύο Κατηγοριών Κλήσεων με Πολιτική Πλήρους Διάθεσης

Αν συμβολίσουμε με (n_k) τον αριθμό των κλήσεων της κατηγορίας k οι οποίες εξυπηρετούνται από το σύστημα στη μόνιμη κατάσταση και με $n = (n_1, n_2, \dots, n_K)$ το διάνυσμα της μόνιμης κατάστασης, τότε μπορούμε να συμβολίσουμε τα διανύσματα που εκφράζουν την περίπτωση να έχουμε αύξηση των κλήσεων στο σύστημα ή μείωση των κλήσεων μέσα σ' αυτό.

Έτσι έχουμε το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης (n_k^+) όπου εκφράζει την μετάβαση του συστήματος στην επόμενη κατάσταση αυξανόμενη κατά μία κλήση της κατηγορίας (k) . Το σύνολο των κλήσεων τότε που θα βρίσκονται μέσα στο σύστημα θα είναι: $n_k^+ = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k + 1, n_{k+1}, \dots, n_K)$. Αντίστοιχα θα έχουμε για το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης (n_k^-) όπου εκφράζει την μετάβαση του συστήματος στην προηγούμενη κατάσταση μειωμένη κατά μία κλήση της κατηγορίας (k) . Το σύνολο των κλήσεων τότε που θα βρίσκονται μέσα στο σύστημα θα είναι: $n_k^- = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k - 1, n_{k+1}, \dots, n_K)$.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα καταστάσεων σύμφωνα με την **Μαρκοβιανή** ανάλυση είναι δισδιάστατα και στο παράδειγμά μας θα έχουμε:



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα Καταστάσεων δύο Κατηγοριών Κλήσεων

Στον οριζόντιο άξονα (n_1) του παραπάνω σχήματος 2.2 όπως βλέπουμε, παριστάνονται οι κλήσεις της πρώτης κατηγορίας ενώ στον κάθετο άξονα (n_2) παριστάνονται οι κλήσεις της δεύτερης κατηγορίας. Οι μέγιστες τιμές των δύο αξόνων ($n_1 = 10$) και ($n_2 = 5$) προκύπτουν από τις αντίστοιχες πράξεις $\lfloor \frac{C}{n_1} \rfloor$ και $\lfloor \frac{C}{n_2} \rfloor$.

Έτσι συμπεραίνοντας, μπορούμε να έχουμε συνδυασμό των δύο κατηγοριών (n_1, n_2) μέσα στο σύστημά μας, με τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε πόρους ανά κατηγορία ($b_1 = 1$) και ($b_2 = 2$). Επομένως οι κατειλημμένες μονάδες εύρους ζώνης (j) του συστήματος θα είναι $n_1 \cdot b_1 + n_2 \cdot b_2 = j$ όπου $j = 0, 1, 2, \dots, C$.

Αλλά μπορούμε να έχουμε και μόνο μία εκ των δύο κατηγοριών, είτε μόνο της πρώτης κατηγορίας είτε της δεύτερης. Για παράδειγμα θα μπορούμε να έχουμε δέκα κλήσεις μόνο από την πρώτη κατηγορία και καμία από τη δεύτερη και αντίστροφα θα μπορούμε να έχουμε πέντε μόνο κλήσεις από τη δεύτερη και καμία από την πρώτη. Καταλήγοντας, το σύνολο των κατειλημμένων πόρων του συστήματος δεν θα πρέπει να ξεπερνά το σύνολο της διαθέσιμης χωρητικότητάς του.

Γενικά θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση:

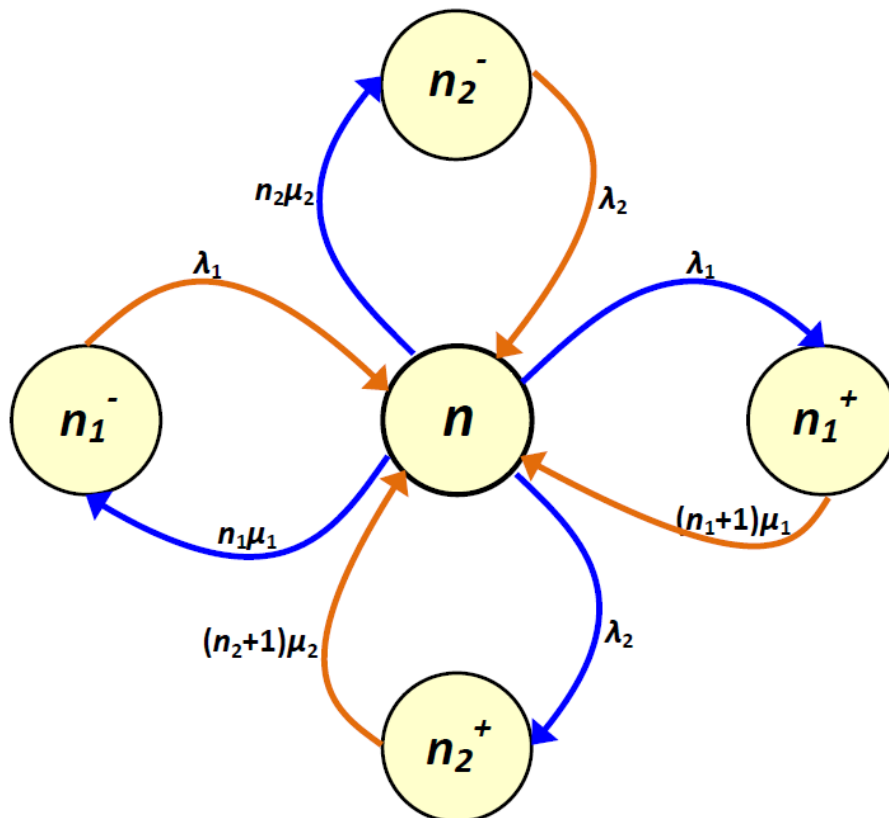
$$n_1 \cdot b_1 + n_2 \cdot b_2 \leq C \Rightarrow n_1 + 2n_2 \leq C = 10 \Rightarrow n_1 + 2n_2 = 10 \quad (2.1)$$

Η παραπάνω συνθήκη (2.1) εκφράζεται και γεωμετρικά από την υποτείνουσα του τριγώνου του σχήματος 2.2 και αποτελεί το όριο του συνδυασμού (n_1, n_2) . Όπως φαίνεται ο καθένας από τους μαύρους κύκλους αντιπροσωπεύει έναν συνδυασμό (n_1, n_2) . Το (Ω) συμβολίζει το σύνολο των δυνατών καταστάσεων του συστήματος, με τους πιθανούς συνδυασμούς των δύο κατηγοριών (n_1, n_2) των κλήσεων.

Απαραίτητη προϋπόθεση όμως είναι ότι η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο κατηγοριών κλήσεων, θα πρέπει να ανήκει μέσα στο σύνολο των καταστάσεων (Ω) που απεικονίζεται στο παραπάνω διάγραμμα (Σχ. 2.2). Στο παράδειγμά μας όπου έχουμε το σύστημα απωλειών με πολιτική πλήρους διάθεσης, τότε το σύνολο των δυνατών καταστάσεων (Ω) του συστήματος ορίζεται ως εξής:

$$\Omega = \{n: 0 \leq \sum_{k=1}^K n_k b_k \leq C\} \quad (2.2)$$

Επίσης μπορούμε να απεικονίσουμε με βέλη και τις μεταβάσεις των καταστάσεων του συστήματος, σύμφωνα με τη Μαρκοβιανή ανάλυση. Μια λεπτομερή απεικόνιση των μεταβάσεων από μία κατάσταση σε άλλη, παρατίθεται στο παρακάτω διάγραμμα μεταβάσεων:



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα Μετάβασης Καταστάσεων (χωρίς φραγή των κλήσεων)

Το παραπάνω διάγραμμα εκφράζει την μετάβαση των καταστάσεων μέσα στο σύστημά μας όπου δεν έχουμε απώλεια των κλήσεων σε καμία από τις δύο κατηγορίες. Έτσι όταν βρισκόμαστε στην κατάσταση ισορροπίας η οποία περιγράφεται από το διάνυσμα ισορροπίας $n(n_1, n_2)$, τότε οι καταστάσεις n_1^+, n_1^-, n_2^+ και n_2^- ακολουθούν την Μαρκοβιανή αλυσίδα και έχουν ως εξής:

- Η κατάσταση n_1^+ και με ρυθμό άφιξης κλήσεων λ_1 έχουμε: $n_1^+ := (n_1 + 1, n_2)$
- Η κατάσταση n_1^- με ρυθμό εξυπηρέτησης μ_1 ισχύει: $n_1^- := (n_1 - 1, n_2)$.

Αντίστοιχα:

- Η κατάσταση n_2^+ και με ρυθμό άφιξης των κλήσεων λ_2 ισχύει: $n_2^+ := (n_1, n_2 + 1)$ ενώ

- Η κατάσταση n_2^- με ρυθμό εξυπηρέτησης μ_2 θα ισχύει: $n_2^- := (n_1, n_2 - 1)$.

Έτσι μπορούμε να ορίσουμε την τοπική ισορροπία (local balance), εξετάζοντας την μετάβαση από τη μία κατάσταση σε μία άλλη και αντίστροφα. Πιο αναλυτικά αν αναλύσουμε τη μετάβαση από τη n στη n_1^+ τότε θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\lambda_1 \cdot P(n) = (n_1 + 1) \cdot \mu_1 \cdot P(n_1^+) \quad (2.3)$$

Ομοίως θα ισχύει και για όλες τις άλλες καταστάσεις. Έτσι ορίζουμε την τοπική ισορροπία σε ένα σύστημα όπου ο ρυθμός με τον οποίο μεταβαίνουμε από μία κατάσταση σε μια άλλη, με αύξηση κατά 1 των κλήσεων της μιας κατηγορίας ισούται με το ρυθμό της αντίστροφης μετάβασης.

Σύμφωνα με τα παραπάνω που περιγράψαμε και από την εξίσωση της σφαιρικής ισορροπίας (global balance equation) όπου ισχύει «Ρυθμός Εισόδου = Ρυθμός Εξόδου», προκύπτει:

$$\lambda_1 \cdot P(n_1^-) + \lambda_2 \cdot P(n_2^-) + (n_1 + 1) \cdot \mu_1 \cdot P(n_1^+) + (n_2 + 1) \cdot \mu_2 \cdot P(n_2^+) = (n_1 \mu_1 + n_2 \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot P(n) \quad (2.4)$$

Γενικεύοντας την παραπάνω σχέση για το σύστημά μας με (K) κατηγορίες εισερχομένων κλήσεων, καταλήγουμε στη μορφή της πιθανότητας μονίμου καταστάσεως, για τυχαία επιλογή διάθεσης των καναλιών του συστήματος, που είναι [2]:

$$P(n) = G^{-1} \left(\prod_{k=1}^K \frac{\alpha_k^{n_k}}{n_k!} \right) \quad (2.5)$$

Το G είναι η σταθερά κανονικοποίησης του συστήματος και δίνεται από την παρακάτω σχέση [2]:

$$G \equiv G(\Omega) = \sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right) \quad (2.6)$$

Η απόδειξη της σχέσης (2.5) η οποία απαντάται στο [1, κεφ. 6] γίνεται βάση της έννοιας της σφαιρικής ισορροπίας που προκύπτει από το διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων μιας μαρκοβιανής αλυσίδας K -διαστάσεων [σχήμα (2.3)].

Η πιθανότητα να έχουμε (j) κατειλημμένες μονάδες εύρους ζώνης της χωρητικότητας μέσα στο σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας είναι:

$$q(j) = \sum_{n \in \Omega} P(n) = \sum_{n \in \Omega} \prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} G^{-1}(\Omega) \quad (2.7)$$

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεως P_{b_k} μπορεί να εκφρασθεί και ως εξής:

$$P_{b_k} = \sum_{n: n \cdot b > C - b_k} P(n) \quad (2.8)$$

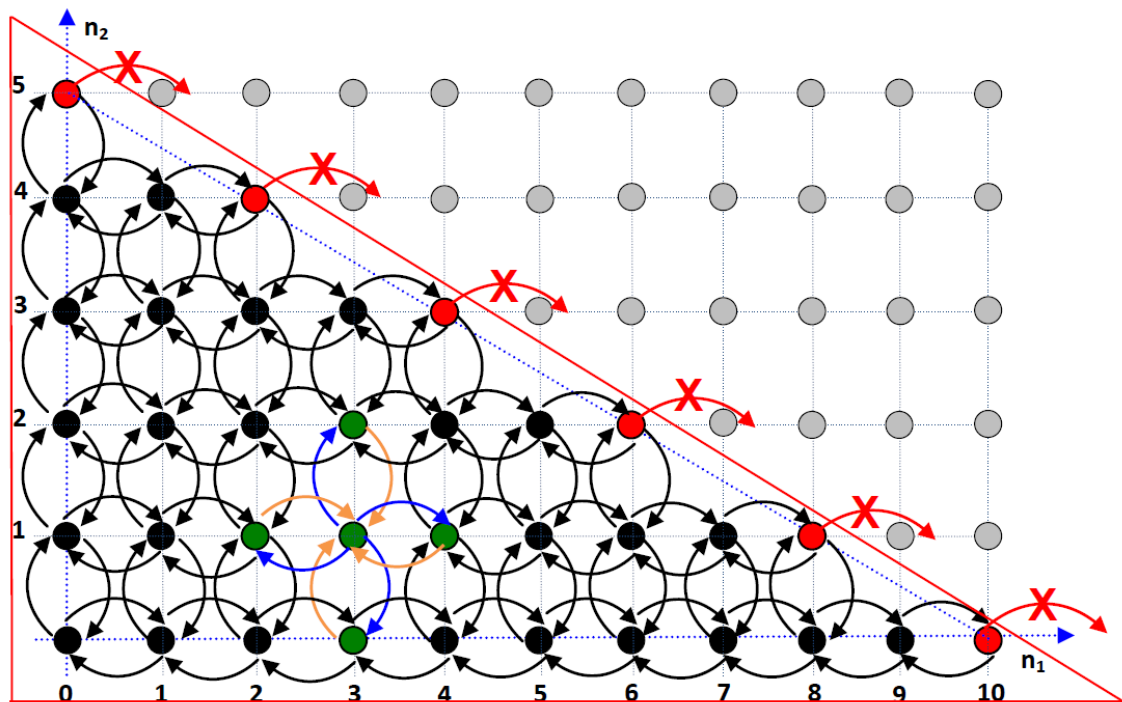
Όταν στο σύστημα οι κατειλημμένες μονάδες εύρους ζώνης είναι: $j = n \cdot b > C - b_k$ έχουμε απώλεια των κλήσεων (k) κατηγορίας και η πιθανότητα P_{b_k} μπορεί να εκφρασθεί και ως το άθροισμα των πιθανοτήτων $q(j)$ όπου $j > C - b_k$. Έτσι έχουμε:

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_k+1}^C q(j) = \sum_{j=0}^{b_k-1} q(C-j) \quad (2.9)$$

Η παραπάνω σχέση (2.9) είναι η εξίσωση για τον υπολογισμό της πιθανότητας απωλειών κλήσεων και αναφέρεται ως φόρμουλα Erlang απωλειών πολυδιάστατης κίνησης (Erlang multi-rate loss formula) [1, κεφ. 6].

Η μετάβαση όμως των καταστάσεων μέσα στο σύστημά μας δεν μπορεί να συνεχίζεται συνεχώς εφ' όσον το σύστημα διαθέτει μία συγκεκριμένη χωρητικότητα (C) . Όταν όλες οι μονάδες εύρους ζώνης της χωρητικότητας του συστήματος βρεθούν να είναι δεσμευμένες, τότε το σύστημα θα βρεθεί σε οριακό σημείο ή σημείο κορεσμού όπου δεν θα μπορεί να δέχεται άλλες κλήσεις προς εξυπηρέτηση. Έτσι η πιθανότητα απώλειας μιας κλήσης της πρώτης κατηγορίας με τις ελάχιστες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, θα ισούται με την πιθανότητα να βρισκόμαστε σε μια από τις οριακές καταστάσεις του παραπάνω διαγράμματος (σχήμα 2.2). Επομένως θα είναι αδύνατη η μετάβαση του συστήματος στην επόμενη κατάσταση (n_1^+) .

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι οριακές καταστάσεις όσον αφορά την πρώτη κατηγορία κλήσεων (οι κύκλοι με κόκκινο χρώμα):



Σχήμα 2.4 Διάγραμμα Οριακών Καταστάσεων – Πρώτη Κατηγορία Κλήσεων

Άρα η πιθανότητα της απώλειας μιας κλήσης της πρώτης κατηγορίας θα είναι το άθροισμα των πιθανοτήτων να βρεθούμε στις καταστάσεις αυτές καθ' ότι πρόκειται για ανεξάρτητα μεταξύ τους γεγονότα.

Το ίδιο αποτέλεσμα θα έχουμε και στις κλήσεις της δεύτερης κατηγορίας όπου οι απαιτήσεις σε πόρους από το σύστημα είναι μεγαλύτερες.

2.3. Αναδρομικός Τύπος Υπολογισμού της Πιθανότητας Απώλειας Κλήσεως

Στην προηγούμενη ενότητα είδαμε την πιθανότητα αποκλεισμού των εισερχομένων κλήσεων σύμφωνα με τις σχέσεις (2.5) και (2.6) όταν το σύστημα βρίσκεται σε οριακό σημείο και δεν μπορεί να δεχθεί άλλες κλήσεις. Η μέθοδος αυτή που είναι μέθοδος γινομένου, είναι ακριβής στον υπολογισμό της πιθανότητας αποκλεισμού αλλά δεν μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα λόγω ύπαρξης των παραγοντικών.

Έτσι θα αναλύσουμε μία εναλλακτική φόρμουλα υπολογισμού της πιθανότητας αποκλεισμού των κλήσεων. Η φόρμουλα αυτή η οποία βασίζεται σε έναν ακριβή αναδρομικό τύπο, ονομάζεται φόρμουλα Kaufman – Roberts και μπορεί να περιγραφεί από μία μονοδιάστατη αλυσίδα Markov.

Ας επικαλεστούμε πάλι το παράδειγμα της προηγούμενης ενότητας. Από τη σχέση (2.9) παρατηρούμε ότι ο υπολογισμός της πιθανότητας απωλειών κλήσεων (P_{b_k}) μπορεί να εκφρασθεί από μία αναδρομική σχέση γνωστή και ως φόρμουλα των Kaufman – Roberts (Kaufman – Roberts Recursion) [2], [3]. Η αναδρομική αυτή σχέση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \alpha_k b_k q(j - b_k) & \text{για } j = 1, 2, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.10)$$

όπου $q(j)$ είναι η μη κανονικοποιημένη πιθανότητα να υπάρχει (j) κατειλημμένο εύρος ζώνης του συστήματος.

Από την παραπάνω αναδρομική σχέση όμως υπολογίζουμε τις μη κανονικοποιημένες τιμές των απωλειών των κλήσεων. Έτσι για να υπολογίσουμε τις κανονικοποιημένες τιμές των απωλειών, θα πρέπει να διαιρέσουμε την αναδρομική σχέση (2.10) με το άθροισμα των $q(j)$ έτσι ώστε να προκύψουν οι κανονικοποιημένες τιμές.

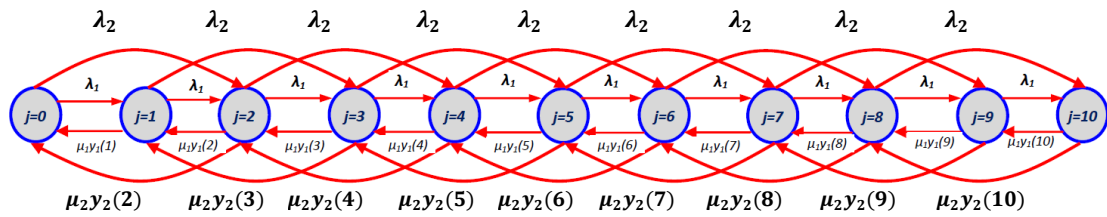
Τελικά η σχέση που προκύπτει μετά τα παραπάνω για την πιθανότητα απώλειας μίας κλήσης της κατηγορίας (k) είναι:

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_{k+1}}^C \left(\frac{q(j)}{\sum_{j=0}^C q(j)} \right) \quad (2.11)$$

Τα κύρια χαρακτηριστικά της παραπάνω αναδρομικής σχέσης (2.10) είναι:

- i. Η εξίσωση ισχύει για χρόνους εξυπηρέτησης αυθαίρετης κατανομής και όχι κατ' ανάγκη εκθετικής κατανομής [2].
- ii. Η απόδειξη της σχέσης βασίζεται σε μια εξίσωση τοπικής ισορροπίας όπου περιγράφει τη διαδικασία «γέννησης» και «θανάτου» των κλήσεων με ρυθμό «γέννησης» $\lambda_k q(j - b_k)$ και ρυθμό «θανάτου» $\mu_k q(j)$ [2].

Έτσι για το παράδειγμα του μοντέλου απωλειών κλήσεων (EMLM) που αναλύσαμε στην ενότητα (2.1), μπορούμε να απεικονίσουμε τη μετάβαση των καταστάσεων, ως εξής (σχ. 2.2):



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα Καταστάσεων του παραδείγματος EMLM (σφαιρική ισορροπία)

iii. Με τον αναδρομικό τύπο μειώνεται η υπολογιστική πολυπλοκότητα του μοντέλου. Έτσι για τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας των κλήσεων δεν χρειάζεται να υπολογίσουμε το σύνολο των δυνατών καταστάσεων του μοντέλου, συγκεκριμένα στο παράδειγμά μας (36) καταστάσεις, αλλά μόνο τις πιθανότητες των $q(j)$ μονοδιάστατων καταστάσεων $j = 10$.

Κεφάλαιο 3^ο

3. Μοντέλο Απωλειών Κλήσεων Πολιτικής Πλήρους Διάθεσης με Συμπίεση και Εφαρμογή αυτού σε Συστήματα 3^{ης} Γενιάς (UMTS)

3.1. Γενικά

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύσαμε το μοντέλο απωλειών κλήσεων με πολιτική πλήρους διάθεσης, το οποίο δέχεται δύο κατηγορίες κλήσεων με διαφορετικές απαιτήσεις η κάθε μία κατηγορία αλλά χωρίς να μεταβάλλουν τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης από το σύστημα στο οποίο εξυπηρετούνται.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε πάλι τα συστήματα αυτά τα οποία δέχονται κλήσεις διαφορετικών κατηγοριών, αλλά όμως με τη δυνατότητα μία από τις κατηγορίες αυτές να έχει την ιδιότητα της συμπίεσης του εύρους ζώνης της (Bandwidth Compression). Το χαρακτηριστικό της συμπίεσης είναι ότι οι κλήσεις της κατηγορίας αυτής όταν βρίσκονται μέσα στο σύστημα το οποίο είναι πλήρες, μπορούν και μεταβάλλουν τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης, από μία ελάχιστη (min) έως και μία μέγιστη (max) τιμή, με αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση περισσότερων κλήσεων [4].

3.1.1. Το Μοντέλο EMLM με Συμπίεση Εύρους ζώνης

Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε πάλι το σύστημα EMLM που εξετάσαμε στην ενότητα 2.2 με τα ίδια χαρακτηριστικά. Θεωρούμε όμως ότι το σύστημα δέχεται τώρα ένα μίγμα δύο διαφορετικών ομάδων κλήσεων με πολυδιάστατη κίνηση η κάθε ομάδα, η μία εκ των οποίων έχει την ιδιότητα της συμπίεσης. Έτσι το σύστημα εξυπηρετεί ταυτόχρονα δύο ομάδες πολυδιάστατης κίνησης: Την πρώτη ομάδα που έχει συνολικά (K) κατηγορίες κίνησης κλήσεων και διατηρούν τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης σταθερό και τη δεύτερη ομάδα που έχει συνολικά (L) κατηγορίες κίνησης κλήσεων και μπορούν να μεταβάλλουν τις απαιτήσεις τους όταν αυτό απαιτηθεί [4].

Η μεταβολή αυτή συνεπάγεται τη μείωση των απαιτήσεων έτσι ώστε να αποδεσμευθεί εύρος ζώνης του συστήματος για να εξυπηρετήσει περισσότερες κλήσεις. Θεωρούμε επίσης ότι η συμπίεση αυτή εφαρμόζεται κατά τον ίδιο βαθμό σε όλες τις κλήσεις αυτής της ομάδας πολυδιάστατης κίνησης και όπως θα δούμε πιο αναλυτικά παρακάτω, είναι συνάρτηση της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής των απαιτήσεων που αιτούνται οι κλήσεις αυτές στο σύστημα.

Γενικά ισχύει ότι όταν φτάσει μία κλήση της ομάδας (K) στο σύστημα με απαίτηση σε εύρος ζώνης (b_k) τότε η κλήση αυτή θα εξυπηρετηθεί αν και μόνο αν ισχύει η ανισότητα $C - j \geq b_k$ όπου (C) όπως είδαμε η συνολική χωρητικότητα του συστήματος και (j) το δεσμευμένο εύρος ζώνης του συστήματος εκείνη τη στιγμή από το σύνολο των κλήσεων. Αν όμως ισχύει η $C - j < b_k$ τότε η κλήση της ομάδας θα απορριφθεί.

Αντίστοιχα όταν φτάσει μια κλήση της ομάδας (L) με απαίτηση (b_i) η κλήση θα εξυπηρετηθεί αν ισχύει $C - j \geq b_i$ αλλά αν το διαθέσιμο εύρος ζώνης δεν αρκεί για να καλύψει τις απαιτήσεις της κλήσης τότε αντί να απορριφθεί, θα εφαρμοσθεί η ιδιότητα της συμπίεσης των κλήσεων από το σύστημα για να γίνει αποδεκτή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να συμβολίσουμε τις δύο αυτές ομάδες πολυδιάστατης κίνησης που βρίσκονται μέσα στο σύστημα κι εξυπηρετούνται ως εξής:

- i. Πρώτη ομάδα πολυδιάστατης κίνησης με διατήρηση των απαιτήσεων των διαφόρων κατηγοριών κλήσεων τους σταθερές και συμβολίζεται με \mathbb{M}_{nk} όπου ισχύει η σχέση: $M_{nk} = |\mathbb{M}_{nk}| = K$ και υποδηλώνει τον αριθμό των κατηγοριών των κλήσεων που δεν υπόκεινται σε συμπίεση.
- ii. Δεύτερη ομάδα πολυδιάστατης κίνησης χωρίς τη διατήρηση των απαιτήσεων των διαφόρων κατηγοριών κλήσεων τους σταθερές αλλά με μείωση των απαιτήσεών τους και συμβολίζεται με \mathbb{M}_k όπου ισχύει η σχέση: $M_k = |\mathbb{M}_k| = L$ και υποδηλώνει τον αριθμό των κατηγοριών των κλήσεων που υπόκεινται σε συμπίεση.

Αναφέραμε παραπάνω ότι οι απαιτήσεις των κλήσεων της δεύτερης ομάδας κατηγοριών με την ιδιότητα της συμπίεσης κυμαίνονται μεταξύ ελάχιστης και μέγιστης τιμής. Αυτό σημαίνει πως όταν οι κλήσεις δεν απαιτείται να συμπιεστούν διατηρούν την αρχική απαίτησή τους σε εύρος ζώνης από το σύστημα που είναι ο μέγιστος αριθμός μονάδων εύρους ζώνης ($b_{i,max}$) ενώ όταν συμπιέζονται ο ελάχιστος αριθμός μονάδων εύρους ζώνης ($b_{i,min}$).

Ο λόγος τώρα των δύο αυτών ορίων ($b_{i,max}$) και ($b_{i,min}$) μας δίνει το μέγιστο συντελεστή συμπίεσης (K_{max}) ο οποίος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$K_{max} = \frac{b_{i,max}}{b_{i,min}} \quad \forall i \in \mathbb{M}_k \quad (3.1)$$

Μπορούμε να δώσουμε ένα αριθμητικό παράδειγμα και να υπολογίσουμε το μέγιστο συντελεστή συμπίεσης. Έτσι στο υπό μελέτη σύστημά μας EMLM μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στις κλήσεις της δεύτερης ομάδας πολυδιάστατης κίνησης η μέγιστη απαίτησή τους σε εύρος ζώνης είναι $(b_{i,max}) = 3$ ενώ η ελάχιστη $(b_{i,min}) = 1$. Σύμφωνα με τη σχέση (3.1) ο μέγιστος συντελεστής συμπίεσης θα είναι:

$$K_{max} = \frac{3}{1} = 3 \quad (3.2)$$

Η πιθανότητα να υπάρχει (i) δεσμευμένο εύρος ζώνης στο σύστημα, άρα και ο βαθμός εξυπηρέτησης (GoS) μέσω της πιθανότητας αποκλεισμού ενός τέτοιου συστήματος, θα εκφράζεται από την αναδρομική φόρμουλα των Kaufman – Roberts, σχέση (2.10) που αναλύσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπό την προϋπόθεση όμως ότι οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης του συστήματος από τις κλήσεις που υπόκεινται συμπίεση είναι στο ελάχιστο.

Έτσι στο παράδειγμά μας το σύστημα το οποίο δέχεται κι εξυπηρετεί ένα μίγμα κλήσεων όπου κάποιες από αυτές επιδέχονται συμπίεση και κάποιες όχι, τότε η πληρότητα κατανομής του σε μια δεδομένη χρονική στιγμή θα εκφράζεται με την παρακάτω σχέση, εκφρασμένη όμως ως άθροισμα της πληρότητας των δύο ομάδων κατηγοριών κλήσεων [4]:

$$q(j) = \frac{1}{j} \{ \sum_{k=1}^K \alpha_k b_k q(j - b_k) + \sum_{i=1}^L \alpha_i b_{i,min} q(j - b_{i,min}) \} \quad (3.3)$$

Επιπλέον η πιθανότητα αποκλεισμού (P_{b_k}) μιας κλήσης της πρώτης ομάδας από το σύστημα θα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{b_k} = \sum_{c=b_k+1}^C q(j) \quad (3.4)$$

ομοίως και η πιθανότητα αποκλεισμού (P_{b_i}) μιας κλήσης της δεύτερης ομάδας, από τη σχέση:

$$P_{b_i} = \sum_{c=b_{i,min}+1}^C q(j) \quad (3.5)$$

Όπως παρατηρούμε στις παραπάνω εξισώσεις (3.4) και (3.5) αυτό που χαρακτηρίζει το σύστημά μας είναι η παράμετρος $(b_{i,min})$ η οποία είναι το ελάχιστο εύρος ζώνης που απαιτείται από το σύστημα από μία κλήση της ομάδας κατηγοριών με την ιδιότητα της συμπίεσης.

Έτσι μια τέτοιου είδους προσέγγιση είναι απαραίτητη για να καθορίσει τις πιθανότητες αποκλεισμού στο σύστημα με συμπίεση δεδομένου ότι οι καταστάσεις αποκλεισμού θα εμφανιστούν σε συνθήκες μέγιστης συμπίεσης. Επομένως, η μέγιστη συμπίεση των κλήσεων καθορίζει το βαθμό εξυπηρέτησης (GoS) του συστήματος όπου δεν είναι δυνατή η περαιτέρω μείωση των απαιτήσεων των κλήσεων του συστήματος.

Για να προσδιορισθεί όμως η δυνατότητα της συμπίεσης του συστήματος είναι απαραίτητο να αξιολογηθεί ο αριθμός και το είδος των κλήσεων που εξυπηρετούνται σε μια δεδομένη κατάσταση του συστήματος. Για το σκοπό αυτό μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση (2.11) όπου είναι δυνατόν να προσδιορισθεί ο μέσος αριθμός των κλήσεων (n) οι οποίες εξυπηρετούνται σε μια κατάσταση (j) του συστήματος και είναι δεσμευμένη όλη η χωρητικότητά του [4]:

$$y_n(j) = \begin{cases} \frac{\alpha_n q(j-b_n)}{q(j)} & \text{για } n \in \mathbb{M}_{nk} \\ \frac{\alpha_n q(j-b_{n,min})}{q(j)} & \text{για } n \in \mathbb{M}_k \end{cases} \quad (3.6)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση (3.6) και γνωρίζοντας τις απαιτήσεις των ανεξάρτητων κλήσεων, δηλαδή των κλήσεων που επιδέχονται συμπίεση και αυτών που δεν επιδέχονται, μπορούμε να καθορίσουμε το συνολικό μέγιστο μέσον όρο της διεκπεραιωμένης κίνησης του συστήματος όταν αυτό βρίσκεται στην κατάσταση (j), υπό την προϋπόθεση όμως της μέγιστης συμπίεσης:

$$Y_{max}(j) = Y^{nk}(j) + Y_{max}^k(j) = \sum_{k=1}^K y_k(j) b_k + \sum_{i=1}^L y_i(j) b_{i,min} \quad (3.7)$$

όπου, $Y^{nk}(j)$ είναι ο μέσος όρος του εύρους ζώνης του συστήματος στην κατάσταση (j) που καταλαμβάνεται από τις κλήσεις της ομάδας χωρίς συμπίεση, ενώ $Y_{max}^k(j)$ είναι ο μέσος όρος του εύρους ζώνης που καταλαμβάνεται από τις κλήσεις της ομάδας με συμπίεση.

Υποθέσουμε ότι, η τιμή της παραμέτρου $Y^{nk}(j)$ που αναφέρεται στην διεκπεραιωμένη κίνηση των κλήσεων χωρίς συμπίεση, είναι ανεξάρτητη από την συμπίεση που επιδέχονται οι κλήσεις της άλλης ομάδας. Τότε οι πραγματικές τιμές της μεταφερόμενης κίνησης στο σύστημά μας, που αντιστοιχούν στην δεδομένη κατάσταση (j), η οποία κατάσταση όπως αναφέραμε καθορίζεται στη μέγιστη συμπίεση, θα εξαρτηθεί από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του συστήματος.

Στην πραγματικότητα όμως το σύστημά μας λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή χρήση της χωρητικότητάς του. Έτσι μία κλήση της ομάδας με την ιδιότητα της συμπίεσης, πάντα θα τείνει να καταλάβει το μέγιστο απαιτούμενο εύρος ζώνης από το σύστημα που χρειάζεται, χωρίς να ασκείται η μέγιστη συμπίεση σ' αυτή ή ακόμη και καθόλου. Επομένως η πραγματική τιμή $Y(j)$ του μέσου όρου της διεκπεραιωμένης κίνησης του συστήματος η οποία αντιστοιχεί στην κατάσταση (j) , θα εκφράζεται με την παρακάτω σχέση [4]:

$$Y(j) = Y^{nk}(j) + Y^k(j) = \sum_{k=1}^K y_k(j) b_k + \sum_{i=1}^L y_i(j) b_i(j) \quad (3.8)$$

Όπως βλέπουμε στην παραπάνω σχέση η παράμετρος $b_i(j)$ καθορίζει την πραγματική τιμή, δηλαδή την τιμή που πραγματικά παίρνει η απαίτηση εύρους ζώνης μίας κλήσης της ομάδας (i) με συμπίεση, όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση (j) . Η πραγματική τιμή της $b_i(j)$ θα κυμαίνεται τότε μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης συμπίεσης που μπορεί να υποστεί:

$$b_{i,min} < b_i(j) \leq b_{i,max} \quad (3.9)$$

Το μέτρο του βαθμού συμπίεσης σε μία κλήση της κατηγορίας που υπόκειται συμπίεση, είναι ο συντελεστής συμπίεσης $\xi_i(j)$ ο οποίος μπορεί να εκφρασθεί με τον ακόλουθο τρόπο:

$$b_i(j) = b_{i,min} \xi_i(j) \quad (3.10)$$

Από την παραπάνω σχέση (3.10) και σύμφωνα με τα προηγούμενα που αναφέραμε, συμπεραίνουμε ότι η πραγματική τιμή $b_i(j)$ των απαιτήσεων μιας κλήσης με συμπίεση στη δεδομένη κατάσταση του συστήματος (j) , είναι το γινόμενο της ελάχιστης απαίτησης της κλήσης σε εύρος ζώνης του συστήματος επί το συντελεστή συμπίεσης $\xi_i(j)$. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την σχέση (3.10) μπορούμε να υπολογίσουμε το μέσον όρο του δεσμευμένου εύρους ζώνης του συστήματος το οποίο καταλαμβάνεται από τις κλήσεις με την ιδιότητα της συμπίεσης, από την παρακάτω σχέση:

$$Y^l(j) = \sum_{i=1}^L y_i(j) b_i(j) = \xi_i(j) \sum_{i=1}^L y_i(j) b_{i,min} \quad (3.11)$$

Υποθέτουμε ότι το σύστημά μας λειτουργεί με τέτοιο τρόπο που να εγγυάται τη μέγιστη χρήση της συνολικής του χωρητικότητας κι αυτό σημαίνει ότι οι κλήσεις οι οποίες υφίστανται συμπίεση θα έχουν πάντα την τάση να καταλαμβάνουν περισσότερο διαθέσιμο εύρος ζώνης από τη συνολική χωρητικότητα του συστήματος, μειώνοντας όμως τις απαιτήσεις τους κατά τον ελάχιστο δυνατό τρόπο. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι οι κλήσεις που εισέρχονται στο σύστημα δεσμεύουν το απαιτούμενο εύρος ζώνης, εφ'

όσον είναι διαθέσιμο, αλλά όταν απαιτηθεί θα συμπιέσουν τις απαιτήσεις τους στη δέσμευση των πόρων στο ελάχιστο δυνατόν.

Από την άλλη πλευρά όμως στο υπό μελέτη σύστημά μας, εκτός από τον υπολογισμό της πιθανότητας του αποκλεισμού μιας κλήσης θα πρέπει να υπολογίσουμε και τον μέσο όρο του δεσμευμένου εύρους ζώνης του συστήματος που καταλαμβάνεται από τις κλήσεις της ομάδας με τη δυνατότητα της συμπίεσης. Για να προσδιορίσουμε τον αριθμό αυτό θα πρέπει απαραίτητα να γνωρίζουμε το συντελεστή συμπίεσης $\xi_i(j)$. Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως ο λόγος του διαθέσιμου εύρους ζώνης του συστήματος που καταλαμβάνεται για την εξυπηρέτηση των κλήσεων με συμπίεση, προς τον αριθμό των πόρων που καταλαμβάνονται από τις κλήσεις αυτές στην κατάσταση όμως της μέγιστης συμπίεσης και είναι ίδιος για όλες τις κατηγορίες των κλήσεων που επιδέχονται συμπίεση.

Μαθηματικά ο συντελεστή συμπίεσης $\xi_i(j)$ μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση [4]:

$$\xi_i(j) = \frac{C - \gamma^{nk}(j)}{\gamma_{max}^k(j)} = \frac{C - \gamma^{nk}(j)}{j - \gamma^{nk}(j)} \quad (3.12)$$

Στην παραπάνω σχέση ο αριθμητής εκφράζει το συνολικό εύρος ζώνης του συστήματος που μπορεί να διατεθεί στις κλήσεις με συμπίεση, ενώ ο παρανομαστής εκφράζει το εύρος ζώνης του συστήματος που μπορεί να καταληφθεί από τις κλήσεις με συμπίεση αλλά υπό την προϋπόθεση ότι το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση (j) .

Για να γίνει κατανοητό καλύτερα αυτό θα αναφερθούμε πάλι σε ένα αριθμητικό παράδειγμα όπου θα υπολογίσουμε το συντελεστή συμπίεσης $\xi_i(j)$. Έστω ότι διαθέτουμε πάλι το σύστημα απωλειών κλήσεων EMLM με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν παραπάνω. Αν η χωρητικότητα του συστήματος είναι $C = 100$ μονάδες εύρους ζώνης από τις οποίες οι 40 είναι ο μέσος όρος του δεσμευμένου εύρους ζώνης από τις κλήσεις χωρίς συμπίεση ενώ οι 60 είναι ο μέσος όρος του δεσμευμένου εύρους ζώνης από τις κλήσεις με συμπίεση και το σύστημα βρίσκεται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή στην κατάσταση (j) όπου υπάρχουν 50 μονάδες εύρους ζώνης κατειλημμένες, τότε ο συντελεστής συμπίεσης $\xi_i(j)$ σύμφωνα με τη σχέση (3.12) θα είναι:

$$\xi_i(j) = \frac{100-40}{50-40} = \frac{60}{10} = 6 \quad (3.13)$$

Ο μόνος περιορισμός της τιμής του συντελεστή συμπίεσης $\xi_i(j)$ είναι ο συντελεστής μέγιστης συμπίεσης (K_{max}) που προσδιορίζεται από τη σχέση (3.1). Έτσι αν ο συντελεστής συμπίεσης $\xi_i(j)$ είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή μέγιστης συμπίεσης (K_{max}), τότε οι κλήσεις θα συμπεστούν σύμφωνα με το συντελεστή (K_{max}) ενώ αν είναι μικρότερος θα συμπεστούν σύμφωνα με το συντελεστή $\xi_i(j)$.

Μαθηματικά θα ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\xi_i(j) = \begin{cases} K_{max} & \text{για } \xi_i(j) \geq K_{max} \\ \xi_i(j) & \text{για } 1 \leq \xi_i(j) < K_{max} \end{cases} \quad (3.14)$$

Όπως διαπιστώνουμε ο συντελεστής συμπίεσης $\xi_i(j)$ που προσδιορίζεται από την παραπάνω σχέση, δεν εξαρτάται από την κατηγορία κλήσεων. Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει από την υπόθεση που κάναμε για το σύστημά μας αρχικά όπου υποθέσαμε ότι όλες οι κατηγορίες των κλήσεων θα υπόκεινται τον ίδιο βαθμό συμπίεσης για τις κλήσεις που υποβάλλονται σε συμπίεση. Έτσι γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή συμπίεσης $\xi_i(j)$ σε κάθε κατάσταση (j) που βρίσκεται το σύστημα, μπορούμε να καθορίσουμε τον μέσον όρο του εύρους ζώνης του συστήματος που καταλαμβάνεται από όλες τις κλήσεις της ομάδας (i) με συμπίεση. Ο μέσος όρος (Y_i^i) προκύπτει από την παρακάτω σχέση [4]:

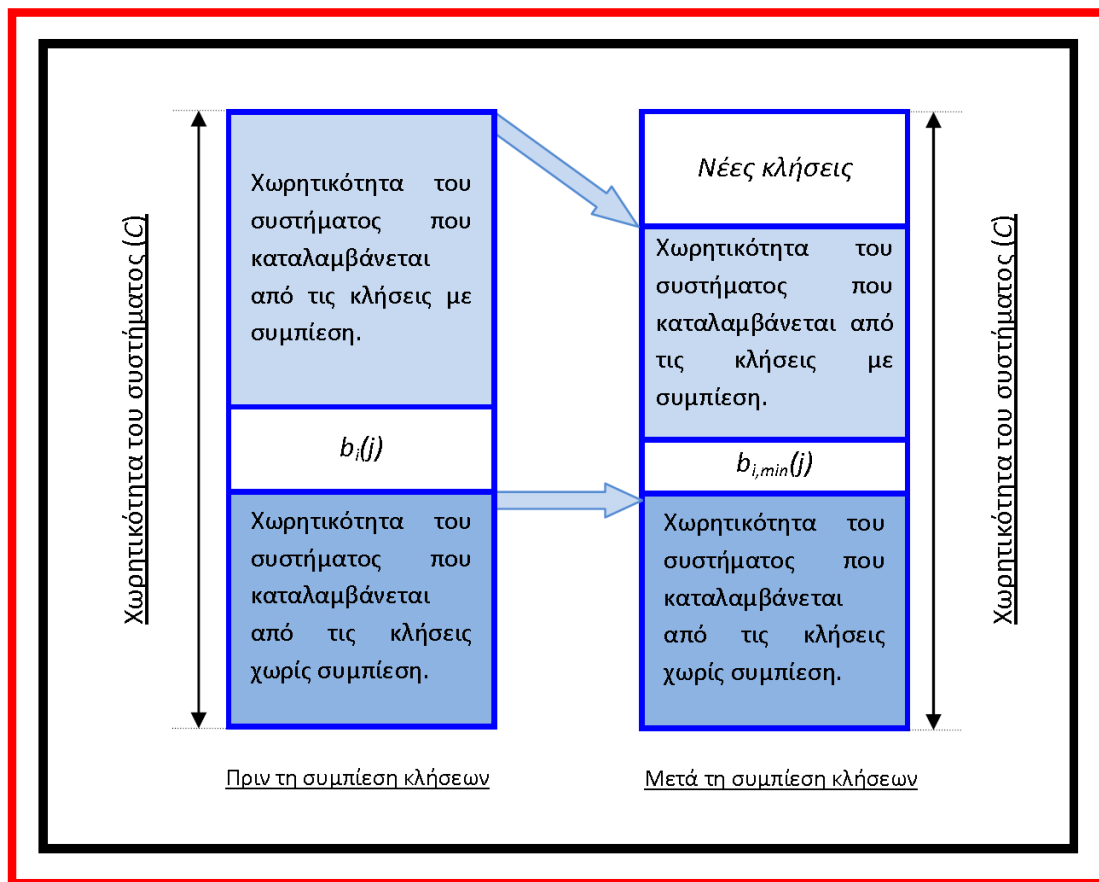
$$Y_i^i = \sum_{j=0}^C y_i(j) [\xi_i(j) b_{i,min}] q(j) \quad (3.15)$$

Με βάση τον παραπάνω μέσον όρο του εύρους ζώνης του συστήματος που καταλαμβάνεται από τις κλήσεις μιας κατηγορίας i_1 μπορούμε να καθορίσουμε τον μέσον όρο του εύρους ζώνης που καταλαμβάνονται από τις κλήσεις όλων των κατηγοριών κίνησης με συμπίεση. Ο μέσος όρος αυτός δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Y^i = \sum_{i=0}^L Y_i^i \quad (3.16)$$

Ας σημειωθεί ότι ο παραπάνω όρος Y^i είναι ο μέσος όρος της μεταφερόμενης κίνησης στο σύστημα από τις κλήσεις που υπόκεινται συμπίεση.

Σχηματικά μπορούμε να παραστήσουμε το σύστημά μας που έχουμε αναλύσει παραπάνω το οποίο δέχεται το μίγμα των δύο κατηγοριών κλήσεων (με συμπίεση και χωρίς) με το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 3.1 Υποδειγματικό Σύστημα με Συμπίεση

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την αρχική κατάσταση του συστήματος με τη χωρητικότητά του να είναι κατειλημμένη από τις κλήσεις των δύο ομάδων, χωρίς όμως να έχει εφαρμοστεί η συμπίεση στις κλήσεις. Μετά τη συμπίεση όμως βλέπουμε να αποδεσμεύεται εύρος ζώνης από τη χωρητικότητα του συστήματος με αποτέλεσμα το σύστημα να εξοικονομεί επιπλέον χωρητικότητα ώστε να δεχθεί περισσότερες κλήσεις προς διεκπεραίωση. Οι κλήσεις που δεν επιδέχονται συμπίεση έμειναν ανεπηρέαστες και στις δύο καταστάσεις, χωρίς να μεταβληθούν οι απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης του συστήματος.

3.2. Εφαρμογή του Συστήματος Απωλειών με Πολιτική Πλήρους Διάθεσης και Συμπίεση των Κλήσεων

3.2.1. Γενικά

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύσαμε ένα σύστημα απωλειών με πολιτική πλήρους διάθεσης όπου δέχεται δύο ομάδες κατηγοριών κλήσεων, εκείνη όπου οι κλήσεις έχουν την ιδιότητα της συμπίεσης και εκείνη που δεν έχει την ιδιότητα αυτή, εξοικονομώντας έτσι χωρητικότητα για εξυπηρέτηση περισσότερων κλήσεων.

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε την εφαρμογή του μοντέλου αυτού στα ασύρματα δίκτυα τηλεπικοινωνιών 3^{ης} γενιάς UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). Πριν όμως αναφερθούμε στα συστήματα αυτά και στην αρχιτεκτονική τους, θα δούμε πολύ γενικά τι είναι τα συστήματα αυτά και ποια τα χαρακτηριστικά τους.

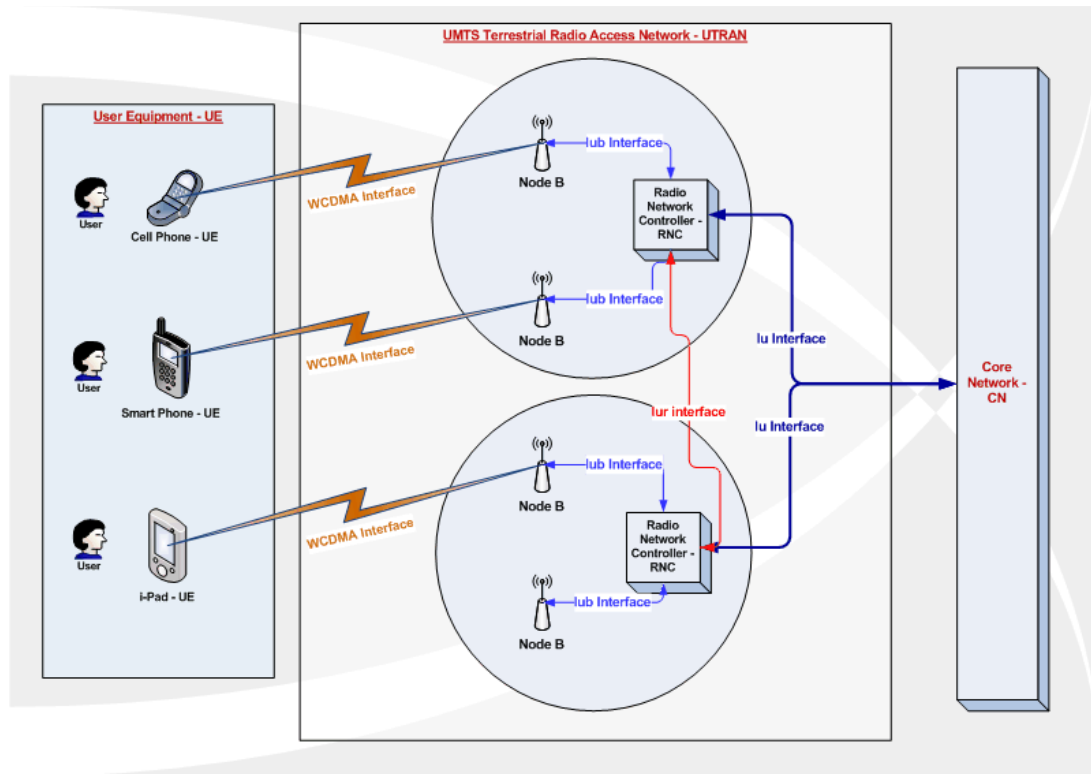
Το 1990 στην Ευρώπη ο Ευρωπαϊκός Τηλεπικοινωνιακός Οργανισμός Πρωτοτύπων (European Telecommunication Standards Institute-ETSI) δημιούργησε μία ομάδα συστημάτων κινητών επικοινωνιών 3^{ης} γενιάς (3G). Τα συστήματα ονομάστηκαν συστήματα UMTS όπου τα χαρακτηριστικά τους αποτελούν τις βασικές απαιτήσεις των συστημάτων 3^{ης} γενιάς και ενδεικτικά αναφέρουμε τα ελάχιστα μόνο για εξυπηρέτηση των ακαδημαϊκών σκοπών της παρούσας εργασίας.

Τα συστήματα αυτά παρέχουν ενοποιημένες υπηρεσίες σε ένα χρήστη με ένα τερματικό και έναν αριθμό συνδρομητή, να υποστηρίζουν μια ισχυρή αλλά και λειτουργική ραδιοεπαφή (Interface) η οποία θα παρέχει ευκολία στον τρόπο μεταφοράς αλλά και πολυπλεξία σε διάφορες υπηρεσίες (π.χ. φωνή, δεδομένα, εικόνα). Η ραδιοεπαφή θα πρέπει να υποστηρίζει αποδοτικά την τεχνική της μετάδοσης των πακέτων λόγω της μεγάλης απαίτησης για μεταφορά δεδομένων με υψηλή ποιότητα. Να είναι συμβατά με τα συστήματα 2^{ης} γενιάς με όσο το δυνατόν λιγότερες απαιτήσεις προς αυτά και να παρέχουν σε κινητούς χρήστες υπηρεσίες τόσο σε εσωτερικό περιβάλλον γραφείου ή οικίας όσο και σε εξωτερικό περιβάλλον. Τέλος οι παραπάνω υπηρεσίες θα πρέπει να υποστηρίζονται όσο το δυνατόν σε μεγαλύτερη γεωγραφική και παγκόσμια κλίμακα περιοχή.

Η επικρατέστερη ραδιοεπαφή στα συστήματα UMTS είναι η Wideband Code Division Multiple Access – WCDMA όπου και θα αναφερθούμε παρακάτω.

3.2.2. Αρχιτεκτονική των δικτύων UMTS

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία των δικτύων UMTS θα εξετάσουμε την αρχιτεκτονική τους μέσω της δομής που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.



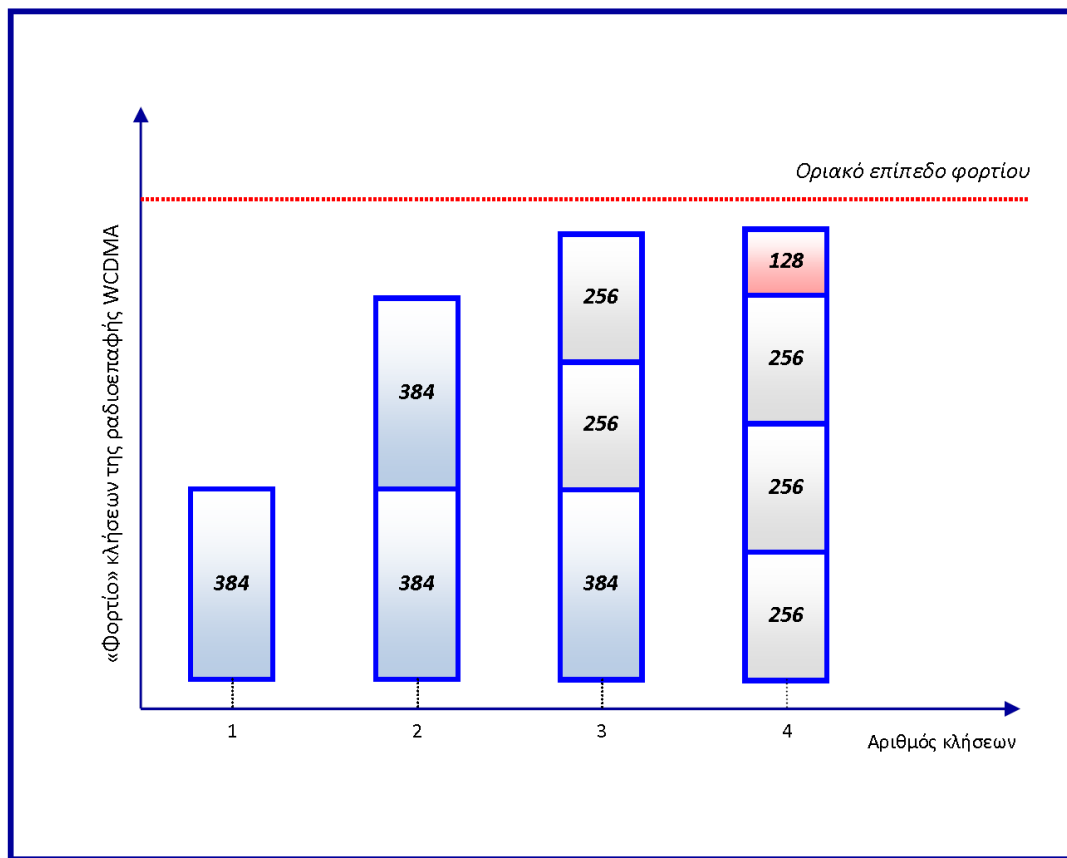
Σχήμα 3.2 Δομή του δικτύου UMTS

Η δομή των δικτύων UMTS περιλαμβάνει τρία κύρια μέρη τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω των ραδιοεπαφών WCDMA και Iu. Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα 3.2 τα κύρια αυτά μέρη είναι: Ο εξοπλισμός των χρηστών (user equipment) με τις κινητές συσκευές, το UTRAN όπου περιλαμβάνει τους κόμβους (node B) και τα RNC (Radio Network Controllers) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω της ραδιοεπαφής Iub και τέλος το δίκτυο κορμού (core network). Επίσης τα RNC συνδέονται μεταξύ τους μέσω της Iur ραδιοεπαφής. Το κάθε RNC είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο του φορτίου τηλεπικοινωνιακής κίνησης αλλά και για την επίλυση προβλημάτων υπερφόρτωσης στις κυψέλες που ελέγχει. Επιπλέον το RNC είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση του αλγορίθμου ελέγχου αποδοχής σύνδεσης (admission control) και της απόδοσης νέων κωδίκων σε νέες ραδιοζεύξεις στις κυψέλες που ελέγχει.

Για κάθε UE που είναι συνδεδεμένο με το CN (Core Network) υπάρχει ένα RNC που το εξυπηρετεί μέσω της WCDMA ραδιοεπαφής. Τόσο τα δεδομένα όσο και η σηματοδότηση μεταξύ των RNC μεταφέρονται μέσω της Iur ραδιοεπαφής. Τα Node B αναλαμβάνουν όλη την επεξεργασία στο φυσικό στρώμα της ραδιοεπαφής. Επιπλέον τα Node B εκτελούν μερικές πολύ βασικές λειτουργίες διαχείρισης των ραδιοπόρων του συστήματος.

3.2.3. Χρονοπρογραμματισμός Πακέτων (Packet Scheduling)

Ο χρονοπρογραμματισμός των πακέτων (packet scheduling) που μεταφέρονται στα δίκτυα UMTS μέσω της ραδιοεπαφής WCDMA είναι ένας πολύ σημαντικός μηχανισμός που θα αναλύσουμε παρακάτω. Πριν από όλα όμως παραθέτουμε το σχήμα 3.3 όπου απεικονίζει τον χρονοπρογραμματιστή πακέτων που εισέρχονται σε ένα σύστημα με συγκεκριμένη χωρητικότητα, με πολιτική πλήρους διάθεσης της χωρητικότητάς του και με την ιδιότητα της συμπίεσης των κλήσεων. Στο σημείο αυτό θα δεχθούμε ότι όλες οι κλήσεις που θα φτάνουν στο σύστημα έχουν απαίτηση σε εύρος ζώνης 384Kbps και με την ιδιότητα της συμπίεσης.



Σχήμα 3.3 Παράδειγμα λειτουργίας του χρονοπρογραμματιστή πακέτων

Όταν το σύστημα δέχεται την πρώτη κλήση, γίνεται αποδεκτή από το σύστημα και εξυπηρετείται χωρίς να μειώσει τις απαιτήσεις της σε εύρος ζώνης. Το ίδιο συμβαίνει κι όταν φτάσει και η δεύτερη κλήση στο σύστημα. Στη συνέχεια όταν στο σύστημα φθάσει η τρίτη κλήση τότε επειδή δεν μπορεί να εισέλθει σ' αυτό λόγω ανεπαρκούς χωρητικότητας, εφαρμόζεται ο μηχανισμός της συμπίεσης των κλήσεων, έτσι ώστε η κλήση να γίνει αποδεκτή. Όπως διαπιστώνουμε από το παραπάνω σχήμα, στην κατάσταση αυτή που γίνεται αποδεκτή και η τρίτη κλήση, μειώνονται οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης μόνο της δεύτερης και της τρίτης κλήσεις στα 256Kbps ενώ οι απαιτήσεις της πρώτης κλήσης παραμένουν στα 384Kbps. Φθάνοντας και η τέταρτη κλήση στο σύστημα αρχικά δεν γίνεται αποδεκτή λόγω των απαιτήσεών της σε εύρος ζώνης (384Kbps) με αποτέλεσμα να ενεργοποιείται πάλι ο μηχανισμός της συμπίεσης κι όπως διαπιστώνουμε τώρα ότι όλες οι κλήσεις εκτός της τέταρτης συμπιέζονται το ίδιο μειώνοντας τις απαιτήσεις τους στα 256Kbps ενώ η τέταρτη στα 128Kbps.

3.2.4. Ο Αλγόριθμος της συμπίεσης των κλήσεων

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τον αλγόριθμο της συμπίεσης που περιγράψαμε στις παραπάνω ενότητες. Βάση των σχέσεων που αναλύσαμε στις ενότητες 1, 2 και 3 μπορούμε να περιγράψουμε τον αλγόριθμο υπολογισμού της πιθανότητας αποκλεισμού των κλήσεων στην κατεύθυνση της «κάτω ζεύξης» (downlink) της κυψέλης στα δίκτυα UMTS μέσω της διεπαφής WCDMA.

Ο αλγόριθμος που θα αναλύσουμε παρακάτω θα υποθέσουμε ότι εφαρμόζεται στο παράδειγμα του συστήματος με πολιτική πλήρους διάθεσης που περιγράψαμε στην ενότητα (3.1.1) με τα ίδια χαρακτηριστικά.

Τα βήματα του αλγόριθμου είναι:

- i. Υπολογισμός του προσφερόμενου φορτίου κίνησης (α) στο σύστημα βάση της σχέσης (1.9).
- ii. Καθορισμός των απαιτήσεων (σε ακέραιο αριθμό) μονάδων εύρους ζώνης του συστήματος των κλήσεων της κάθε ομάδας (με συμπίεση και χωρίς συμπίεση) αλλά και της κάθε κατηγορίας. Όμως βάση του παραδείγματος που αναφέραμε θεωρούμε ότι ο αριθμός των απαιτήσεων της κάθε κατηγορίας κλήσης είναι ακέραιος αριθμός και δεν απαιτείται κάποιος επιπλέον υπολογισμός.
- iii. Υπολογισμός της πληρότητας κατανομής του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή σύμφωνα με την εξίσωση (3.3)
- iv. Προσδιορισμός της πιθανότητας αποκλεισμού μιας κλήσης της κάθε ομάδας που δέχεται το σύστημα, σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.4) και (3.5) για τις κλήσεις της ομάδας χωρίς συμπίεση και για τις κλήσεις της ομάδας με συμπίεση, αντίστοιχα.
- v. Προσδιορισμός, σύμφωνα με την εξίσωση (3.6) του μέσου αριθμού των κλήσεων που εξυπηρετούνται από το σύστημα σε μια δεδομένη κατάσταση (j) του συστήματος, στην οποία είναι δεσμευμένη όλη η χωρητικότητα του.
- vi. Υπολογισμός του συντελεστή συμπίεσης (ξ_i) σύμφωνα με την εξίσωση (3.12).
- vii. Τέλος υπολογισμός του μέσου όρου (Y_i^i) εύρους ζώνης του συστήματος που καταλαμβάνεται από όλες τις κλήσεις της ομάδας με συμπίεση, βάση της σχέσης (3.15).

3.2.5. Αριθμητικό Παράδειγμα

Σύμφωνα με τον παραπάνω αλγόριθμο ας εξετάσουμε τώρα ένα αριθμητικό παράδειγμα.

Θεωρούμε πάλι το σύστημα που αναφέραμε στην ενότητα (3.1.1) όπου έχει πολιτική πλήρους διάθεσης της χωρητικότητάς του και ότι δέχεται ένα μίγμα δύο διαφορετικών ομάδων κλήσεων με πολυδιάστατη κίνηση η κάθε ομάδα και με χαρακτηριστικά της συμπίεσης και της μη συμπίεσης αντίστοιχα. Η συνολική χωρητικότητα (C) του συστήματος είναι ίση με εκατό μονάδες εύρους ζώνης ($C = 100$) και πλήρως διαθέσιμη σε όλες τις κλήσεις που θα εισέλθουν σ' αυτό.

Ας θεωρήσουμε ότι η πρώτη ομάδα έχει δύο κατηγορίες κλήσεων ($K = 2$) όπου η πρώτη κατηγορία απαιτεί μία μονάδα εύρους ζώνης ($b_{k_1} = 1$) και η δεύτερη τρεις μονάδες εύρους ζώνης ($b_{k_2} = 3$). Οι κλήσεις της ομάδας αυτής δεν επιδέχονται συμπίεση και διατηρούν τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης σταθερό.

Επίσης για τη δεύτερη ομάδα θεωρούμε ότι έχει τρεις κατηγορίες κλήσεων ($L = 3$) από τις οποίες η πρώτη κατηγορία απαιτεί ένα ελάχιστο εύρος ζώνης δύο μονάδων ($b_{i_1,min} = 2$) και ένα μέγιστο εύρος ζώνης τεσσάρων μονάδων ($b_{i_1,max} = 4$). Αντίστοιχα η δεύτερη κατηγορία απαιτεί ένα ελάχιστο εύρος ζώνης τριών μονάδων ($b_{i_2,min} = 3$) και ένα μέγιστο εύρος ζώνης έξι μονάδων ($b_{i_2,max} = 6$). Τέλος η τρίτη κατηγορία κλήσεων απαιτεί ένα ελάχιστο εύρος ζώνης έξι μονάδων ($b_{i_3,min} = 6$) και ένα μέγιστο εύρος ζώνης δώδεκα μονάδων ($b_{i_3,max} = 12$). Οι κλήσεις της ομάδας αυτής δέχονται τη συμπίεση και μπορούν και αλλάζουν τις απαιτήσεις τους σε εύρος ζώνης όταν απαιτηθεί από το σύστημα.

Συνοψίζοντας έχουμε:

- Ομάδα 1^η
 - 1^η κατηγορία κλήσεων: $b_{k_1} = 1$
 - 2^η κατηγορία κλήσεων: $b_{k_2} = 3$
- Ομάδα 2^η
 - 1^η κατηγορία κλήσεων με ελάχιστο και μέγιστο εύρος ζώνης απαιτήσεων: $b_{i_1,min} = 2$ και $b_{i_1,max} = 4$.
 - 2^η κατηγορία κλήσεων με ελάχιστο και μέγιστο εύρος ζώνης απαιτήσεων: $b_{i_2,min} = 3$ και $b_{i_2,max} = 6$.

- 3^η κατηγορία κλήσεων με ελάχιστο και μέγιστο εύρος ζώνης απαιτήσεων:
 $b_{i_3,min} = 6$ και $b_{i_3,max} = 12$.

Σύμφωνα με την εξίσωση (3.1) μπορούμε να υπολογίσουμε το μέγιστο συντελεστή συμπίεσης (K_{max}). Έτσι έχουμε:

$$K_{max} = \frac{b_{i,max}}{b_{i,min}} = \frac{4}{2} = \frac{6}{3} = \frac{12}{6} = 2 \quad (3.17)$$

Ακόμη θεωρούμε ότι η αναλογία των προσφερόμενων φορτίων της κάθε κατηγορίας κλήσεων στη δεύτερη ομάδα με συμπίεση, είναι:

$$\alpha_{i_1} t_{i_1} : \alpha_{i_2} t_{i_2} : \alpha_{i_3} t_{i_3} = 15 : 5 : 40 \quad (3.18)$$

Αναλύοντας την παραπάνω σχέση μπορούμε να πούμε ότι η αναλογία μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης κατηγορίας κλήσεων είναι 3:1 και μεταξύ της δεύτερης και τρίτης κατηγορίας των κλήσεων είναι 1:8. Αυτό σημαίνει ότι οι εισερχόμενες κλήσεις στο σύστημα της πρώτης κατηγορίας τρεις έναντι ενός της δεύτερης κατηγορίας και μία κλήση της δεύτερης κατηγορίας έναντι οκτώ της τρίτης.

Βάση των παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι το μεγαλύτερο φορτίο κίνησης στο σύστημα προέρχεται από την τρίτη κατηγορία των κλήσεων που θεωρούμε ότι είναι διακίνηση δεδομένων κι ακολουθεί η πρώτη κατηγορία των κλήσεων σε προσφερόμενο φορτίο κίνησης που είναι ομιλία. Τέλος η μικρότερη επιβάρυνση στο σύστημα σε φορτίο κίνησης κλήσεων προέρχεται από τη δεύτερη κατηγορία κλήσεων που θεωρούμε ότι είναι video.

Κεφάλαιο 4ο

4. Παράδειγμα – Εφαρμογή του Μοντέλου

4.1. Γενικά

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε μία μελέτη περίπτωσης ενός συστήματος με τα χαρακτηριστικά που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα. Έτσι θεωρούμε ένα σύστημα που εξυπηρετεί τέσσερις κατηγορίες κίνησης με χωρητικότητας $C=50$ μονάδων εύρους ζώνης. Η άφιξη των κλήσεων ακολουθεί μια διαδικασία Poisson. Οι κλήσεις των δύο πρώτων κατηγοριών κίνησης δεν έχουν την δυνατότητα συμπίεσης του εύρους ζώνης τους. Αντίθετα οι κλήσεις των δύο επόμενων κατηγοριών κίνησης έχουν την δυνατότητα να μειώσουν το εύρος ζώνης τους προκειμένου να ελευθερωθεί εύρος ζώνης προς όφελος νέων κλήσεων. Θεωρούμε ότι το εύρος ζώνης των κλήσεων μετράται σε μονάδες εύρους ζώνης (bandwidth units, b.u.). Τα χαρακτηριστικά κίνησης των τεσσάρων κατηγοριών κίνησης είναι τα εξής:

α) 1^η κατηγορία κίνησης: $\alpha_1 = 1 \text{ erl}$, $b_1 = 1 \text{ b.u.}$

β) 2^η κατηγορία κίνησης: $\alpha_2 = 1 \text{ erl}$, $b_2 = 2 \text{ b.u.}$

γ) 3^η κατηγορία κίνησης: $\alpha_3 = 1 \text{ erl}$, $b_{3,\min} = 4 \text{ b.u.}$, $b_{3,\max} = 7 \text{ b.u.}$

δ) 4^η κατηγορία κίνησης: $\alpha_4 = 1 \text{ erl}$, $b_{4,\min} = 8 \text{ b.u.}$, $b_{4,\max} = 12 \text{ b.u.}$

Ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων της 3ης και 4ης κατηγορίας κίνησης βασίζεται στην ελάχιστη απαίτηση εύρους ζώνης, $b_{3,\min} = 4 \text{ b.u.}$, $b_{4,\min} = 8 \text{ b.u.}$, αντίστοιχα.

Στους επόμενους τέσσερις πίνακες παρουσιάζονται οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων των τεσσάρων κατηγοριών κίνησης για αυξανόμενο φορτίο κίνησης της 1ης και 2ης κατηγορίας κίνησης. Στην τρίτη στήλη κάθε πίνακα δίνονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το μοντέλο EMLM (Kaufman-Roberts Formula). Τονίζεται ότι στο μοντέλο EMLM, οι κλήσεις της 3ης και 4ης κατηγορίας κίνησης δεν μπορούν να μειώσουν το εύρος ζώνης τους οπότε εισέρχονται στο σύστημα με την μέγιστη απαίτηση σε εύρος ζώνης, $b_{3,\max} = 7 \text{ b.u.}$, $b_{4,\max} = 12 \text{ b.u.}$, αντίστοιχα.

Πίνακας 1: Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 1^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης:

$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$	Pb ₁ Μοντέλο εργασίας [4]	Pb ₁ EMLM [2], [3]
(1.0, 1.0, 1.0, 1.0)	0.000375	0.00493
(1.2, 1.1, 1.0, 1.0)	0.000402	0.00491
(1.4, 1.2, 1.0, 1.0)	0.000434	0.00499
(1.6, 1.3, 1.0, 1.0)	0.000470	0.00515
(1.8, 1.4, 1.0, 1.0)	0.000511	0.00535
(2.0, 1.5, 1.0, 1.0)	0.000556	0.00558
(2.2, 1.6, 1.0, 1.0)	0.000606	0.00582
(2.4, 1.7, 1.0, 1.0)	0.000661	0.00607
(2.6, 1.8, 1.0, 1.0)	0.000721	0.00633
(2.8, 1.9, 1.0, 1.0)	0.000786	0.00659
(3.0, 2.0, 1.0, 1.0)	0.000856	0.00685
(3.2, 2.1, 1.0, 1.0)	0.000933	0.00713
(3.4, 2.2, 1.0, 1.0)	0.001015	0.00741
(3.6, 2.3, 1.0, 1.0)	0.001103	0.00769
(3.8, 2.4, 1.0, 1.0)	0.001198	0.00799
(4.0, 2.5, 1.0, 1.0)	0.001301	0.00830

Πίνακας 2: Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 2^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης:

$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$	Pb ₂ Μοντέλο εργασίας [4]	Pb ₂ EMLM [2], [3]
(1.0, 1.0, 1.0, 1.0)	0.00078	0.00923
(1.2, 1.1, 1.0, 1.0)	0.00085	0.00962
(1.4, 1.2, 1.0, 1.0)	0.00093	0.01008
(1.6, 1.3, 1.0, 1.0)	0.00102	0.01059
(1.8, 1.4, 1.0, 1.0)	0.00112	0.01112
(2.0, 1.5, 1.0, 1.0)	0.00122	0.01165
(2.2, 1.6, 1.0, 1.0)	0.00133	0.01218
(2.4, 1.7, 1.0, 1.0)	0.00146	0.01272
(2.6, 1.8, 1.0, 1.0)	0.00159	0.01325
(2.8, 1.9, 1.0, 1.0)	0.00173	0.01378
(3.0, 2.0, 1.0, 1.0)	0.00189	0.01433
(3.2, 2.1, 1.0, 1.0)	0.00205	0.01488
(3.4, 2.2, 1.0, 1.0)	0.00223	0.01546

$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$	Pb ₂ Μοντέλο εργασίας [4]	Pb ₂ EMLM [2], [3]
(3.6, 2.3, 1.0, 1.0)	0.00242	0.01605
(3.8, 2.4, 1.0, 1.0)	0.00263	0.01666
(4.0, 2.5, 1.0, 1.0)	0.00285	0.01730

Πίνακας 3: Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 3^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης

$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$	Pb ₃ Μοντέλο εργασίας [4]	Pb ₃ EMLM [2], [3]
(1.0, 1.0, 1.0, 1.0)	0.00190	0.04270
(1.2, 1.1, 1.0, 1.0)	0.00209	0.04423
(1.4, 1.2, 1.0, 1.0)	0.00229	0.04586
(1.6, 1.3, 1.0, 1.0)	0.00251	0.04759
(1.8, 1.4, 1.0, 1.0)	0.00275	0.04941
(2.0, 1.5, 1.0, 1.0)	0.00301	0.05134
(2.2, 1.6, 1.0, 1.0)	0.00328	0.05335
(2.4, 1.7, 1.0, 1.0)	0.00358	0.05544
(2.6, 1.8, 1.0, 1.0)	0.00389	0.05762
(2.8, 1.9, 1.0, 1.0)	0.00424	0.05986
(3.0, 2.0, 1.0, 1.0)	0.00461	0.06218
(3.2, 2.1, 1.0, 1.0)	0.00500	0.06456
(3.4, 2.2, 1.0, 1.0)	0.00543	0.06701
(3.6, 2.3, 1.0, 1.0)	0.00588	0.06953
(3.8, 2.4, 1.0, 1.0)	0.00637	0.07210
(4.0, 2.5, 1.0, 1.0)	0.00690	0.07474

Πίνακας 4: Πιθανότητα απώλειας κλήσεων 4^{ης} κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης

$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$	Pb ₄ Μοντέλο εργασίας [4]	Pb ₄ EMLM [2], [3]
(1.0, 1.0, 1.0, 1.0)	0.00602	0.09293
(1.2, 1.1, 1.0, 1.0)	0.00659	0.09662
(1.4, 1.2, 1.0, 1.0)	0.00719	0.10029
(1.6, 1.3, 1.0, 1.0)	0.00784	0.10399
(1.8, 1.4, 1.0, 1.0)	0.00854	0.10776
(2.0, 1.5, 1.0, 1.0)	0.00929	0.11161
(2.2, 1.6, 1.0, 1.0)	0.01009	0.11556

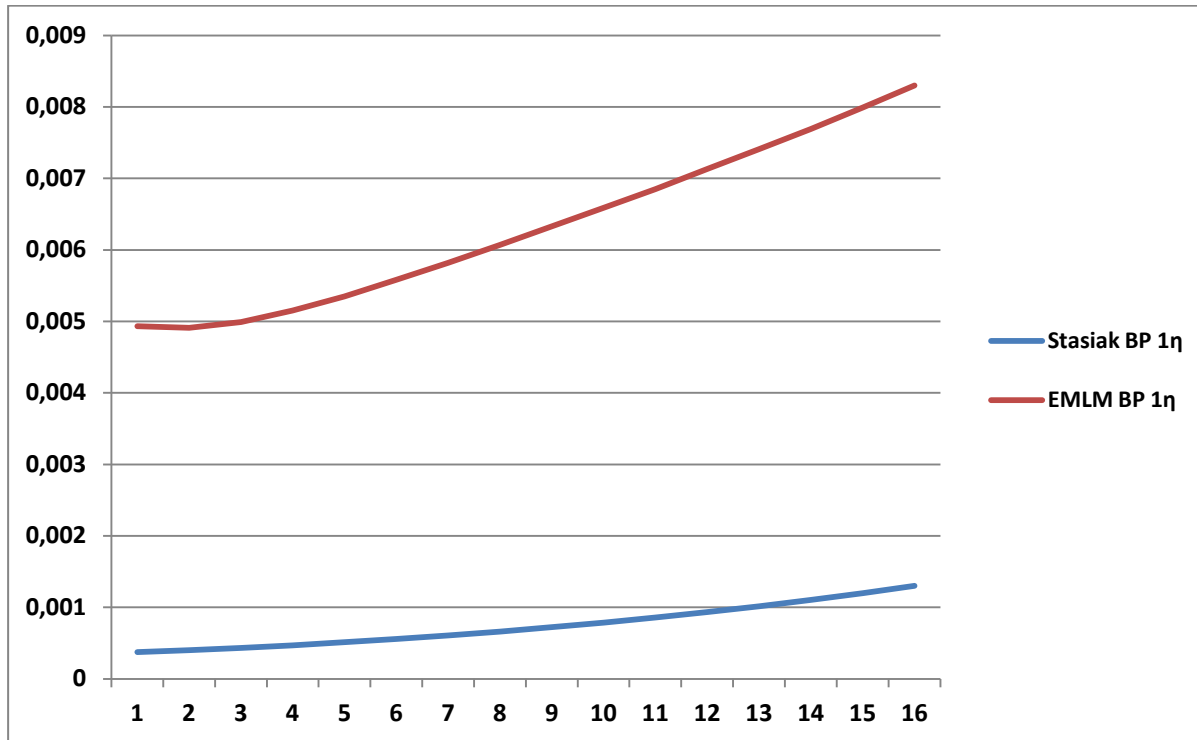
$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$	Pb ₄ Μοντέλο εργασίας [4]	Pb ₄ EMLM [2], [3]
(2.4, 1.7, 1.0, 1.0)	0.01094	0.11961
(2.6, 1.8, 1.0, 1.0)	0.01186	0.12377
(2.8, 1.9, 1.0, 1.0)	0.01285	0.12804
(3.0, 2.0, 1.0, 1.0)	0.01390	0.13240
(3.2, 2.1, 1.0, 1.0)	0.01503	0.13686
(3.4, 2.2, 1.0, 1.0)	0.01623	0.14143
(3.6, 2.3, 1.0, 1.0)	0.01751	0.14609
(3.8, 2.4, 1.0, 1.0)	0.01888	0.15085
(4.0, 2.5, 1.0, 1.0)	0.02034	0.15572

Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες 1, 2, 3 και 4 οι μετρήσεις που έχουμε λάβει στη δεύτερη στήλη του κάθε πίνακα είναι τα αποτελέσματα από το υπό εξέταση μοντέλο (Stasiak Model) με δυνατότητα της συμπίεσης των κλήσεων της 3^{ης} και 4^{ης} κατηγορίας, ενώ στην τρίτη στήλη του κάθε πίνακα είναι τα αποτελέσματα από το μοντέλο EMLM χωρίς συμπίεση. Η διαφορά στην πιθανότητα απώλειας των κλήσεων όπως διαπιστώνουμε σε κάθε κατάσταση της κάθε κατηγορία είναι πολύ μεγάλη μεταξύ των δύο μοντέλων.

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα για κάθε κατηγορία κίνησης χωριστά σε σύγκριση των δύο μοντέλων. Στον άξονα χ τα σημεία 1 ως 16 αντιστοιχούν στα φορτία κίνησης της 1^{ης} στήλης των πινάκων 1, 2, 3, 4. Έτσι, το σημείο 1 αντιστοιχεί στα φορτία (1.0, 1.0, 1.0, 1.0) και το σημείο 16 στα φορτία (4.0, 2.5, 1.0, 1.0). Όπως φαίνεται από το πρώτο διάγραμμα 4.1 η πιθανότητα απωλειών κλήσεων για την πρώτη κατηγορία (Blocking Probability), στο μοντέλο Stasiak είναι κατά πάρα πολύ μικρότερη σε σύγκριση με το μοντέλο EMLM λόγω της δυνατότητας της συμπίεσης της 3^{ης} και 4^{ης} κατηγορίας.

Παρ' όλο που η κλήσεις της πρώτης κατηγορίας διατηρούν την απαίτησή τους σε εύρος ζώνης από το σύστημα $b_1 = 1$ b.u. θα περιμέναμε να μην υπάρχει διαφορά στη μέτρηση των απωλειών κλήσεων σ' αυτήν την κατηγορία. Θυμίζουμε όμως ότι οι πιθανότητες απωλειών κλήσεων λαμβάνονται σύμφωνα με την εξίσωση (2.10) (φόρμουλα Kaufman – Roberts) όπου στην πρώτη μέτρηση οι απαιτήσεις σε εύρος ζώνης των κατηγοριών 3 και 4 είναι οι ελάχιστες ($b_{3,\min} = 4$ b.u., $b_{4,\min} = 8$ b.u.) ενώ στη δεύτερη μέτρηση οι απαιτήσεις αυτές γίνονται μέγιστες ($b_{3,\max} = 7$ b.u., $b_{4,\max} = 12$ b.u.).

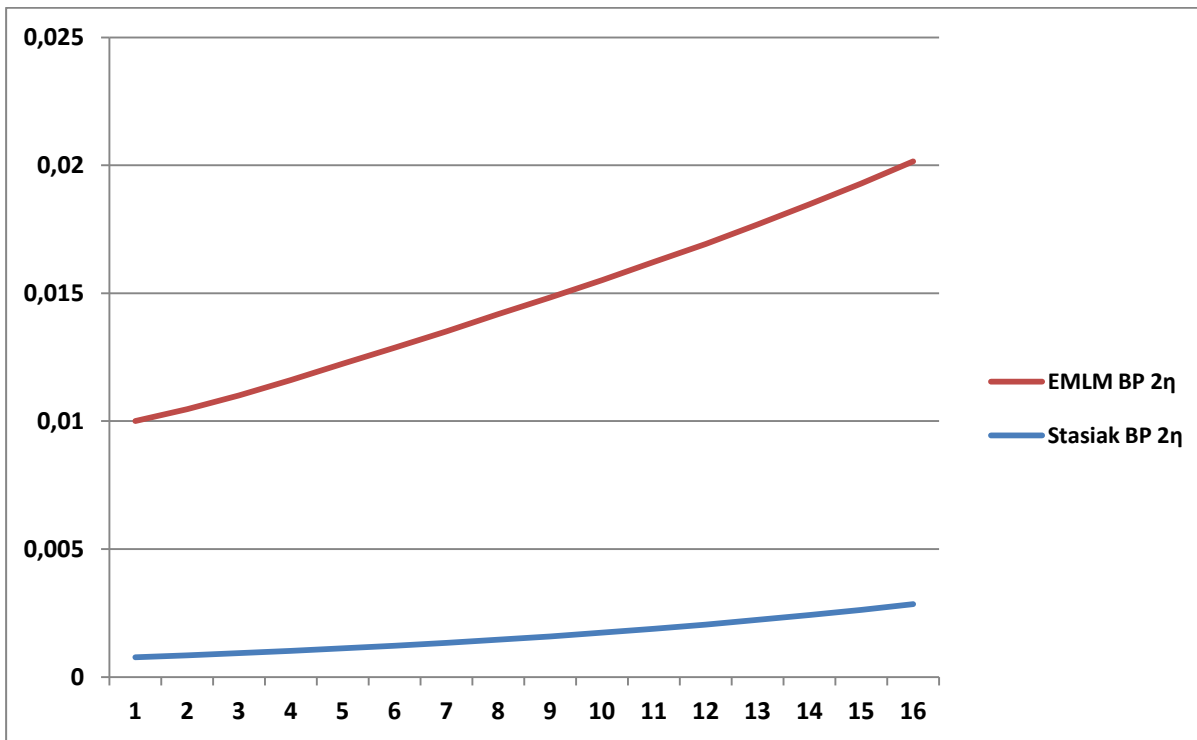
Η διαφορά αυτή μεγαλώνει αισθητά παραπάνω ειδικότερα μετά την κατάσταση (1.4, 1.2, 1.0, 1.0) όπου υπεισέρχονται οι απαιτήσεις των κλήσεων της 3^{ης} και 4^{ης} κατηγορίας.



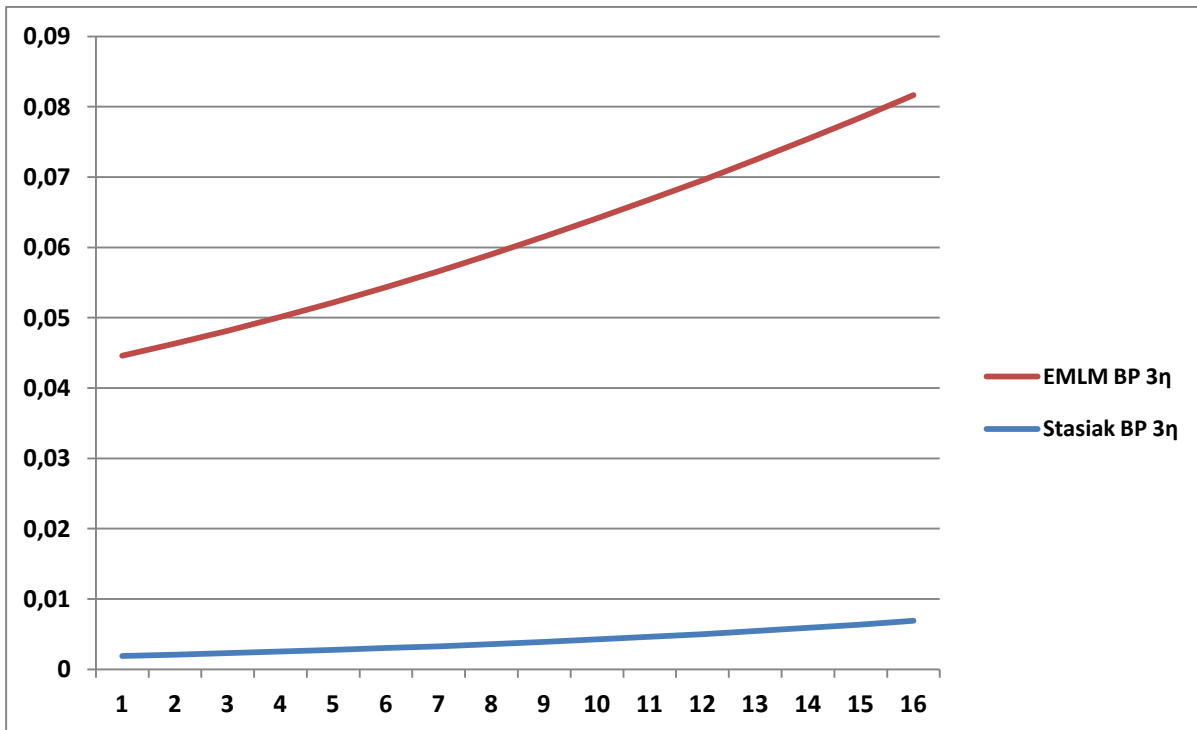
Διάγραμμα 4.1 – Πιθανότητα απωλειών κλήσεων (PB) 1ης κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM).

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και για το δεύτερο διάγραμμα 4.2 όπου απεικονίζεται η διαφορά των πιθανοτήτων απωλειών των κλήσεων μεταξύ των δύο μοντέλων. Όπως διαπιστώνουμε και σ' αυτό το διάγραμμα η διαφορά αυτή γίνεται αισθητή στην ίδια κατάσταση (1.4, 1.2, 1.0, 1.0).

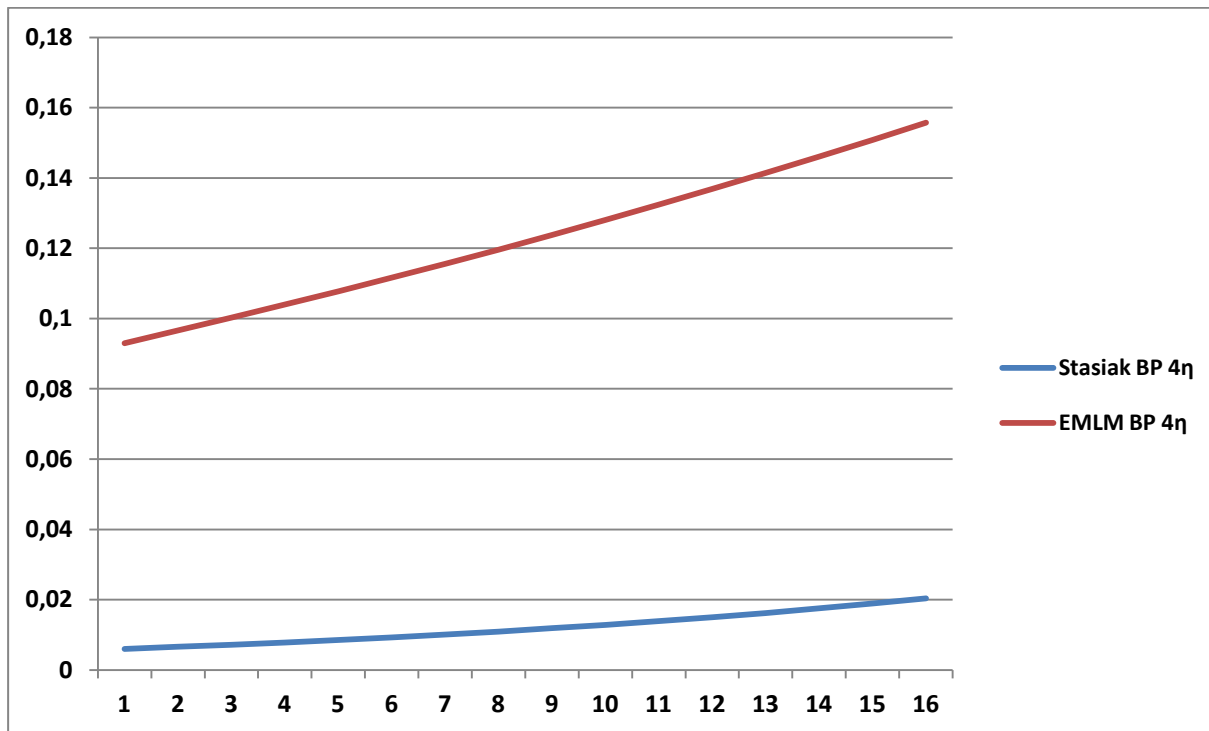
Συνδυάζοντας το Βαθμό Εξυπηρέτησης ενός συστήματος (GoS) που αναλύσαμε στο πρώτο κεφάλαιο, μπορούμε να πούμε ότι το GoS στο πρώτο μοντέλο μετρήσεων (Stasiak) είναι πάρα πολύ μικρό έναντι του δεύτερου μοντέλου (EMLM) στο οποίο είναι πολύ μεγάλο. Αναλύοντας τον όρο αυτό συμπεραίνουμε ότι ένα σύστημα με μικρό GoS έχει πολύ μικρή πιθανότητα απωλειών κλήσεων ενώ αντίστροφα με μεγάλο GoS έχει πολύ μεγάλες απώλειες. Κατά συνέπεια η απόδοση ενός συστήματος αυξάνει όσο μικραίνει ο Βαθμός Εξυπηρέτησής του άρα είναι πιο αποδοτικό, ενώ αντίστροφα μικραίνει όσο ο βαθμός αυτός μεγαλώνει.



Διάγραμμα 4.2 – Πιθανότητα απωλειών κλήσεων (PB) της 2ης της δεύτερης κατηγορίας συναρτήσε του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM).



Διάγραμμα 4.3 – Πιθανότητα απωλειών κλήσεων της τρίτης κατηγορίας συναρτήσε του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM)



Διάγραμμα 4.4 – Πιθανότητα απωλειών κλήσεων της τέταρτης κατηγορίας συναρτήσει του φορτίου κίνησης μεταξύ των δύο μοντέλων (Μοντέλο συμπίεσης και EMLM).

Επίσης αναλύοντας τα επόμενα δύο διαγράμματα 4.3 και 4.4 συμπεραίνουμε ότι η διαφορά της πιθανότητας των απωλειών των κλήσεων μεταξύ των δύο μοντέλων αυξάνεται υπερβολικά σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα, ειδικότερα στην 4^η κατηγορία κλήσεων όπου η διαφορά των απαιτήσεων μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης, σε εύρος ζώνης είναι μεγάλη.

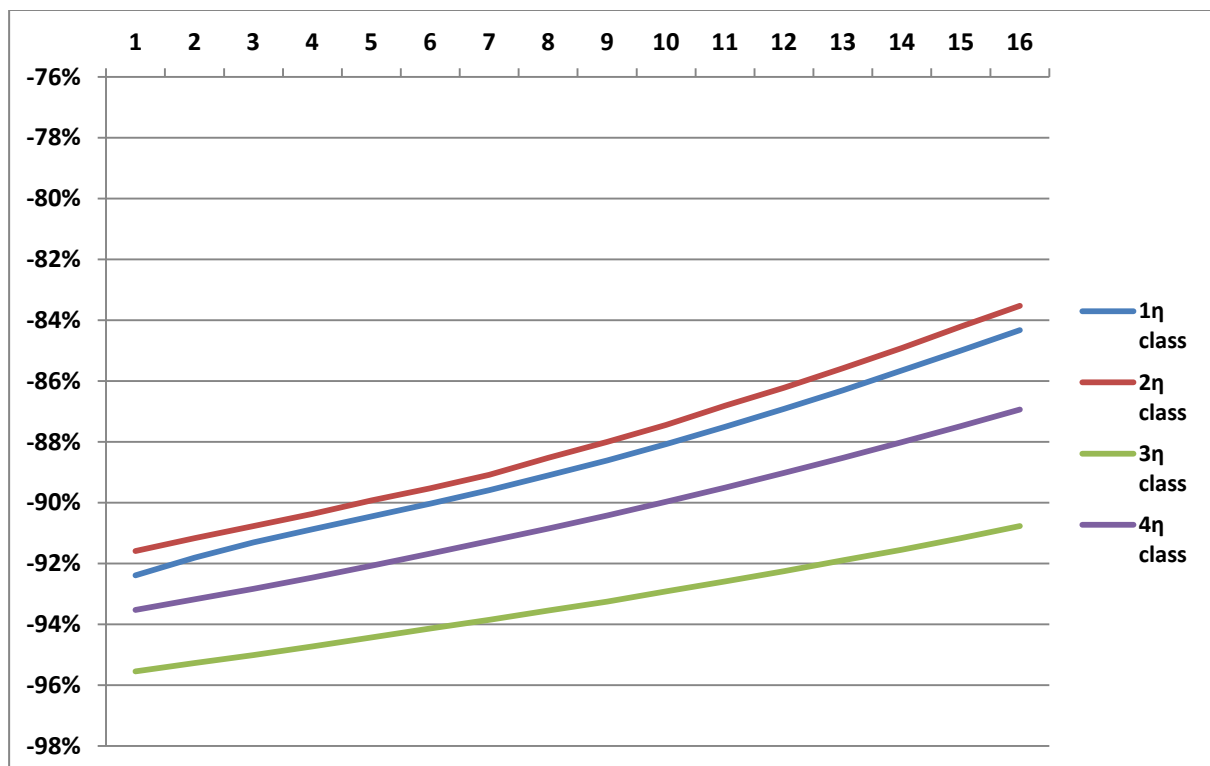
Στον παρακάτω πίνακα 5 βλέπουμε την μεγάλη αύξηση της διαφοράς των απωλειών κλήσεων μεταξύ της 1^{ης} έως και της 4^{ης} κατηγορίας, συγκριτικά των δύο μοντέλων.

Πίνακας 5 – Ποσοστιαία πιθανότητα απωλειών κλήσεων μεταξύ των δύο μοντέλων

Φορτίο Κίνησης	Διαφορά Stasiak - EMLM Models			
	1η	2η	3η	4η
1.0 1.0 1.0 1.0	0,46%	0,85%	4,08%	8,69%
1.2 1.1 1.0 1.0	0,45%	0,88%	4,21%	9,00%
1.4 1.2 1.0 1.0	0,46%	0,92%	4,36%	9,31%
1.6 1.3 1.0 1.0	0,47%	0,96%	4,51%	9,62%

Φορτίο Κίνησης	Διαφορά Stasiak - EMLM Models			
	1η	2η	3η	4η
1.8 1.4 1.0 1.0	0,48%	1,00%	4,67%	9,92%
2.0 1.5 1.0 1.0	0,50%	1,04%	4,83%	10,23%
2.2 1.6 1.0 1.0	0,52%	1,09%	5,01%	10,55%
2.4 1.7 1.0 1.0	0,54%	1,13%	5,19%	10,87%
2.6 1.8 1.0 1.0	0,56%	1,17%	5,37%	11,19%
2.8 1.9 1.0 1.0	0,58%	1,21%	5,56%	11,52%
3.0 2.0 1.0 1.0	0,60%	1,24%	5,76%	11,85%
3.2 2.1 1.0 1.0	0,62%	1,28%	5,96%	12,18%
3.4 2.1 1.0 1.0	0,64%	1,32%	6,16%	12,52%
3.6 2.3 1.0 1.0	0,66%	1,36%	6,37%	12,86%
3.8 2.4 1.0 1.0	0,68%	1,40%	6,57%	13,20%
4.0 2.5 1.0 1.1	0,70%	1,45%	6,78%	13,54%

Η γραφική απεικόνιση των ποσοστών του ανωτέρω πίνακα δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα 4.5:



Διάγραμμα 4.5 – Πιθανότητα απωλειών κλήσεων όλων των κατηγοριών μεταξύ μοντέλου Stasiak και EMLM.

Κεφάλαιο 5ο

5. Συμπεράσματα – Μελλοντικές Εργασίες

5.1. Γενικά

Τα συμπεράσματα στα οποία μπορούμε να καταλήξουμε βάση των παραπάνω μετρήσεων που αναλύθηκαν μεταξύ των δύο βασικών μοντέλων απωλειών κλήσεων είναι τα εξής:

- 1) Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα απωλειών κλήσεων το οποίο δέχεται πολλές κατηγορίες κλήσεων με διαφορετικές απαιτήσεις η κάθε μία από αυτές, μπορούμε να μετρήσουμε την πιθανότητα απωλειών κλήσεων σε κάθε κατηγορία με τη χρήση του μοντέλου απωλειών με συμπίεση (Stasiak Model).
- 2) Η δυνατότητα της συμπίεσης που έχουν κάποιες από τις κατηγορίες των κλήσεων αυτών και σε συνδυασμό με τη χρήση της φόρμουλα των Kaufman – Roberts, όπως διαπιστώνουμε μειώνει κατά πάρα πολύ σε μεγάλο βαθμό τις πιθανότητες των απωλειών των κλήσεων που θα εισέλθουν προς εξυπηρέτηση από αυτό.
- 3) Ένα σύστημα όπου μπορεί και συμπιέζει τις εισερχόμενες κλήσεις του βάσει του αλγόριθμου συμπίεσης, μειώνει το Βαθμό Εξυπηρέτησής του (GoS) και αυξάνει την αποδοτικότητά του, χωρίς να απαιτείται επιπρόσθετο κόστος βελτίωσης των τεχνικών του χαρακτηριστικών (π.χ. αναβάθμιση του εξοπλισμού του).
- 4) Το μοντέλο EMLM όπου δεν μπορεί να εφαρμοστεί η συμπίεση των κλήσεων, υστερεί κατά πάρα πολύ έναντι του μοντέλου Stasiak.

5.2. Μελλοντικές Εργασίες

Το αντικείμενο της συμπίεσης που αναλύσαμε στην εργασία αυτή είναι όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της εισαγωγής ένα σχετικά νέο αντικείμενο όπου χρήζει περαιτέρω διερεύνηση.

Στα πλαίσια όμως της ανάπτυξης της Διπλωματικής Εργασίας όπου αναλύθηκε ένα μόνο αλλά πολύ βασικό μέρος αυτού που είναι η εφαρμογή του αλγόριθμου της συμπίεσης σε συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G) με βελτίωση της αποδοτικότητάς τους, θα μπορούσε μελλοντικά να συνδυαστεί με κάποια από τις εναλλακτικές μεθόδους απόδοσης των συστημάτων αυτών, όπως για παράδειγμα τα *συστήματα υπερροής*, τα *συστήματα ελαστικής κίνησης* κλπ.

Αυτό ίσως αποτελέσει το σημαντικό ερέθισμα για αντικείμενο έρευνας μελλοντικά σε κάποια άλλη εργασία δεδομένου του γεγονότος ότι λόγω της αυξανόμενης ζήτησης των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης των χρηστών των δικτύων 3^{ης} γενιάς, αλλά και της διαρκούς αναζήτησης εξοικονόμησης πόρων με ταυτόχρονη μείωση του κόστους εξοπλισμού και συντήρησης των εταιρειών.

5.3. Επίλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύσαμε και συγκρίναμε δύο πολύ βασικά μοντέλα απωλειών κλήσεων των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων 3^{ης} γενιάς, όπου δέχονται πολλές κατηγορίες κλήσεων με διαφορετικές απαιτήσεις η κάθε μία από αυτές.

Αρχικά στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρθηκαν οι βασικές αρχές της Θεωρίας της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης και τα διαδεδομένα μοντέλα για μονοδιάστατη τηλεπικοινωνιακή κίνηση.

Στη συνέχεια στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε ανάλυση του μοντέλου πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης (EMLM) και η ανάλυση της αναδρομικής φόρμουλας των Kaufman – Roberts.

Στο τρίτο κεφάλαιο έγινε η ανάλυση και ανάπτυξη των μοντέλων απωλειών κλήσεων με πολιτική πλήρους διαθεσιμότητας (Complete Sharing Policy) σε συνδυασμό της δυνατότητας της συμπίεσης των εισερχομένων κλήσεων για εξοικονόμηση πόρων του τηλεπικοινωνιακού συστήματος. Επίσης εξετάσαμε και την εφαρμογή των συστημάτων αυτών σε συστήματα 3^{ης} γενιάς (3G) UMTS όπου αναλύσαμε και εφαρμόσαμε τον αλγόριθμο της συμπίεσης στα συστήματα αυτά.

Τέλος στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύσαμε ένα αριθμητικό παράδειγμα με χαρακτηριστικά συστήματος που αναλύθηκαν στο 3^ο κεφάλαιο και εφαρμόσαμε τα δύο μοντέλα απωλειών κλήσεων (με συμπίεση και χωρίς). Από τις μετρήσεις που πήραμε

αποδείχτηκε η μεγάλη διαφορά της μείωσης της πιθανότητας των απωλειών των κλήσεων στο υπό εξέταση μοντέλο (Stasiak Model) αυξάνοντας την απόδοση των συστημάτων αυτών.

Στο παράρτημα που ακολουθεί παρατίθεται ο κώδικας υλοποίησης των μετρήσεων.

Παράρτημα

Υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσεων σε συνάρτηση του φορτίου κίνησης και της συμπίεσης που υπόκεινται η 3^η και 4^η κατηγορία.

```
#include <iostream>
#include <iomanip>
#include <fstream>
#include <sstream>

#define CLEAN_STREAM(inOp) if (!(inOp)) { cin.clear(); cin.ignore(0x7FFF, '\n'); }

using namespace std;

long C;
long N;
long double* b;
long double* a;
long double G=1.0;

int ignoreBlank(istream&);
bool loadFData(const char*);
long double Formula(long);
long double FormulaEx(long, long);
int loadFile(char *f, long double *, long double *);

int main(int argc, char* argv[ ])
{
    int i, j, k;
    bool fileLoaded = false;

    b = new long double[1000];
    a = new long double[1000];

    cout << setprecision(15);

    char *fname;
```



```
cout<<"Give filename or enter \"manual\" for manually inserting values"<<endl;
CLEAN_STREAM(cin >> fname);
if(!strstr(fname, "manual"))
    loadFile(fname, a, b);
else
{
    cout << "Insert Capacity System C: ";
    CLEAN_STREAM(cin >> C);

    while (C <= 0)
    {
        cout << "Please try again: ";
        CLEAN_STREAM(cin >> C);
    }

    cout << "\nInsert Flow Classes N: ";
    CLEAN_STREAM(cin >> N);

    while (N <= 0)
    {
        cout << "Please try again: ";
        CLEAN_STREAM(cin >> N);
    }
    do
    {
        cout << "\nGive " << N << " Values for c[i]: ";
        for (i = 0; i < N; i++)
        {
            if (!(cin >> b[i]))
                break;
        }

        if (i < N)
        {
            cout << "\nPlease try again.";
            CLEAN_STREAM(false);
        }
    }
}
```

```

while (i < N);

do
{
    cout << "\nGive " << N << " Values for a[i]: ";
    for (i = 0; i < N; i++){
        if (!(cin >> a[i]))
            break;
    }

    if (i < N)
    {
        cout << "\nPlease try again.";
        CLEAN_STREAM(false);
    }
}
while (i < N);
}

cout<<"\n*****"<<endl;
cout<<"*****\n"<<endl;
cout<<"C: "<<C<<endl;
cout<<"N: "<<N<<endl;
cout<<"\n*****\n"<<endl;
cout<<"---> Control of Entry c[i]\n"<<endl;
for(int i=0; i<10;i++)
    cout<<"c["<<i+1<<"]="<<b[i]<<endl;
    cout<<"\n*****\n"<<endl;
cout<<"---> Control of Entry a[i]\n"<<endl;
for(int i=0; i<10;i++)
    cout<<"a["<<i+1<<"]="<<a[i]<<endl;
    cout<<"\n*****"<<endl;

cout<<"\n_____ "<<endl;
cout<<"Unnormalized Values p(n)"<<endl;
cout<<"_____ \n"<<endl;
for (i = 1; i <= C; i++)
{

```

```

    cout <<"p(" << i << ")\t= " << Formula(i) << '\n';
}

for (i = 1; i <= C; i++)
{
    G=G+Formula(i);
}
cout<<"\nThe Normalization Constant is G = " << G <<endl;

cout<<"\n_____ " <<endl;
cout<<"Normalized Values p(n)" <<endl;
cout<<"_____ \n" <<endl;
for (i = 1; i <= C; i++)
{
    cout <<"p(" << i << ")\t= " << Formula(i)/G << '\n';
}

cout<<"\n_____ " <<endl;
cout<<"Unnormalized Values q[i](n)" <<endl;
cout<<"_____ \n" <<endl;
for (k = 0; k < N; k++)
{
    for (j = 1; j <= C; j++)
    {
        cout << "q[" << k+1 << "]"[" << j << "]\t= " << FormulaEx(k, j) << '\n';
    }
}
cout<<"\n\n*****\n" <<endl;

long double pmeso=0.0;
long double pe=0.0;
for (int i=0; i<N; i++)
{
    pe+=a[i]/C;
}
long double qmesosglobal=0;
for (int i=0; i<N; i++)
{

```

```
long double pform=0;
long double ptemp=a[i]/C;
for(int l=C-b[i]+1;l<=C;l++)
    pform+=Formula(l);

pmeso+=(ptemp*pform)/(1-pe);
}

cout << "pbar:\t\t" << pmeso << endl;
cout<<"\n*****\n" << endl;

long double ff=1;
for (int i = 1; i <= C; i++)
{
    ff+=Formula(i);
}

for(int i=0; i<N; i++)
{
    long double qmesos;
    long double ptemp=a[i]/C;
    long double pform=0;
    for(int l=C-b[i]+1;l<=C;l++)
        pform+=Formula(l);

    long double seiraq=0;
    for (int ii=0; ii<N; ii++)
    {
        long double qtemp=a[ii]/C;
        long double qform=0;
        for(int l=C-b[ii]+1;l<=C;l++)
            qform+=FormulaEx(i,l);

        cout<<i+1<<"\t" <<ii+1<<"\t" <<"Qbarij:\t\t" <<qform<<endl;

        seiraq+=(qtemp*qform)/(1-pe);
    }
}
```

```
cout<<"\n*****\n" << endl;
    qmesos=ptemp*(pform+pmeso)/(1-pe) + seiraq;

    cout<<i+1<<"qbar:\t\t\t" << qmesos << endl;

    long double ffex=0;
    for (int j = 1; j <= C; j++)
    {
        ffex+= FormulaEx(i, j) ;
    }
    long double gama1=a[i]*(ff+pmeso)/(ffex+qmesos);

    cout<<i+1<<"throughput:\t\t" << gama1 << endl;

}
cout<<"\n*****\n" << endl;
cout<<"\n\n\n-----Press [Enter] to terminate...-----\n\n" << endl;
cout<<"_____Tziortzidis Panagiotis_____\n\n" << endl;

CLEAN_STREAM(false);
cin.get();
delete [] b;
delete [] a;

return 0;
}

long double FormulaEx(long k, long j)
{
    long double reciprocal_j = 1.0L/j;
    long double result = reciprocal_j*a[k]*Formula(j - b[k]);
    long i;

    if (j <= 0)
        result = 0.0L;
    else
    {
        for (i = 0; i < N; i++)
```

```
        result += reciprocal_j*a[i]*FormulaEx(k, j - b[i]);
    }

    return result;
}
```

```
long double Formula(long j)
{
    long double result = 0.0L;
    long double reciprocal_j = 1.0L/j;
    long k;

    if (j < 0)
        result = 0.0L;
    else if (j == 0)
        result = 1.0L;
    else
    {
        for (k = 0; k < N; k++)
            result += reciprocal_j*a[k]*Formula(j - b[k]);
    }

    return result;
}
```

```
bool loadFDData(const char* filepath)
{
    ifstream infile;
    char temp;
    bool bad = false;
    int i;

    infile.open(filepath);

    if (infile.is_open())
    {
        while (!bad)
        {
```

```
temp = ignoreBlank(infile);
if (temp == EOF)
    break;

switch (temp)
{
    case 'C':
        temp = ignoreBlank(infile);

        if (temp != '=' || !(infile >> C))
            bad = true;
        break;
    case 'N':
        temp = ignoreBlank(infile);

        if (temp != '=' || !(infile >> N))
            bad = true;
        break;
    case 'b':
        if (b != NULL)
        {
            delete [] b;
            b = NULL;
        }

        if (N <= 0)
        {
            cout << "N is uninitialised or has an invalid value\n";
            bad = true;
        }
        else
        {
            b = new long double[N];

            temp = ignoreBlank(infile);

            if (temp == '=')
            {
```

```
temp = ignoreBlank(infile);

if (temp == '{')
{
    for (i = 0; i < N; i++){
        if (!(infile >> b[i]))
        {
            bad = true;
            break;
        }
        temp = ignoreBlank(infile);

        if (temp != ',' && (i == N-1 && temp != '}'))
        {
            bad = true;
            break;
        }
    }
}
else
    bad = true;
}
else
    bad = true;
}
break;
case 'a':
    if (a != NULL)
    {
        delete [] a;
        a = NULL;
    }

    if (N <= 0)
    {
        printf("N is uninitialised or has an invalid value\n");
        bad = true;
    }
}
```



```
else
{
    a = new long double[N];

    temp = ignoreBlank(infile);

    if (temp == '=')
    {
        temp = ignoreBlank(infile);

        if (temp == '{')
        {
            for (i = 0; i < N; i++){
                if (!(infile >> a[i]))
                {
                    bad = true;
                    break;
                }
            }
            temp = ignoreBlank(infile);

            if (temp != ',' && (i == N-1 && temp != '}'))
            {
                bad = true;
                break;
            }
        }
    }
    else
        bad = true;
}
else
    bad = true;
}
break;
default:
    cout << "Unknown symbol \" << temp << "\", ignoring...\n";
}
}
```

```
    if (!bad)
        return true;
    else
    {
        cout << "Corrupted file! Ignoring...\n";
        return false;
    }
}

cout << "\n" << filepath << "\n" << "' doesn't exist or it's already locked by another program.\n";

return false;
}

int ignoreBlank(ifstream& infile)
{
    char temp;

    do
    {
        if (!infile.get(temp))
            return EOF;

    }while (temp == ' ' || temp == '\t' ||
           temp == '\v' || temp == '\r' ||
           temp == '\n');

    return temp;
}

int loadFile(char *f, long double *a, long double *b)
{
    ifstream ifile (f);
    string line;
    int cou=0;
    if (ifile.is_open())
    {
```

```
getline (ifile,line);
long double item;
std::stringstream os(line);

os>>item;
N=item;
os>>item;
C=item;

while (!ifile.eof())
{
    getline (ifile,line);
    std::stringstream os(line);

    cout<<"cou " <<cou<<endl;
    os>>item;
    a[cou]=item;
    os>>item;
    b[cou]=item;

    cou++;
}
}
else
    return -1;
ifile.close();
cout<<"Exiting normally"<<endl;
return 1;
}
```

Βιβλιογραφία

-
- [1] Μ. Δ. Λογοθέτης, «ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΚΙΝΗΣΕΩΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001, ISBN 960-7510-84-4.
- [2] J. S. Kaufman, “Blocking in a shared resource environment”, IEEE Trans. Commun. Vol. 29, No. 10, pp. 1474-1481, October 1981.
- [3] J. W. Roberts, “A service system with heterogeneous user requirements”, in: G. Pujolle (Ed.), Performance of Data Communications systems and their applications, North Holland, Amsterdam, pp.423-431, 1981.
- [4] M. Stasiak, P. Zwierzykowski and J. Wiewiora, “Analytical Modeling of the WCDMA Interface with Packet Scheduling”, Journal of Telecommunications and Information Technology, vol. 3, pp. 103-110, 2009.