



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων »

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ : ΔΗΜΟΣ ΚΑΡΡΑΣ

ΑΜ : 2115072

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ. Παναγιώτης Βαρζάκας

ΛΑΜΙΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019



*Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε
επίπεδο κλήσεων*



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Υπεύθυνη Δήλωση περί πνευματικών δικαιωμάτων και λογοκλοπής.....	6
Εισαγωγή.....	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....

1.1 Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες και της Τηλέπικοινωνιακής κίνησης.....	9
1.2 Εφαρμογές πάνω στη Θεωρία της Τηλεπικοινωνιακής κίνησης.....	9
1.3 Τεχνικές της Θεωρίας της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	10
1.4 Μοντελοποίηση Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων.....	11
1.4.1 Συστήματα απωλειών.....	11
1.4.2 Συστήματα αναμονής.....	11
1.5 Βαθμός εξυπηρέτησης (Grade of Service).....	11
1.6 Φορτίο κίνησης.....	13
1.6.1 Ιδιότητες φορτίου κίνησης.....	13
1.7 Στοχαστικές διαδικασίες.....	14
1.7.1 Διαδικασία Markov.....	15
1.7.2 Διαδικασία Poisson.....	16
1.7.3 Ιδιότητα PASTA.....	18
1.8 Μοντέλο απωλειών Erlang (Erlang Loss Model).....	19

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....

2.1 Εισαγωγή στις Κινητές Επικοινωνίες.....	21
2.2 Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Πρώτης Γενιάς (1G).....	21
2.3 Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Δεύτερης Γενιάς (2G).....	23
2.3.1 Δίκτυα 2.5G.....	26
2.3.2 Δίκτυα 2.75G.....	28
2.4 Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Τρίτης Γενιάς (3G).....	29
2.4.1 Δίκτυα 3.5G.....	31
2.5 Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς (4G).....	33
2.5.1 Διεπαφές πάνω στα συστήματα LTE.....	34
2.5.2 Εύρος ζώνης και τρόποι αμφίδρομης επικοινωνίας.....	36
2.5.3 Δίκτυα 4.5G.....	38
2.5.4 Υφιστάμενες Υπηρεσίες LTE.....	38



2.6	Μια ματιά στα Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Πέμπτης Γενιάς (5G).....	40
-----	---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....

3.1	Εισαγωγή στα Μοντέλα Απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης.....	43
3.2	Μοντέλο Erlang Multirate Loss Model (EMLM).....	44
3.2.1	Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο EMLM.....	47
3.3	Μοντέλο Απωλειών Engset (EnMLM).....	55
3.3.1	Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο EnMLM.....	58
3.3.2	Προσεγγιστική μέθοδος Stasiak & Glabowski.....	62
3.3.3	Παράδειγμα πάνω στη προσεγγιστική μέθοδο Stasiak & Glabowski.....	63
3.4	Μοντέλο Επανάκλησης (Retry Model).....	66
3.4.1	Παράδειγμα πάνω στο Μοντέλο απλής Επανάκλησης.....	68
3.4.2	Μοντέλο Πολλαπλής Επανάκλησης (Multi retry model, MRM).....	69
3.4.3	Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο πολλαπλής επανάκλησης.....	71
3.5	Μοντέλο απλού Κατωφλιού (Single Threshold Model, STM).....	73
3.5.1	Παράδειγμα πάνω στο μοντέλου απλού κατωφλιού.....	74
3.5.2	Μοντέλο Πολλαπλών Κατωφλιών (Multi Threshold Model, MTM).....	76
3.5.3	Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο πολλαπλών κατωφλιών.....	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....

4.1	Διασύνδεση X2 στο LTE πρότυπο.....	79
4.2	Κινητικότητα και μεταπομπή της διεπαφής X2.....	81
4.3	Εφαρμογή Μοντέλων Πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης στη διασύνδεση X2...84	
4.3.1	Εφαρμογή Μοντέλου Blogowski Klopfenstein & Renard (BKR).....	84
4.3.1.2	Υπολογισμοί για πολλούς Χρήστες μιας κατηγορίας κίνησης.....	89
4.3.1.3	Πολλές κατηγορίες κίνησης k.....	93
4.3.2	Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο BKR.....	97
4.3.3	Εφαρμογή Μοντέλου Widjaja & La Roche με πολιτική πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης.....	100
4.3.4	Παράδειγμα εύρεσης πιθανότητας συμφόρησης με χρήση του μοντέλου WLR.....	105
4.3.5	Σύγκριση μεθόδων BKR και WLR.....	107
4.3.6	Παράδειγμα χρήσης Μοντέλου WLR με φορτίο κίνησης του μοντέλου	



BKR.....	107
4.3.7 2ο Παράδειγμα πάνω στη σύγκριση των μοντέλων BKR & WLR.....	109
4.3.8 Μοντέλο WLR με πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης EMLM-BR.....	110
4.3.9 Παράδειγμα εύρεσης πιθανότητας απώλειας κλήσεων με πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης.....	112
4.3.10 Μοντέλο Απωλειών Ομαδικών Κλήσεων στη Διασύνδεση X2 (Batch Poisson- EMLM).....	114
4.3.11 Παράδειγμα εύρεσης πιθανότητας απώλειας κλήσεων στο BP-EMLM.....	116
4.3.12 Συμπεράσματα.....	118
..... Υλοποίηση μοντέλων σε κώδικα C	
Παράρτημα Α (Μοντέλα 3 ^ο Κεφαλαίου).....	122
Παράρτημα Β (Μοντέλα 4 ^ο Κεφαλαίου).....	132



Υπεύθυνη Δήλωση περί πνευματικών δικαιωμάτων και λογοκλοπής

Με ατομική μου ευθύνη και γνωρίζοντας τις κυρώσεις ⁽¹⁾, που προβλέπονται από της διατάξεις της παρ. 6 του άρθρου 22 του Ν. 1599/1986, δηλώνω ότι:

1. Δεν παραθέτω κομμάτια βιβλίων ή άρθρων ή εργασιών άλλων αυτολεξεί **χωρίς να τα περικλείω σε εισαγωγικά** και χωρίς να αναφέρω το συγγραφέα, τη χρονολογία, τη σελίδα. Η αυτολεξεί παράθεση χωρίς εισαγωγικά χωρίς αναφορά στην πηγή, είναι λογοκλοπή. Πέραν της αυτολεξεί παράθεσης, λογοκλοπή θεωρείται και η παράφραση εδαφίων από έργα άλλων, συμπεριλαμβανομένων και έργων συμφοιτητών μου, καθώς και η παράθεση στοιχείων που άλλοι συνέλεξαν ή επεξεργάστηκαν, χωρίς αναφορά στην πηγή. Αναφέρω πάντοτε με πληρότητα την πηγή κάτω από τον πίνακα ή σχέδιο, όπως στα παραθέματα.
2. Δέχομαι ότι η αυτολεξεί **παράθεση χωρίς εισαγωγικά**, ακόμα κι αν συνοδεύεται από αναφορά στην πηγή σε κάποιο άλλο σημείο του κειμένου ή στο τέλος του, είναι αντιγραφή. Η αναφορά στην πηγή στο τέλος π.χ. μιας παραγράφου ή μιας σελίδας, δεν δικαιολογεί συρραφή εδαφίων έργου άλλου συγγραφέα, έστω και παραφρασμένων, και παρουσίασή τους ως δική μου εργασία.
3. Δέχομαι ότι υπάρχει επίσης περιορισμός στο μέγεθος και στη συχνότητα των παραθεμάτων που μπορώ να εντάξω στην εργασία μου εντός εισαγωγικών. Κάθε μεγάλο παράθεμα (π.χ. σε πίνακα ή πλαίσιο, κλπ), προϋποθέτει ειδικές ρυθμίσεις, και όταν δημοσιεύεται προϋποθέτει την άδεια του συγγραφέα ή του εκδότη. Το ίδιο και οι πίνακες και τα σχέδια
4. Δέχομαι όλες τις συνέπειες σε περίπτωση λογοκλοπής ή αντιγραφής.

Ημερομηνία: ..09./10./2019..

Ο – Η Δηλ.

(Υπογραφή)

(1) «Όποιος εν γνώσει του δηλώνει ψευδή γεγονότα ή αρνείται ή αποκρύπτει τα αληθινά με έγγραφη υπεύθυνη δήλωση του άρθρου 8 παρ. 4 Ν. 1599/1986 τιμωρείται με φυλάκιση τουλάχιστον τριών μηνών. Εάν ο υπαίτιος αυτών των πράξεων σκόπευε να προσπορίσει στον εαυτόν του ή σε άλλον περιουσιακό όφελος βλάπτοντας τρίτον ή σκόπευε να βλάψει άλλον, τιμωρείται με κάθειρξη μέχρι 10 ετών.



*Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε
επίπεδο κλήσεων*



Εισαγωγή

Οι τελευταίες δεκαετίες έχουν επιφέρει ριζικές αλλαγές στον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των ανθρώπων, με την επιτευξη σημαντικών τεχνολογικών επιτευγμάτων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών, αποτελούν η καθιέρωση της κινητής τηλεφωνίας και του Διαδικτύου (Internet). Ειδικότερα η κινητή τηλεφωνία απελευθέρωσε τους ανθρώπους από τη παραδοσιακή ενσύρματη σύνδεση και του επέτρεψε να επικοινωνεί από όπου θέλει και όποτε θέλει. Όμως, η ραγδαία εξέλιξη του τηλεπικοινωνιακού τομέα οδήγησε σε απαιτητικές προτάσεις των συνδρομητών για υπηρεσίες και υψηλές ταχύτητες το οποίο με τη σειρά του έφερε νέους τρόπους κωδικοποίησης της πληροφορίας. Το πρόβλημα το οποίο μένει είναι οι διαθέσιμοι πόροι των συστημάτων, που είναι οι συχνότητες, και ο τρόπος που αυτές χρησιμοποιούνται έτσι ώστε να επιτύχουμε και μεγαλύτερες ταχύτητες και μεγαλύτερο φάσμα εξυπηρέτησης χρηστών.

Ένα σύστημα απωλειών (loss system) αποτελείται από δύο μέρη: τους εξυπηρετητές κλήσεων (servers) και τις κλήσεις (calls), που καταφθάνουν στο σύστημα και ζητούν να εξυπηρετηθούν χωρίς καθυστέρηση. Ο αριθμός των εξυπηρετητών εκφράζει τη χωρητικότητα του συστήματος. Στόχος ενός τέτοιου συστήματος είναι η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν γίνεται περισσότερων χρηστών. Για να επιτευχθεί αυτό, το σύστημα απωλειών εκτελεί κάποιους αλγόριθμους οι οποίοι προβλέπουν με μαθηματική ακρίβεια τη πιθανότητα αποτυχίας μιας κλήσης στο σύστημα.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη και ανάλυση σε επίπεδο κλήσεων της διασύνδεσης X2 που συνδέει δύο σταθμούς βάσης (evolved NodeBs) σε δίκτυο τεχνολογίας LTE. Για την ανάλυση της διασύνδεσης αυτής θεωρούμε ένα σύστημα απωλειών που εξυπηρετεί κλήσεις προερχόμενες από διαφορετικές κατηγορίες κίνησης και χρησιμοποιεί πεπερασμένο αριθμό πηγών κίνησης.



Κεφάλαιο 1

1.1 Εισαγωγή στη θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Η τηλεπικοινωνιακή κίνηση (teletraffic theory) αποτελεί κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών και συγκεκριμένα της εφαρμοσμένης πιθανοθεωρίας. Ο όρος αυτός έχει εκτενή σημασία, καθώς να μεν χρησιμοποιείται στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και στις εφαρμογές του αλλά μπορεί να εμφανιστεί και σε συστήματα ασύρματων δικτύων καθώς και σε συστήματα του Διαδικτύου. Η Θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης προσπαθεί μέσω εφαρμογής των θεωριών πιθανοτήτων να δώσει λύση σε προβλήματα πάνω στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όπως είναι η αξιολόγηση της απόδοσης, θέματα σχετικά με τη σχεδίαση και τη συντήρηση.

Για να επιτευχθεί η ομαλή λειτουργία στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, πρέπει να παρθούν αποφάσεις οι οποίες θα ανταπεξέρχονται στα σύνθετα προβλήματα που υφίστανται όπως **η χωρητικότητα** (system capacity) ενός συστήματος, **η ποιότητα εξυπηρέτησης** (Quality of Service), **η εισερχόμενη κίνηση** (incoming traffic) , **πιθανότητα φραγής** (blocking probability) καθώς και **η καθυστέρηση εξυπηρέτησης** (delay) της κλήσης με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση πάνω σε αυτά. Στόχος, δηλαδή, είναι αποδοτικές λύσεις πάνω στα συστήματα αυτά, τα οποία θα πρέπει να καλύπτουν τις απαιτήσεις των χρηστών και να αποφεύγουν δυνητικά την υπερφόρτωση του συστήματος.

1.2 Εφαρμογές πάνω στη Θεωρία της Τηλεπικοινωνιακής κίνησης.

Οι εφαρμογές πάνω στην τηλεπικοινωνιακή κίνηση έχουν ως στόχο την αποδοτικότερη λειτουργία των συστημάτων χωρίς απώλειες από το σύστημα. Γι' αυτό υπάρχουν μέθοδοι με τις οποίες μπορούμε να δούμε αν επιτυγχάνονται οι προδιαγραφές ενός συστήματος για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Σημαντικό να αναφερθεί, είναι ότι δε μπορεί να παραληφθεί από ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, ένας μηχανισμός πρόβλεψης, τα οποία βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις, για αναπάντεχα συμβάντα όπως υπερφόρτωση του συστήματος ή τεχνικές βλάβες.



1.3 Τεχνικές της Θεωρίας της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα (system model) αποτελείται από 2 βασικά μέρη: τους χρήστες (users) οι οποίοι διεκπεραιώνουν κλήσεις στο σύστημα και τους εξυπηρετητές (servers) ή και τις ουρές (queues) που αποτελούν τη βάση για τη μεταφορά και τη διαχείριση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Κάθε αίτημα που στέλνει ένας χρήστης προς εξυπηρέτηση ονομάζεται απόπειρα κλήσης (call attempt), η οποία για να διεκπεραιωθεί, θα χρειαστεί περισσότερους από έναν εξυπηρετητές. Για να γίνει μία κλήση στο σύστημα θα χρειαστεί χρήση μια γραμμής του δικτύου που ονομάζονται **trunks**. Ο αριθμός των trunks είναι άμεσα συνδεδεμένος με την κίνηση που υπάρχει σε ένα σύστημα και ο αριθμός των κλήσεων μεταβάλλεται ακαθόριστα. Όταν μια γραμμή είναι διαθέσιμη, τότε η κλήση εξυπηρετείται, διαφορετικά είτε μπλοκάρεται είτε τίθεται σε αναμονή από το σύστημα έως ότου εξυπηρετηθεί.

Η σύνδεση εισερχόμενων και εξερχόμενων γραμμών πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος, του διακοπτικού/επιλογικού συστήματος (switching system). Το σύστημα αυτό χωρίζεται σε :

1. **Συστήματα περιορισμένης διαθεσιμότητας (limited availability systems)**, όπου κάθε εισερχόμενη γραμμή έχει προκαθορισμένη την εξερχόμενη της με αποτέλεσμα να κάνει τη ζεύξη επιλεκτική.
2. **Συστήματα πλήρους διαθεσιμότητας (full availability systems)**, όπου δε υπάρχει κάποιος περιορισμός και κάθε εισερχόμενη γραμμή μπορεί να συνδεθεί με κάθε εξερχόμενη.

Η κατάσταση που όλα τα trunks είναι κατειλημμένα από τους χρήστες και το σύστημα δε μπορεί να δεχτεί άλλες κλήσεις αποτελεί την **συμφόρηση (congestion)** ενός συστήματος. Στη συμφόρηση οι κλήσεις που δε εξυπηρετούνται χάνονται, και γι αυτό το λόγο η πραγματική κίνηση είναι μικρότερη από τη διεκπαιρέωμενη. [1/23]

Ο αριθμός των χρηστών που μπορούν να εξυπηρετηθούν από ένα σύστημα, μπορεί να είναι οποιοσδήποτε μη αρνητικός ακέραιος k , $k \in [0, +\infty)$.



1.4 Μοντελοποίηση Τηλεπικοινωνιακών Συστημάτων

Όταν ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση συμφόρησης, τότε πρέπει να υπάρξει μια διαχείριση για να αποφευχθεί αυτό. Έτσι, η μοντελοποίηση των συστημάτων αυτών χωρίζεται σε 2 βασικές κατηγορίες, όπου είναι η **τα συστήματα απωλειών (loss or non-delay systems)** και **τα συστήματα αναμονής (delay or waiting systems)**.

1.4.1 Συστήματα απωλειών (loss or non-delay systems)

Είναι τα συστήματα στα οποία μια αποκλεισμένη κλήση απλώς απορρίπτεται και χάνεται. Με λίγα λόγια ο αριθμός των χρηστών που πραγματοποιούν μια κλήση είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των εξυπηρετητών με αποτέλεσμα το σύστημα να μπλοκάρει αυτούς τους χρήστες και να μην τους εξυπηρετεί ποτέ. Όπως προαναφέρθηκε στη συμφόρηση οι κλήσεις που δε εξυπηρετούνται χάνονται, και για αυτό το λόγο η πραγματική κίνηση είναι μικρότερη από τη διεκπαιρέωμενη. Ως εκ τούτου ισχύει :

$$\text{Διεκπαιρέωμενη κίνηση} = \text{Προσφερόμενη κίνηση} - \text{Απώλειες Συστήματος} \quad (1.1)$$

1.4.2 Συστήματα αναμονής (delay or waiting systems)

Τα συστήματα αναμονής, σε αντίθεση με αυτά των απωλειών, όταν μια κλήση βρίσκει όλους τους εξυπηρετητές κατειλημένους, τότε τη τοποθετεί σε μία ουρά αναμονής χωρίς να χάνεται. Το σύστημα πρέπει να είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε όλες οι κλήσεις κάποια στιγμή να μπορέσουν να εξυπηρετηθούν χωρίς κάποια απώλεια ή πολύ μεγάλο χρόνο αναμονής. Ένας τύπος που περιγράφει ένα τέτοιο σύστημα είναι :

$$\text{Θέση ουράς αναμονής} + \text{Εξυπηρετητές} \geq \text{Χρήστες} \quad (1.2)$$

1.5 Βαθμός εξυπηρέτησης (Grade of Service, GoS)

Όταν ένα σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση συμφόρησης, τότε όπως είδαμε και παραπάνω θα υπάρχει ένας αριθμός κλήσεων που δε θα εξυπηρετηθούν ποτέ και θα



χαθούν. Το ποσοστό των κλήσεων που χάνονται λόγω της συμφόρησης ονομάζεται βαθμός εξυπηρέτησης (Grade of Service) το οποίο ορίζεται ως:

$$GoS = \frac{\text{Συνολικός αριθμός χαμένων κλήσεων}}{\text{Συνολικός αριθμός κλήσεων στο σύστημα}} \quad (1.3)$$

Όταν το GoS ισούται με μονάδα, τότε όλες οι κλήσεις μπλοκάρονται, ενώ όσο μικραίνει η τιμή του, το ποσοστό εξυπηρέτησης κλήσεων μεγαλώνει. Ο βαθμός εξυπηρέτησης αντιστοιχεί στη **πιθανότητα συμφόρησης κλήσης (call congestion probability)**.

Με λίγα λόγια ο δείκτης αυτός δείχνει απο πλευράς χρήστη τη πιθανότητα να βρει τις γραμμές ενός συστήματος κατειλημένες σε ώρα αιχμής του συστήματος (busy hour).

Εκτός απο τη συμφόρηση κλήσεων έχουμε και τη συμφόρηση κίνησης (traffic congestion), που μας δείχνει το ποσοστό κίνησης που δεν εξυπηρετήθηκε, καθώς και το χρόνο συμφόρησης (time congestion) που μας δείχνει την διαθεσιμότητα των servers ενός συστήματος.

$$\text{Συμφόρηση κίνησης} = \frac{\text{κίνηση που χάθηκε}}{\text{προσφερόμενη κίνηση}} \quad (1.4)$$

$$\text{Χρόνος Συμφόρησης} = \frac{\text{συνολικός χρόνος απασχόλησης των servers}}{\text{Συνολικό χρόνο παρατήρησης}} \quad (1.5)$$

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο Βαθμός εξυπηρέτησης με το Χρόνο συμφόρησης αναπαρηστούν την ίδια τιμή καθώς όταν φαίνεται οτι στο σύστημα υπάρχει πιθανότητα απώλειας χαμένων κλήσεων, αυτό αυτόματα ισοδυναμεί με τη πιθανότητα των απασχολημένων server. Ωστόσο η διαφορά τους είναι οτι ο Βαθμός εξυπηρέτησης απευθύνεται προς το χρήστη ενώ ο χρόνος συμφόρησης προς το δίκτυο μεταγωγής και οι τιμές τους μπορεί να είναι ίδιες ή και διαφορετικές, ανάλογα με το μοντέλο κίνησης που χρησιμοποιείται.



1.6 Φορτίο κίνησης

Στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, το φορτίο κίνησης ή η ένταση κίνησης (traffic intensity) είναι ο βαθμός πληρότητας ενός server σε μια συγκεκριμένη περίοδο χρόνου (συνήθως στην ώρα αιχμής). Συμβολίζεται με a και είναι ένα μέγεθος που δεν έχει διαστάσεις (αδιάστατο), αλλά μονάδα μέτρησης του είναι το Erlang (erl) προς τιμή του Δανού μαθηματικού Ager Kragup Erlang, ιδρυτή της θεωρίας τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Ο χρόνος παρατήρησης μέσω Erlang είναι η μια ώρα (ή 3600sec).

$$a = \frac{\text{Σχρόνος πληρότητας ενός server (ή χρόνος εξυπηρέτησης)}}{\text{Περίοδος Παρατήρησης}} \quad (1.6)$$

Στην Αμερική έχει καθιερωθεί και χρησιμοποιείται (συνήθως) ακόμα μια μονάδα μέτρησης του φορτίου κίνησης εκτός από το Erlang, που είναι η CSS (Centum Call Seconds) όπου μετριέται ο χρόνος κατάληψης ενός trunk. Ο χρόνος παρατήρησης σε αυτή τη περίπτωση είναι τα εκατό δευτερόλεπτα (ή 100sec).

1.6.1 Ιδιότητες του φορτίου κίνησης

Κάθε φορτίο κίνησης έχει 4 προκαθορισμένες ιδιότητες οι οποίες είναι :

1. Αν c ο αριθμός των κλήσεων που φθάνουν στο τηλεπικοινωνιακό σύστημα σε συγκεκριμένο χρόνο και h ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης, τότε το φορτίο κίνησης βγαίνει από τη σχέση $a = c \cdot h$
2. Το φορτίο κίνησης ισούται με τον αριθμό των κλήσεων που φθάνουν σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα εντός χρονικού διαστήματος ίσου με τη μέση τιμή της διάρκειας τους.
3. Όταν η μεταφορά γίνεται από μία μόνο γραμμή, τότε το φορτίο κίνησης ισούται με 1 erl, καθώς η γραμμή χρησιμοποιείται αποκλειστικά από έναν και δε μπορεί να υπερβεί τη τιμή αυτή ($0 \leq a \leq 1$).

Η εξυπηρέτηση από μια δέσμη γραμμών είναι ισοδύναμο με τον μέσο αριθμό κατειλημμένων γραμμών της δέσμης.



1.7 Στοχαστικές Διαδικασίες

Στοχαστικές διαδικασίες ονομάζουμε μια οικογένεια τυχαίων μεταβλητών που δέχεται τιμές απο ένα σύνολο T το οποίο ορίζεται απο εμάς και συμβολίζεται μαθηματικώς :

$$X(t) : t \in T \quad (1.7)$$

Ανάλογα με το πεδίο ορισμού του t , διακρίνονται οι στοχαστικές διαδικασίες σε συνεχή και σε διακριτό χρόνο.

- Αν $t \in [0, a)$, τότε έχουμε στοχαστική διαδικασία σε **συνεχή χρόνο**.
- Αν $t = 0, 1, 2, \dots, n$, τότε έχουμε στοχαστική διαδικασία σε **διακριτό χρόνο**.

Αν το πεδίο τιμών μιας τυχαίας μεταβλητής $X(t)$ (ή X_n για διακριτές τιμές) θεωρείται E , τότε αυτό ονομάζεται **χώρος καταστάσεων**. Οπότε παρατηρείται ότι οι στοχαστικές διαδικασίες παρατηρούνται και στο χρόνο και στο χώρο ταυτόχρονα κατατάσσοντας τα έτσι σε τέσσερις κατηγορίες:

1. Στοχαστικές Διαδικασίες σε συνεχή χρόνο & συνεχή χώρο
2. Στοχαστικές Διαδικασίες σε συνεχή χρόνο & διακριτό χώρο
3. Στοχαστικές Διαδικασίες σε διακριτό χρόνο & συνεχή χώρο
4. Στοχαστικές Διαδικασίες σε διακριτό χρόνο & διακριτό χώρο

Η έρευνα στον τομέα των στοχαστικών διαδικασιών έχει ως στόχο την κατανόηση διάφορων φυσικών και τεχνητών διαδικασιών τα οποία μοντελοποιούνται σε συστήματα με τυχαίες μεταβλητές ούτως ώστε να προσαρμόζονται στα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των πραγματικών διαδικασιών. Επομένως έχει τρεις απόψεις οι οποίες είναι: [1]

1. **Θεωρία** : Μαθηματική εξερεύνηση των στοχαστικών διαδικασιών που έχουν στόχο την βαθύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων τους.
2. **Μετρήσεις** : Λαμβάνονται απο τη πραγματική διαδικασία προκειμένου να προσδιοριστούν τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους.
3. **Μοντελοποίηση**: Προσαρμογή των μετρηθέντων στατιστικών χαρακτηριστικών της πραγματικής διαδικασίας με εκείνες ενός μοντέλου και



ανάπτυξη νέων μοντέλων στοχαστικών διαδικασιών που προσομοιάζουν καλά τη πραγματική διαδικασία.

1.7.1 Διαδικασία Markov

Διαδικασία Markov (Markov process) είναι μια τυχαία διαδικασία στην οποία το μέλλον είναι ανεξάρτητο από το παρελθόν, δεδομένου του παρόντος. Περιγράφονται από τις διαφορικές εξισώσεις και αποτελούν μια από τις σημαντικότερες κατηγορίες τυχαίων διαδικασιών. [7]

Περιγράφει μια σειρά από πιθανά γεγονότα του παρόντος τα οποία εξαρτώνται άμεσα μόνο από τα προηγούμενα τους συμβάντα. Δηλαδή μια διαδικασία ικανοποιεί την ιδιότητα αν και μόνο αν μπορεί να προβλέψει το μέλλον της διαδικασίας μόνο από τη παρούσα κατάσταση της. Μια στοχαστική διαδικασία $x(t)$ ονομάζεται Markov αν για κάθε n και $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ έχουμε: [9]

$$\begin{aligned} P(x(t_n) \leq x_n | x(t_{n-1}), \dots, x(t_1)) &= P(x(t_n) \leq x_n | x(t_{n-1})) \\ &\equiv P(x(t_n) \leq x_n | x(t) \forall t \leq t_{n-1} = P(x(t_n) \leq x_n | x(t_{n-1})) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Αν σε μια δεδομένη στιγμή t έχω $X(t)$ εισερχόμενους χρήστες σε ένα σύστημα σε συνεχές χρόνο, ο χρόνος άφιξης και εξυπηρέτησης είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους, καθώς μεσολαβεί ο χρόνος διεκπαιρέωσης της εξυπηρέτησης του χρήστη, ο οποίος μετριέται σε διακριτές χρονικές $\{X(t)/t \geq 0\}$ στιγμές άμεσα εξαρτημένες μόνο από τις προηγούμενες του, δημιουργώντας έτσι μια αλυσίδα. Η παραπάνω πρόταση διατυπώνει τον ορισμό μιας αλυσίδας Markov.

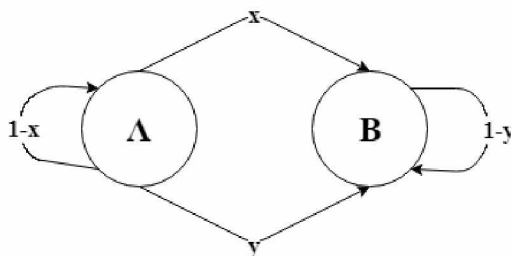
Ένα θεωρητικό παράδειγμα πάνω στις αλυσίδες Markov είναι η πιθανότητα βλάβης μιας μηχανής. Μια μηχανή μπορεί να έχει είτε βλάβη σε μια δεδομένη μέρα είτε να λειτουργεί κανονικά. Εάν λειτουργεί, θα πάθει βλάβη την επόμενη μέρα με πιθανότητα x , ή θα συνεχίσει να λειτουργεί κανονικά με πιθανότητα $1-x$. Αντίστοιχα, εάν πάθει βλάβη σε κάποια δεδομένη μέρα, θα επισκευαστεί και θα λειτουργήσει με πιθανότητα y , ή θα συνεχίσει να έχει βλάβη με πιθανότητα $1-y$.



$$\begin{bmatrix} 1-x & x \\ y & 1-y \end{bmatrix}$$

Πίνακας Μεταβάσεων των πιθανοτήτων
βλάβης της μηχανής

Μοντελοποιούμε τη μηχανή μέσω μιας αλυσίδας Markov η οποία μας δείχνει τη κατάσταση της.



Σχήμα 1: Παράδειγμα διάγραμμα μετάβασης στη διαδικασία Markov

Απο το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνεται ότι η κατάσταση της μηχανής την επόμενη μέρα εξαρτάται άμεσα μόνο απο τη κατάσταση της παρούσας μέρας, επαληθεύοντας τη προφανώς την ιδιότητα Markov.

1.7.2 Διαδικασία Poisson

Η στοχαστική διαδικασία Poisson είναι μια **συνεχούς χρόνου** διαδικασία η οποία παίρνει μη αρνητικές τιμές ακέραιων αριθμών και εφαρμόζεται όταν δεν είναι δυνατή η διακριτοποίηση του χρόνου. Έτσι η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται όταν έχουμε εισερχόμενες κλήσεις με ρυθμό αφίξεων λ και ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

Αν $N(t)$ το πλήθος συμβάντων σε μια χρονική στιγμή $(0, t]$ τότε θα πρέπει να ισχύει:

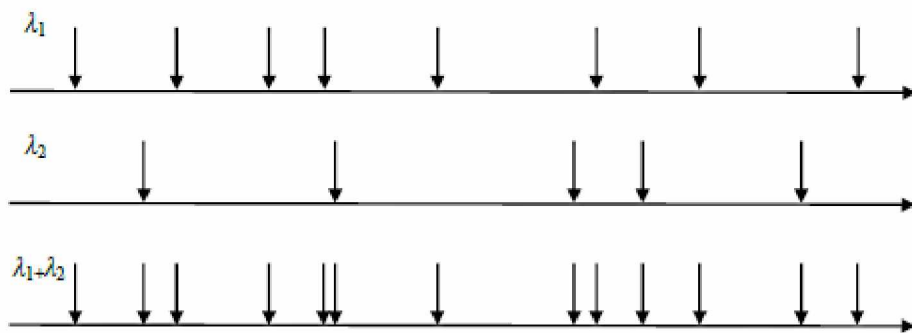
1. $N(0) = 0$. ← Κανένα συμβάν για χρόνο $t=0$.
2. Η $\{N(t), t \geq 0\}$ πρέπει να έχει ανεξάρτητες αυξήσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί σε μια διαδικασία Poisson τα γεγονότα λαμβάνουν χώρα σε μικρά υποδιαστήματα ανεξάρτητα απο τα άλλα υποδιαστήματα.
3. Σε διάστημα μήκους t τα συμβάντα ακολουθούνται απο την κατανομή Poisson με παράμετρο λt .



$$P(N(t + s) - N(s) = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (1.9)$$

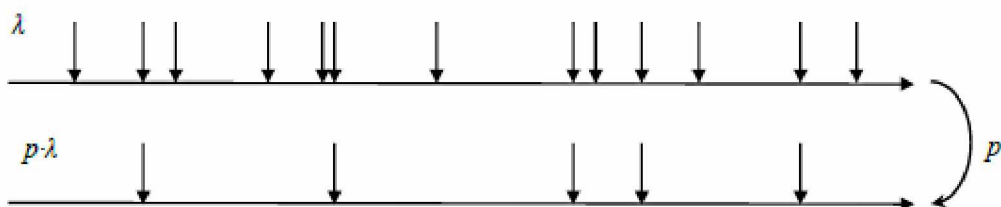
Οι ιδιότητες που έχει η διαδικασία Poisson είναι πολύ χρήσιμες αφού χρησιμοποιούνται σε μοντέλα που περιγράφουν εισερχόμενους χρήστες (κλήσεις) σε ένα σύστημα καθώς και στη θεωρία ουρών. Η πρακτικότητα των μοντέλων αυτών είναι ιδιαίτερα εμφανίσιμη σε μεγάλο όγκο ανεξάρτητων χρηστών. Κάποιες από αυτές τις ιδιότητες είναι : [1]

1. **Προσαρμογή του αριθμού αφίξεων χρηστών στο σύστημα:** Σε ένα διάστημα $(0, t)$ σημειώνουμε τη θέση άφιξης κάθε εισερχόμενου χρήστη.
2. **Υπέρθωση:** ο Συνδυασμός άφιξης χρηστών σε ένα ενιαίο σύστημα από δύο διαφορετικά



Σχήμα 2: Υπέρθωση δύο διαδικασιών Poisson

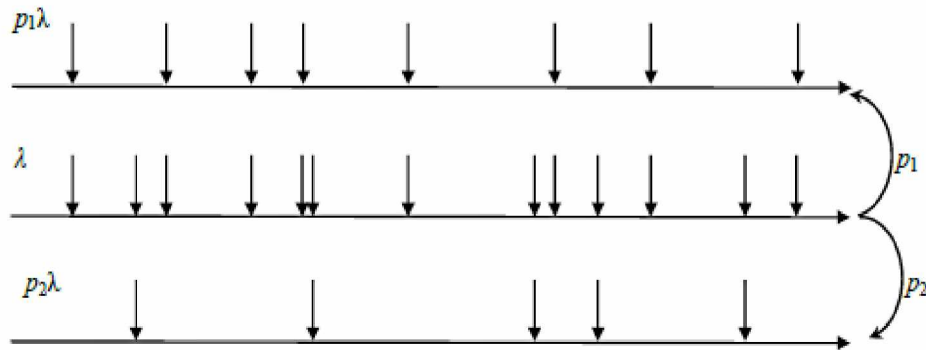
3. **Τυχαία επιλογή:** Έχοντας ρυθμό άφιξης λ σε ένα σύστημα με πιθανότητα επιλογής της άφιξης p , προκύπτει μια διαδικασία Poisson με νέα ένταση $\lambda' = p \cdot \lambda$



Σχήμα 3: Τυχαία επιλογή στη διαδικασία Poisson



4. **Τυχαία διάσπαση:** Μια διαδικασία Poisson χωρίζεται τυχαία σε δύο ανεξάρτητες Poisson διαδικασίες με πιθανότητες p_1 και p_2 και αντίστοιχες εντάσεις $p_1 \cdot \lambda$ και $p_2 \cdot \lambda$



Σχήμα 4: Τυχαία διάσπαση στη διαδικασία Poisson

1.7.3 Ιδιότητα PASTA (Poisson Arrivals See Time Averages)

Αποτελεί βασικό εργαλείο πάνω στην θεωρία ουρών. Μπορεί να αναφερθεί και ως ROP (Random Observer Property).

Έστω ένα σύστημα που δέχεται m εισερχόμενες κλήσεις το οποίο ακολουθεί μια διαδικασία Poisson με ένταση λ . Στο σύστημα παρατηρούμε δύο πιθανότητες, μία πιθανότητα P_m να υπάρχουν κλήσεις στο σύστημα μιας δεδομένης στιγμής t και μία Q_m για το πόσες κλήσεις υπάρχουν στο σύστημα πριν τη άφιξη μιας καινούργιας. Συνεπώς, θα ισχύει $P_m \neq Q_m$ όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία ,καθώς δε γίνεται να υπάρχει κάποια κλήση μέσα στο σύστημα όταν εισέρχεται η καινούργια.

Απόδειξη:

Έστω χρόνος εξυπηρέτησης ίσος με ένα δευτερόλεπτο (1sec) και χρονικό διάστημα μεταξύ των αφίξεων ίσο με δύο δευτερόλεπτα (2sec). Μπορούμε άμεσα να συμπαράνουμε ότι σε κατάσταση ισορροπίας το σύστημα είτε θα εξυπηρετεί μια κλήση είτε όχι, καθώς ο χρόνος άφιξης μεταξύ των κλήσεων είναι μεγαλύτερος του χρόνου εξυπηρέτησης. Συνεπώς η πιθανότητα να υπάρχει μία ή καμία κλήση στο σύστημα είναι 50%.

$$P_0 = P_1 = 0.5 \text{ ή } 50\%$$



Αντίστοιχα όταν θα βρίσκεται μία κλήση στο σύστημα και θα εξυπηρετείται δε θα υπάρχει κάποια άφιξη κλήσης μέσα σε αυτό.

$$Q_1 = 0 \text{ ή } 0\%$$

Αντίστροφα, ισχύει οτι όταν δε θα υπάρχει κάποια κλήση στο σύστημα και θα υπάρχει κάποια άφιξη τότε :

$$Q_0 = 1 \text{ ή } 100\%$$

Συμπαιρένεται λοιπόν ότι σε σταθερή κατάσταση $P_m \neq Q_m \forall m$.

Όμως η Poisson διαδικασία έχει εκθετική κατανομή χρόνου μεταξύ των αφίξεων, και συνεπώς η πιθανότητα να υπάρχουν κλήσεις στο σύστημα με τη πιθανότητα μια κλήση που φτάνει να βρίσκει άλλες είναι ίση, δηλαδή $P_m = Q_m$. Η ιδιότητα αυτή χαρακτηρίζεται ως PASTA (Poisson Arrivals See Time Average).

1.8 Μοντέλο απωλειών Erlang

Αποτελεί το πιο απλό μοντέλο απωλειών. Αποτελείται απο μία ζεύξη χωρητικότητας C μονάδων εύρους ζώνης, στην οποία η διαδικασία άφιξης των κλήσεων ακολουθεί την κατανομή Poisson , ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων ακολουθεί την εκθετική κατανομή.[1]

Για να εξυπηρετηθεί ένας χρήστης (κλήση) απο το σύστημα αιτείται έναν εξυπηρετητή (server). Κάθε εξυπηρετητής θα πρέπει να έχει χωρητικότητα ίση ή και μεγαλύτερη των χρηστών στο σύστημα του για να μπορέσει να ανταπεξέλθει στα αιτήματα τους. Σε περίπτωση που ένας χρήστης δε μπορεί να αιτηθεί έναν εξυπηρετητή, λόγω έλλειψης χωρητικότητας του συστήματος ή πλήρης απασχόλησης του, μπλοκάρεται και χάνεται.

Εστω $\alpha = \lambda/\mu$ με:

α = φορτίο κίνησης

λ = ρυθμός άφιξης κλήσεων

μ = ρυθμός εξυπηρέτησης.



Η πιθανότητα να βρεθούν n εξυπηρετητές κατειλημμένοι σε μια χρονική στιγμή δίνεται απο το παρακάτω τύπο: [1]

$$P(n) = \frac{\frac{a^n}{n!}}{\sum_{i=0}^s \frac{a^i}{i!}}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, s \quad (1.10)$$

Όπου n = αριθμός κατειλημμένων εξερχόμενων γραμμών και s = αριθμός εξερχόμενων γραμμών του συστήματος.

Με βάση το τύπο (1.10) μπορούμε να βρούμε τη πιθανότητα όλοι οι εξυπηρετητές να είναι κατειλημμένοι σε μία χρονική περίοδο. Αυτό δίνεται απο το παρακάτω τύπο: [1]

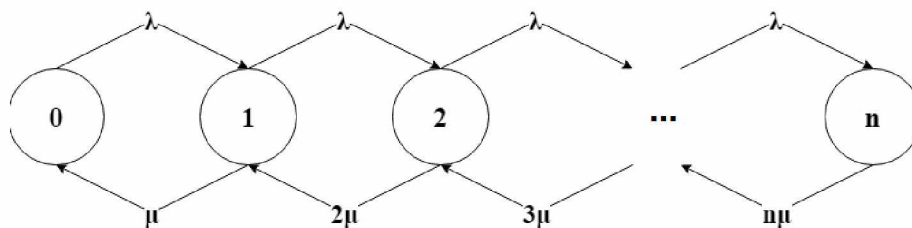
$$B = \frac{\frac{a^s}{s!}}{\sum_{i=0}^s \frac{a^i}{i!}} = E_s(a) \quad (1.11)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί τη **Erlang-B formula** και εκφράζει την πιθανότητα απώλειας κλήσεως. Λόγω των παραγοντικών όμως είναι δύσκολο να υπολογιστεί η πιθανότητα απώλειών κλήσεων όταν ο αριθμός χρηστών είναι πολύ μεγάλος.

Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται ο αναδρομικός τύπος: [1]

$$E_s(a) = \frac{a \cdot E_{s-1}(a)}{s + a \cdot E_{s-1}(a)}, \quad E_0(a) = 1 \quad (1.12)$$

Σε ένα σύστημα απωλειών Erlang, μπορούμε να δούμε τον αριθμό των κλήσεων που εξυπηρετούνται καθώς και τους εξυπηρετητές που είναι κατειλημμένοι μέσα απο ένα διάγραμμα κατάστασης το οποίο είναι ως εξής:



Σχήμα 5: Διάγραμμα καταστάσεων σε σύστημα Erlang.

Σε κατάσταση ισορροπίας του συστήματος θα πρέπει να ισχύει:

$$Ρυθμός άφιξης = Ρυθμός εξαγωγής \quad (1.13)$$



Οπότε σύμφωνα με το διάγραμμα και την προαναφερόμενη εξίσωση προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\text{Κατάσταση 0: } \lambda P_0 = \mu P_1$$

$$\text{Κατάσταση 1: } \lambda P_1 + \mu P_1 = 2\mu P_2 + \lambda P_0$$

$$\text{Κατάσταση 2: } \lambda P_2 + 2\mu P_2 = \lambda P_1 + 3\mu P_3$$

...

$$\text{Κατάσταση n: } n\mu P_n = \lambda P_{n-1}$$

«Ετσι, αν ενδιαφερόμαστε μόνο για τη μόνιμη κατάσταση που υποθέτουμε ότι υπάρχει, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη εξίσωση μόνιμης καταστάσεως κατ' ευθείαν για να βρούμε τη πιθανότητα καταστάσεως που μας ενδιαφέρει.» [1]

Κεφάλαιο 2 (1G → 4G)

2.1 Εισαγωγή

Η κινητή επικοινωνία είναι ένα απο τα μεγαλύτερα επιτεύγματα του ανθρώπου. Μιλώντας απομακρυσμένα, χωρίς τη παραδοσιακή καλωδίωση «έλυσε τα χέρια» σε πάρα πολλά προβλήματα πάνω στις επιχειρήσεις αλλά ακόμα και στη καθημερινότητα μας. Η περιπέτεια όμως της κινητής τηλεφωνίας ξεκίνησε αδρά μετά τη λήξη του Β Παγκοσμίου Πολέμου διανύοντας εως σήμερα μια αξιοθαύμαστη πορεία.

2.2 Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Πρώτης Γενιάς (1G)

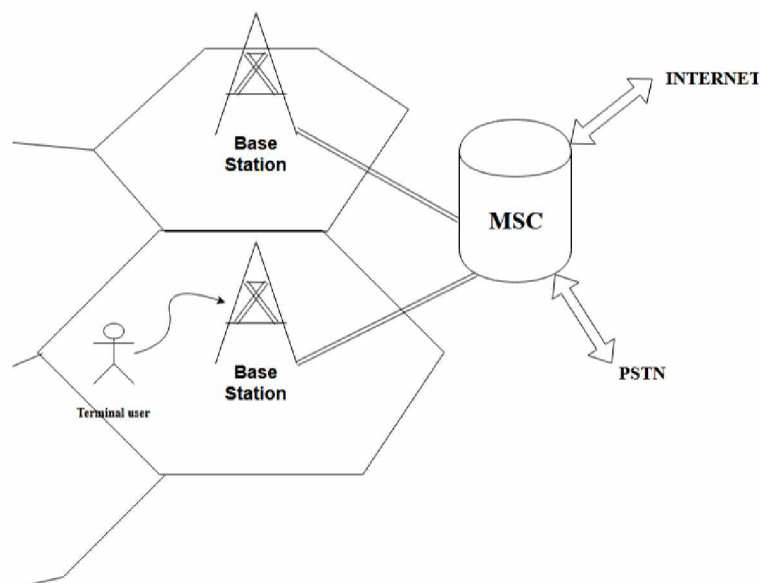
Τα δίκτυα επικοινωνιών πρώτης γενιάς (1st Generation 1G) πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 70' στις Η.Π.Α. και στις αρχές της δεκαετίας του 80' στην Ευρώπη. Τα αποκαλούσαν δίκτυα αναλογικά καθώς η μετάδοση του σήματος μεταξύ χρήστη και του σταθμού βάσης γινόταν αναλογικά και όχι ψηφιακά όπως θα δούμε στις επόμενες γενιές, και επέτρεπε μόνο υπηρεσίες φωνής. Η διαμόρφωση της ομιλίας γινόταν απευθείας σε μία υψηλότερη φέρουσα συχνότητα (>150MHz). Για τη ασύρματη μετάδοση χρησιμοποιούνταν η πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας FDMA (Frequency Division Multiple Access), όπου παρέχει σε κάθε τερματικό χρήστη διαφορετική ζώνη συχνοτήτων (frequency band), που μπορούν να



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

επαναχρησιμοποιηθούν, για τη μετάδοση των δεδομένων. Για να επιτευχθεί μια συνομιλία απαιτούνταν δύο κανάλια, ένα κανάλι ανερχόμενης ζεύξης (uplink) και ένα κανάλι κατερχόμενης ζεύξης (downlink). Το σύστημα αυτό για να μεταγάγει την πληροφορία της φωνής από το πομπό στο δέκτη, χρησιμοποιούσε τη λογική μεταγωγής κυκλώματος (Circuit Switching).

Μια από τις πιο σημαντικές ανακαλύψεις στο χώρο των κινητών επικοινωνιών είναι η έννοια της κυψέλης (**cell**). Αντιπροσωπεύει μία γεωγραφική περιοχή μέσα στην οποία μπορούν να εξυπηρετούνται οι χρήστες. Λέγονται κυψεώτες δομές διότι σε θεωρητικό υπόβαθρο αναπαριστούνται (τις περισσότερες φορές) ως εξαγωνικές δομές που μοιάζουν με τις κυψέλες των μελισσών. Κάθε κυψέλη έχει το δικό της σταθμό βάσης (**BS-Base Station**) ο οποίος δημιουργεί και δρομολογεί τις κλήσεις. Κάθε σταθμός συνδέεται άμεσα με το κέντρο δρομολογήσεων **MSC** (Mobile Switching Center), το οποίο διαχειρίζεται θέματα κινητικότητας του χρήστη και θέματα επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών, και αυτό με τη σειρά του συνδέεται με το σταθερό τηλεφωνικό δίκτυο **PSTN** (Public Switched Telephone Network) ή και με το **Διαδίκτυο** (τα τελευταία χρόνια).



Σχήμα 6: Βασική Αρχιτεκτονική ενός ασύρματου δικτύου.



Παρ' όλα αυτά τα συστήματα πρώτης γενιάς είχαν αρκετά προβλήματα να αντιμετωπίσουν. Ένα από αυτά ήταν ο μικρός αριθμός των χρηστών που μπορούσαν να μιλήσουν ταυτόχρονα καθώς το φάσμα συχνοτήτων ήταν περιορισμένο, υπήρχε απώλεια σήματος και μικροί ρυθμοί μετάδοσης (8-10Kbps). Η αναλογική χρήση του συστήματος αυτού δε άφηνε περιθώρια για βελτιώσεις όπως είναι η συμπίεση και η κωδικοποίηση της πληροφορίας καθώς αυτό είχε ως προϋπόθεση τη χρήση ψηφιακού σήματος. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπιζόνταν ήταν η έλλειψη δυνατότητας διατήρησης της κλήσης. Όταν κάποιος μιλούσε στο τηλέφωνο και απομακρυνόταν αρκετά από το σταθμό βάσης, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα το τερματισμό της κλήσης χωρίς τη μεταπομπή του στον πιο κοντινό σταθμό βάσης, περιορίζοντας έτσι τις δυνατότητες της κινητής επικοινωνίας. Σημαντικό να αναφερθεί είναι ότι η δυνατότητα επικοινωνίας στα συστήματα 1G ήταν οριοθετημένη σε στενό γεωγραφικό κύκλο (κυρίως μόνο μέσα στους χώρους ενός κράτους). Τέλος, οι συσκευές των χρηστών (τερματικά) ήταν ογκώδης με μεγάλες κεραίες και μεγάλο για εκείνη την εποχή κόστος.

Το Advanced Mobile Phone Service (AMPS) αποτελούσε το πρώτο Αμερικάνικο σύστημα στις κινητές τηλεφωνίες που πρωτοεμφανίστηκε το 1978 σε κάποιες πολιτείες των Η.Π.Α. ενώ στην Ευρώπη έκαναν την εμφάνιση τους δύο συστήματα, το Nordic Mobile Telephony (NMT) το 1981 και το European Total Access Communication System (ETACS) το 1983. Στη συνέχεια η ιδέα της κινητής τηλεφωνίας διαδόθηκε και στις υπόλοιπες ηπείρους.

2.3 Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών Δεύτερης Γενιάς (2G)

Η δεύτερη γενιά εμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1990, 10 χρόνια μετά τη εμφάνιση της πρώτης γενιάς. Φαίρνει καινοτόμα χαρακτηριστικά στις κινητές τηλεφωνίες μέσω της **ψηφιακής διαμόρφωσης** που δε μπορούσαν να ληφθούν στα συστήματα της πρώτης επειδή ήταν αναλογικά. Σε αντίθεση με τα συστήματα 1G, τα 2G χρησιμοποιούν Time Division Multiple Access (TDMA) ή Code Division Multiple Access (CDMA) για τον διαχωρισμό των χρηστών στο διάλυο εν αντιθέση του Frequency Division Multiple Access (FDMA) που λάμβανε χώρα. Τα πλεονεκτήματα λόγω της ψηφιοποίησης του σήματος ήταν μεγάλα καθώς γινόταν καλύτερη αξιοποίηση του φάσματος συχνοτήτων με αποτέλεσμα να έχουμε περισσότερους



χρήστες στα συστήματα κινητών επικοινωνιών, υπήρχε δυνατότητα κρυπτογράφησης των απεσταλμένων δεδομένων, δηλαδή κωδικοποίηση της ροής των δυαδικών μονάδων (bit stream) πριν την εκπομπή της από το GSM πομπό και εισαγωγή νέων υπηρεσιών όπως η Υπηρεσία Συντομών Μηνυμάτων **SMS** (Short Message Service).

Το πρώτο πρότυπο δικτύων δεύτερης γενιάς αποτελεί το Παγκόσμιο Σύστημα Κινητών Επικοινωνιών **GSM** (Global System for Mobile Telecommunication) το οποίο υιοθετήθηκε στην Φιλανδία και δόθηκε σε εφαρμογή το 1991. Αποτελεί ένα κυψελοειδές ψηφιακό σύστημα, το οποίο χρησιμοποιεί επίσης ηλεκτρομαγνητικά σήματα και την τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαχωρισμό του διαθέσιμου φάσματος συχνοτήτων σε ένα αριθμό καναλιών (FDMA) και επιπρόσθετα την διαίρεση αυτών σε χρονοθυρίδες για τη μετάδοση των σημάτων (TDMA). [4] Σε κάθε κανάλι υπάρχουν 8 χρονοθυρίδες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν από παραπάνω από ένα χρήστη. Κάθε χρονοθυρίδα δεσμεύεται μια κλήση χρήστη. Το πρότυπο GSM χρησιμοποιεί τη Γκαουσιανή διαμόρφωση ελάχιστης μετατόπισης – GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) για τη μετατροπή της ψηφιακής πληροφορίας σε αναλογικό σήμα μετάδοσης.

Το GSM κυριάρχησε στα Ευρωπαϊκά δίκτυα 2^{ης} Γενιάς και αποτέλεσε τη βάση εξέλιξης των προτύπων GPRS & EDGE, τα οποία κατηγοριοποιούνται στις γενιές 2.5G & 2.75G αντίστοιχα. Η ζώνη συχνοτήτων των GSM είναι είτε 900MHz είτε 1800MHz. Συγκεκριμένα :

Για το GSM900:

Ανερχόμενη ζεύξη (uplink) → 890-915MHz

Κατερχόμενη ζεύξη (downlink) → 935-960MHz

Αριθμός Καναλιών → 124/κατεύθυνση εύρους 200KHz

Τα όρια αυτά επεκτάθηκαν κατά 10MHz στο E-GSM900 (Extended GSM) και κατά 14MHz R-GSM900 (Railway GSM).



Για το GSM1800 ή DCS (Digital Cellular System):

Ανερχόμενη ζεύξη (uplink) → 1710-1785MHz

Κατερχόμενη ζεύξη (downlink) → 1805-1880MHz

Αριθμός Καναλιών → 374/κατεύθυνση εύρους 200KHz

Πέρα απο τη κλασσική τηλεφωνία, μέσω της ψηφιακής μετάδοσης έχουμε μία πληθώρα υπηρεσιών που λαμβάνουν χώρα στις κινητές επικοινωνίες οι οποίες είναι αρκετά χρήσιμες και για επαγγελματικούς και για προσωπικούς σκοπούς. Μέσω του GSM έρχονται νέες υπηρεσίες όπως:

- **Called ID**
- **Εκτροπή κλήσεων** (Προώθηση κλήσεων προς έναν άλλο προορισμό.)
- **Απόκρυψη κλήσεων**
- **Φραγή κλήσεων**
- **Cell Broadcast** (Εμφάνιση τοπικών πληροφοριών σε μια συγκεκριμένη περιοχή με γραπτό μήνυμα στο κινητό του χρήστη.)
- **Ειδοποίηση κλήσεων** (Υπηρεσία δικτύου που ενημερώνει το χρήστη με γραπτό μήνυμα για εισερχόμενες κλήσεις που έγιναν αλλά δε ανταποκρίθηκαν λόγω μη εφικτής σύνδεσης ή λόγω απενεργοποιημένης κινητής συσκευής.)
- **SMS** (Short Message Service)
- **Advice of Charge** (Υπηρεσία ενημέρωσης διάρκειας και χρέωσης μιας κλήσης του χρήστη σε εξερχόμενη κλήση.)
- **Αναμονή και κράτηση κλήσεων – Συνδυάσκειση**
- **Τεχνολογία CSD** (Circuit Switched Data) (Υπηρεσία που επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων στη ταχύτητα 9,6 ή 14,4 Kbps για upload-download (συμμετρική σύνδεση) ή 28,8 Kbps για download (ασύμμετρη σύνδεση) και στο **HSCSD** (High Speed Circuit Switched Data) τα 57,6 Kbps upload και 14,4 Kbps download (ασύμμετρη σύνδεση) μέσω μεταγωγή κυκλώματος.)
- **Υπηρεσία Roaming**

Κάθε κινητή μονάδα (τερματικός χρήστης) για να εισέλθει στο GSM δίκτυο θα πρέπει να διαθέτει υποχρεωτικά μια κάρτα ταυτοποίησης η οποία ονομάζεται Μονάδα



Ταυτότητας Συνδρομητή **SIM** (Subscriber Identity Module). Αποτελεί μια κάρτα μνήμης που περιέχει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τον συνδρομητή, τα δίκτυα και τις χώρες που μπορούν να τον εξυπηρετήσουν, κωδικούς προστασίας κ.λπ. Χωρίς τη κάρτα αυτή, ένα κινητό GSM είναι ουσιαστικά «νεκρό». [10]

2.3.1 Δίκτυα 2.5G

Πριν βγει σε εφαρμογή η τεχνολογία της τρίτης γενιάς (3G), 2 επιμέρους εξελιγμένες τεχνολογίες ακολούθησαν τη πορεία της δεύτερης γενιάς (2G). Η μία από αυτές, η 2,5G η οποία ενσωματώνει στο ήδη προϋπάρχον σύστημα το **GPRS** (General Packet Radio Service), μια τεχνολογία **μεταγωγής πακέτων** (Packet Switching), η οποία χρησιμοποιεί τους πόρους του δικτύου πιο αποδοτικά, καθώς οι χρονοθυρίδες δεσμεύονται και αποδεσμεύονται μόνο κατά την ώρα διεκπεραίωσης μιας κλήσης (δηλαδή μόνο όταν χρειάζεται), σε αντίθεση με την τεχνολογία CSD. Επίσης ένας χρήστης μπορεί να δεσμευτεί και τις 8 θυρίδες, πετυχαίνοντας ρυθμό μετάδοσης έως και 171,2 Kbps ($8 \times 21,4 = 171,2 \text{ Kbps}$).

Η ενσωμάτωση του GPRS εγκαθιστεί μια νέα κλάση κόμβων δικτύου για την υποστήριξη της τεχνολογίας αυτής πάνω στο GSM δίκτυο. Αυτοί είναι:

- **SGSN** (Serving GPRS Support Node)

Υπεύθυνη για την παράδοση των πακέτων από και προς τους τερματικούς χρήστες που βρίσκονται μέσα στη περιοχή εξυπηρέτησής του. Βρίσκεται στο ίδιο ιεραρχικό επίπεδο με τον MSC/VLR και ουσιαστικά κάνει ότι κάνουν και αυτοί για το δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος. Συγκεκριμένα: [12]

- Δρομολόγηση και μεταγωγή πακέτων από και προς τους κινητούς σταθμούς που βρίσκονται στη περιοχή εξυπηρέτησης. (Packet routing and switching)
- Διαχείριση της συνόδου (Session management)
- Διαχείριση της μεταφορσιμότητας των κινητών σταθμών (Mobility management)
- Διαχείριση της λογικής ζεύξης (Logical link management)
- Κρυπτογράφηση και αυθεντικοποίηση (Cipherring and Authentication)



- Εξαγωγή δεδομένων χρέωσης για κάθε κινητό σταθμό, που σχετίζονται με τη χρήση των ασύρματων πόρων του δικτύου.

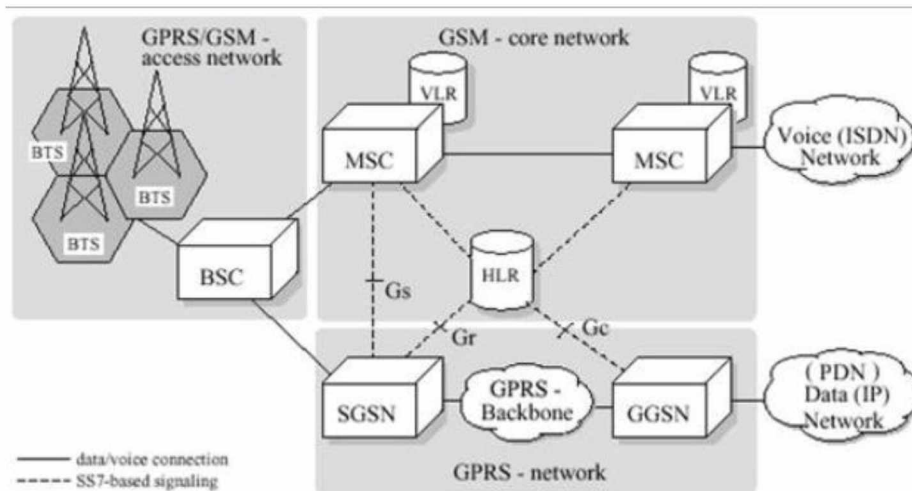
- **GGSN (Gateway GPRS Support Node)**

Υπεύθυνος για τη διασύνδεση του GPRS δικτύου με τα εξωτερικά δίκτυα μεταφοράς πακέτων. Μετατρέπει τα πακέτα που έρχονται από το SGSN στο κατάλληλο πρωτόκολλο πακέτου δεδομένων **Packet Data Protocol (IP ή X.25)**, και τα στέλνει στο εξωτερικό δίκτυο. Αντίστροφα ο GGSN μετατρέπει τις PDP διευθύνσεις σε GSM διευθύνσεις και μεταφέρεται στον αντίστοιχο SGSN.

Συγκεκριμένα : [12]

 - Παροχή διεπαφής με τα εξωτερικά δίκτυα δεδομένων (Μόνο τύπου IP ή X.25). Σχετικά με τη μεταγωγή πακέτων σε IP δίκτυα, ο GGSN έχει λειτουργίες ISP (Internet Service Provider) υπηρεσιών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι εξωτερικοί κόμβοι να τον βλέπουν ως δρομολογητή που κάνει μεταγωγή πακέτων για το δικό του χώρο IP διευθύνσεων (τερματικοί χρήστες).
 - Διαχείριση GPRS συνόδου (GPRS session management).
 - Αντιστοίχιση συνδρομητών στους σωστούς SGSN's.
 - Εξαγωγή δεδομένων χρέωσης που σχετίζονται με τη χρήση πόρων των εξωτερικών δικτύων.

Ένα GPRS δίκτυο έχει έναν GGSN που διασυνδέει το εξωτερικό δίκτυο και πολλούς SGSN's που μεταφέρουν την πληροφορία στα τερματικά. Όμως ένας SGSN μπορεί να στείλει σε πολλούς GGSN, αν θέλει να στείλει μια πληροφορία σε πολλά διαφορετικά δίκτυα.



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική GPRS [S3]

Η γρηγορότερη μετάδοση των δεδομένων (ταχύτητες έως) λοιπόν με τη τεχνολογία του GPRS έφερε νέες υπηρεσίες στο προσκήνιο, οι οποίες περιλαμβάνουν ακόμα και υπηρεσίες διαδικτύου. Κάποιες απο αυτές είναι:

- MMS (Multimedia Messaging Service)
- WWW (World Wide Web) (Περιορισμένης έκτασης browsing)
- FTP (File Transfer Protocol)
- E-mail
- Telnet (Πρόσβαση σε απομακρυσμένα τερματικά)
- Video
- Εφαρμογές RTTI (Real Time Traffic Information)
- Εφαρμογές Τηλεματικής (π.χ. μεταφορά χρημάτων)

2.3.2 Δίκτυα 2,75G

Αποτελεί μια μεταβατική τεχνολογία πριν τα συστήματα τρίτης γενιάς (3G), η οποία επιτρέπει στα δίκτυα 2G να έχουν τριπλάσια χωρητικότητα δικτύου με υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης για την παροχή υπηρεσιών 3G, όπως video streaming, πραγματικό browsing κ.λπ. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται **EDGE** (Enhanced Data rates for GSM Evolution) και είναι μία αναβάθμιση του GPRS (2.5G) (δε μπορεί δηλαδή να λειτουργήσει αυτόνομα.) η οποία στηρίζεται αποκλειστικά στον προϋπάρχον εξοπλισμό και τη βελτίωση αυτού πάνω στη διαμόρφωση των δεδομένων.



Ενώ το GPRS στο GSM δίκτυο χρησιμοποιεί τη μέθοδο GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying) για την εκθετική μείωση των λαθών κατά τη μεταφορά πληροφορίας, το EDGE χρησιμοποιεί μια άλλη μέθοδο, αυτή του 8PSK (8 Phase Shift Keying), επιτρέποντας τη μεταφορά 3 bit σε κάθε μοναδιαίο παλμό εν αντίθεση των GPRS που επιτρέπουν 1 bit. Με αυτή την αλλαγή, επιτεύχθηκαν στο δίκτυο ταχύτητες 384Kbps ή και 768Kbps, με στόχο να φτάσει έως και 2Mbps. Επίσης το EDGE έχει την ικανότητα αναμετάδοσης ενός πακέτου πληροφοριών που δεν κωδικοποιήθηκε σωστά, με ένα πιο ισχυρό, κάτι που στο GPRS δε υποστηριζόταν (ίδια κωδικοποίηση πάντα) με αποτέλεσμα τις αποσυνδέσεις και τα προβλήματα, ιδιαίτερα σε περιοχές με αυξημένη ζήτηση. [10&12]

2.4 Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Τρίτης Γενιάς (3G)

Η τρίτη γενιά στα ασύρματα τηλεπικοινωνιακά συστήματα (3G), εμφανίστηκε στα τέλη του 90' (1998) και αποτελεί την εξέλιξη των 2G δικτύων. Φέρει σημαντικά αυξημένες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων (2Mbps), προσφέροντας στο χρήστη υψηλές παροχές ποιότητας υπηρεσιών **QoS** (Quality of Service), όπως εφαρμογές

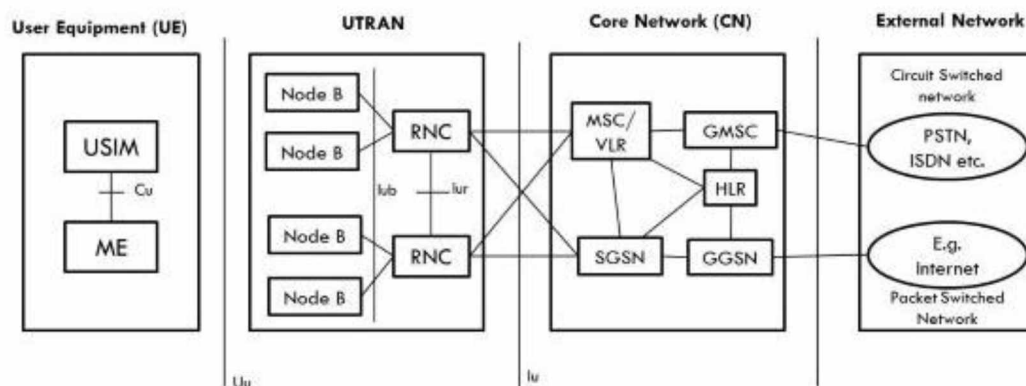
πραγματικού χρόνου (τηλεδιάσκεψη, streaming), πλοήγηση στο Internet, υπηρεσίες επικοινωνίας VoIP (Voice over IP) κ.λπ. Η τεχνολογία που διαμορφώνει τα δίκτυα τρίτης γενιάς, ονομάζεται **UMTS** (Universal Mobile Telecommunication System) και αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία στα ασύρματα δίκτυα έως σήμερα. Χρησιμοποιείται κυρίως στην Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Κίνα (περιοχές που είχαν ήδη προεγκατεστημένες τεχνολογίες GSM) και βασικός της στόχος είναι η παροχή υπηρεσιών οπουδήποτε. Αυτό σημαίνει ότι ο χρήστης μπορεί να έχει υπηρεσίες τηλεφώνου και Internet στο κινητό του σε οποιοδήποτε γεωγραφικό μέρος και αν πάει.

Το UMTS χρησιμοποιεί ευρυζωνική πολλαπλή πρόσβαση καναλιού W-CDMA (Wideband – Code Division Multiple Access, εξέλιξη της CDMA) το οποίο έχει επηρεαστεί από το τρόπο λειτουργίας του GSM και υποστηρίζει ρυθμό μετάδοσης 384 Kbps και βασίζεται στη μεταφορά πακέτων (Packet Switching). Με τα χρόνια, αναπτύχθηκαν κατάλληλα πρότυπα όπως είναι το HSPA (High Speed Packet Access) το οποίο βελτιώνει ακόμα περισσότερο το W-CDMA, φτάνοντας θεωρητικά ταχύτητες downlink έως και 168,8Mbps.



Η υποδομή ενός προτύπου UMTS, φαντάζει αρκετά περίπλοκη, καθώς περιλαμβάνει το δίκτυο πυρήνα CN (Core Network), το δίκτυο ραδιοσυχνότητας UTRAN (UMTS Terrestrial Radio Access Network), και τον εξοπλισμό του χρήστη UE (τερματικό με ενσωματωμένη SIM card). Συγκεκριμένα:

- **Δίκτυο κορμού ή πυρήνα (Core Network):** είναι υπεύθυνο για τη μεταγωγή και τη δρομολόγηση των συνδέσεων προς τα εξωτερικά δίκτυα κλήσεων και δεδομένων. Η αρχιτεκτονική του παραμένει ίδια με αυτή του GPRS, καθώς περιέχει:
 - Καταχωρητή θέσης Συνδρομητών Δικτύου. (HLR)
 - Κινητό κέντρο μεταγωγής (MSC)
 - Καταχωρητή θέσης επισκεπτών (VLR)
 - Πύλη κέντρου κινητής μεταγωγής (GMSC)
 - Κομβο υποστήριξης πελατών (GPRS GGSN)
 - Κομβο υποστήριξης εξυπηρέτησης (GPRS SGSN)
- **Δίκτυο Ραδιοσυχνότητας UTRAN:** αποτελείται από τον κόμβο B (NodeB) και τον ελεγκτή δικτύου RNC (Radio Network Controller). Ο RNC έχει τον ίδιο ρόλο με τον BSC (Base Station Controller) στα συστήματα 2^{ης} γενιάς καθώς είναι το σημείο πρόσβασης για όλες τις υπηρεσίες που παρέχει το UTRAN στο δίκτυο πυρήνα, όπως τη διαχείριση των συνδέσεων με ένα τερματικό. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι RNC συνδέονται απευθείας μεταξύ τους εν αντιθέση των BSC.
- **Εξοπλισμός του Χρήστη (User Equipment):** αποτελεί τη τερματική συσκευή του χρήστη (κινητό τηλέφωνο, φορητός υπολογιστής, κ.α.) **ME** (Mobile Equipment) και τη UMTS SIM card (**USIM**), η οποία περιέχει στοιχεία ταυτοποίησης του χρήστη, μαζί με αλγορίθμους πιστοποίησης και κρυπτογράφησης.



Σχήμα 8: Αρχιτεκτονική UMTS [S4]

Σε άλλες χώρες όπως είναι η Βόρεια Αμερική και η Νότια Κορέα, χρησιμοποιούσαν διαφορετικό πρότυπο πάνω στα 3G δίκτυα, το **CDMA2000**, το οποίο πρωτοεμφανίστηκε το 2002. Το πρότυπο αυτό βασιζόταν πάνω στο πρότυπο 2^{ης} γενιάς, το IS-95.

Σήμερα η κυρίαρχη προτεινόμενη αρχιτεκτονική για το UMTS είναι αυτή που προτείνεται από το 3GPP (3rd Gen. Partnership Project) για **IP-based** δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Οι βασικές λειτουργικές οντότητες είναι δανεισμένες από το GPRS ενώ υπάρχουν και οι απαραίτητες πύλες (gateways) προς άλλα δίκτυα, όπως το Internet, σταθερή τηλεφωνία PSTN και τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς. [10]

2.4.1 Δίκτυα 3.5G

Οι καινούργιες υπηρεσίες πάνω στα ασύρματα δίκτυα 3^{ης} γενιάς απαιτούν υψηλότερο επίπεδο ποιότητας υπηρεσίας ως προς τη καθυστέρηση, το ρυθμό μετάδοσης, την χωρητικότητα και τη κάλυψη. Ως εξέλιξη της προηγμένης τρίτης γενιάς (3G), το 3.5G έρχεται για να φέρει μεγαλύτερη μετάδοση δεδομένων έως και 5 φορές σε σχέση με το UMTS (θεωρητικά έως 14,4Mbps σε κατερχόμενη ζεύξη). Το πρότυπο που χρησιμοποιείται στα δίκτυα αυτά, είναι το HSPA (High Speed Packet Access) το οποίο είναι βασισμένο στη τεχνολογία W-CDMA και χρησιμοποιεί δύο πρωτόκολλα, ένα για την ανερχόμενη ζεύξη **HSUPA** (High Speed Uplink Packet Access) και ένα για την κατερχόμενη **HSDPA** (High Speed Downlink Packet Access). Τα πρωτόκολλα αυτά παρέχουν βελτιωμένες αποδόσεις πάνω στα δίκτυα, μέσα από τη χρήση βελτιωμένων σχημάτων κωδικοποίησης αλλά και τον επανακαθορισμό των πρωτοκόλλων με τα



οποία επικοινωνούν οι σταθμοί βάσης και τα τερματικά. Έτσι, έχουμε καλύτερη χρήση του εύρους ζώνης του W-CDMA και καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων πάνω σε αυτά καθώς αυξάνει τη χωρητικότητα της κατερχόμενης ζεύξης κατά 5 φορές περισσότερο και της ανερχόμενης κατά δύο φορές (14,4Mbps downlink & 5,8Mbps uplink). Συγκεκριμένα:

- **HSDPA** Βασίζεται κυρίως σε νέες τεχνικές διαμόρφωσης και κωδικοποίησης. Χρησιμοποιεί ένα νέο κανάλι HS-DSCH (High Speed Downlink Shared Channel) το οποίο εφαρμόζει: [10]

➤ **Προσαρμοστική Διαμόρφωση και Κωδικοποίηση AMC** (Adaptive Modulation and Coding) : Οι συνθήκες που επικρατούν στο κανάλι και συγκεκριμένα η τιμή του σηματοθορυβικού λόγου SNR (Signal to Noise Ratio), αποτελούν κριτήριο χρήσης του κατάλληλου σχήματος διαμόρφωσης και κωδικοποίησης για τα δεδομένα για τη μέγιστη δυνατή απόδοση.

➤ **Ταχεία Δρομολόγηση κίνησης:** Ο αλγόριθμος επιλέγει τον αριθμό χρηστών που θα αποστείλει πακέτα δεδομένων, ανάλογα με το SNR του κάθε χρήστη, το είδος της συνόδου και τον αριθμό των πακέτων που είναι σε αναμονή. Κάθε αλγόριθμος δρομολόγησης κίνησης αξιολογεί με διαφορετική βαρύτητα τα παραπάνω δεδομένα και ισορροπεί μεταξύ της επίτευξης υψηλής απόδοσης για το δίκτυο και της ικανοποίησης των απαιτήσεων των χρηστών.

➤ **Ταχεία Επανεκπομπή Πακέτων HARQ** (Hybrid Automatic Repeat Request): Τα δεδομένα διατηρούνται στον σταθμό βάσης. Αν το τερματικό δεν αποστείλει επιβεβαίωση ορθής παράδοσης **ACK** (Acknowledgment), για το λαμβανόμενο πακέτο, τότε αυτό θεωρείται χαμένο. Σε αυτή την περίπτωση, τα δεδομένα επανεκπέμπονται και ο χρήστης συνδυάζει όλες τις λήψεις των συγκεκριμένων δεδομένων (soft combining of multiple transmissions), αυξάνοντας τις πιθανότητες να αποκωδικοποιήσει επιτυχώς το μήνυμα.

Εξέλιξη της HSDPA, αποτελεί η **HSDPA+** η οποία διαμορφώνει το φάσμα συχνοτήτων με μία νέα τεχνική, την **64QAM** (64bit Quadrature Amplitude Modulation). Με την εισαγωγή νέων κεραιών τεχνολογίας **MIMO** (Multiple Input Multiple Output) τόσο στο πομπό όσο και στο δέκτη, το νέο πρότυπο, εγγυάται ταχύτητες έως και 42Mbps (downlink).



- **HSUPA** Βασίζεται σε τεχνικές προσαρμογής της ζεύξης, παρόμοιες με αυτές του HSDPA, για να επιτύχει υψηλότερες αποδόσεις όσο αφορά τη ταχύτητα (εως 5,8Mbps) και το φάσμα, και μικρότερες καθυστερήσεις, χρησιμοποιώντας ένα κανάλι **E-DCH** (Enhanced-Dedicated Channel).

Το HSUPA οδηγεί στην αύξηση περίπου 85% στη γενική ρυθμαπόδοση άνω ζεύξης (uplink) και ένα κέρδος 50% στη ρυθμαπόδοση των χρηστών.[10]

2.5 Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών Τέταρτης Γενιάς (4G)

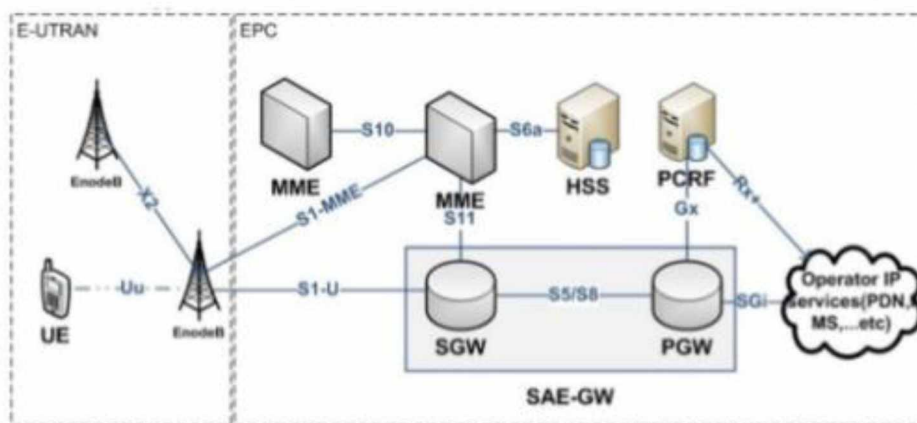
Τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G) έρχονται για να αυξήσουν ακόμα περισσότερο τις ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, να μειώσουν ακόμα περισσότερο τις καθυστερήσεις και να ευρύνουν ακόμα περισσότερο την χωρητικότητα του δικτύου, καθώς ολοένα και περισσότεροι άνθρωποι αρχίζουν να χρησιμοποιούν υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας. Το 3GPP έδωσε τον όρο LTE (Long Term Evolution) για το σύγχρονο πρότυπο που βασίζεται στις παλιές τεχνολογίες δεύτερης (GSM/EDGE) και τρίτης γενιάς (UMTS/HSPA). Οι προδιαγραφές αρχικά όριζαν ρυθμό μετάδοσης σε κατερχόμενη ζεύξη 100Mbps και σε ανερχόμενη 50Mbps με μέγιστη καθυστέρηση 10ms και μεταβλητό εύρος ζώνης έως 20MHz. Ωστόσο οι προδιαγραφές αυτές δε κάλυπταν τις απαιτήσεις ενός 4G δικτύου καθώς ένα πρότυπο LTE, πρέπει να δίνει ταχύτητες downlink έως 1Gbps σε στάσιμους ή αργά κινούμενους χρήστες και 100Mbps σε χρήστες κινούμενους με υψηλή ταχύτητα. Αυτό επιτεύχθηκε μετά την έκδοση 10 (release 10) του 3GPP, ικανοποιώντας πλήρως τις προδιαγραφές χαρακτηρίζοντας το ως «true 4G».

Ενώ τα δίκτυα LTE ενσωματώνουν τεχνολογία μεταγωγής μόνο πακέτου, θεωρούνται και αυτά υβριδικά, καθώς χρησιμοποιούν, όπως και η προηγούμενη γενιά, υπηρεσίες μεταγωγής κυκλώματος (Circuit Switching) και μεταγωγής πακέτου (Packet Switching), καθώς τα περισσότερα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας χρησιμοποιούν ακόμα αυτές τις υπηρεσίες αποτρέποντας την αξιοποίηση της τεχνολογίας VoIP (Voice over IP), όπου τα LTE δίκτυα μπορούν να επιτύξουν μέγιστες αποδόσεις στο σύστημα.

	3G Δίκτυα	4G Δίκτυα
Μετάδοση δεδομένων	384Kbps → 2Mbps	20→100Mbps
Εύρος συχνοτήτων	1.8 έως 2,4 GHz	2 έως 8 GHz
Χωρητικότητα	5 MHz	100 MHz
Τεχνολογία πρόσβασης καναλιού	W-CDMA, CDMA2000	OFDMA, MC-CDMA
Μεταγωγή (Switching)	Δίκτυα μεταγωγής κυκλώματος και πακέτου	Δίκτυα μόνο πακέτου IP
Internet Protocol (IP)	IPv4.0,IPv5.0,IPv6.0	IPv6.0

Πίνακας 1: Σύγκριση τεχνολογιών 3G - 4G

Η αρχιτεκτονική των δικτύων LTE αποτελούν ένα εξελιγμένο δίκτυο αυτού του UMTS, το οποίο περιλαμβάνει ένα εξελιγμένο δίκτυο ραδιοσυχνοτήτων **E-UTRAN** (EVOLVED – UMTS Radio Access Network) και ένα εξελιγμένο πυρήνα μεταγωγής πακέτων **EPC** (Evolved Packet Core). Οι σταθμοί βάσης (BTS) παραμένουν ίδιοι, απλά αλλάζει η ονομασία τους σε eNB (evolved NodeB) για να διακρίνεται από τους NodeB της προηγούμενης γενιάς. Η σύνδεση τους με τον EPC γίνονται μέσω της μονάδας MME (Mobility Management Entity), η οποία είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση και διαχείριση των μηνυμάτων ελέγχου του δικτύου, και της S-GW (Serving Gateway), η οποία είναι η είσοδος-έξοδος των δεδομένων των χρηστών. Η πύλη αυτή συνδέεται με τη σειρά της με τη P-GW (Packet data network Gateway), η οποία αλληλεπιδρά με εξωτερικά δίκτυα όπως της Σταθερή Τηλεφωνία ή του Διαδικτύου.



Σχήμα 9: Αρχιτεκτονική ενός LTE δικτύου. [S5]

2.5.1 Διεπαφές πάνω στα συστήματα LTE.

Οι διεπαφές που περιλαμβάνονται σε ένα σύστημα τέταρτης γενιάς, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, διακρίνονται ως εξής:



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

- **Uu:** Ραδιοδιεπαφή (air interface) που συνδέει το τερματικό του χρήστη UE με το σταθμό βάσης eNB. Ο ρόλος της διεπαφής αυτής είναι η αποστολή ή λήψη δεδομένων απο και προς τους χρήστες απο το σταθμό βάσης.
- **X2:** Διεπαφή που συνδέει δύο γειτονικούς σταθμούς βάσης eNB. Ο ρόλος της είναι η μεταφορά δεδομένων ελέγχου και δεδομένων των χρηστών απο το ένα σταθμό βάσης στον άλλον. Για να το πετύχει αυτό χρησιμοποιεί δύο επίπεδα επικοινωνίας, το **X2-CP** (X2-Control Plane), το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου μεταξύ των σταθμών βάσης και το **X2-UP** (X2-User Plane), το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων των χρηστών. Η διεπαφή αυτή βασίζεται εξ' ολοκλήρου στο πρωτόκολλο IP.
- **S1:** Διεπαφή που συνδέει το eNB με τον πυρήνα του δικτύου EPC. Όπως και στη διεπαφή X2, χρησιμοποιείται τόσο για τη μεταφορά δεδομένων χρήστη όσο και για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου μεταξύ E-UTRAN και EPC. Χρησιμοποιεί επίσης δύο επίπεδα μεταφορών πληροφορίας, το S1-CP για τη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του σταθμού βάσης και του Φορέα Διαχείρισης Κινητικότητας **MME** (Mobility Management Entity), και την S1-UP για τη ανταλλαγή δεδομένων χρήστη απο το σταθμό βάσης στη πύλη S-GW, χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο IP.
- **S11:** Διεπαφή που συνδέει τις μονάδες MME και S-GW. Χρησιμοποιείται καθαρά για διαχειριστικούς λόγους (Διαχείρισης κινητότητας και κομιστών).
- **S5:** Διεπαφή που συνδέει τις πύλες S-GW και P-GW. Χρησιμοποιείται όπως και οι διεπαφές X2 και S1, και για ανταλλαγή δεδομένων ελέγχου και για ανταλλαγή δεδομένων χρηστών μεταξύ των πυλών. Η πύλη P-GW παρέχει συνδεσιμότητα σε μια σειρά απο υπηρεσίες IP αποτελώντας τη «Κύρια Διεπαφή» μεταφοράς δεδομένων χρήστη.
- **S8:** Διεπαφή παρόμοια με τη S5. Συνδέει μια πύλη S-GW με μια P-GW η οποία ανήκει σε άλλο δίκτυο PLMN (Public Land Mobile Network).



- **S6a:** Διεπαφή που συνδέει έναν MME (Mobility Management Entity) και έναν HSS (Home Subscriber Server). Χρησιμοποιείται για έλεγχο ταυτότητας, για την αποθήκευση πληροφοριών θέσης και παροχή υπηρεσιών του συνδρομητή.
- **SGi:** Διεπαφή σύνδεσης του EPC με τα εξωτερικά δίκτυα.

2.5.2 Εύρος Ζώνης και τρόποι Αμφίδρομης Επικοινωνίας

Το εύρος ζώνης των καναλιών στα LTE συστήματα κυμαίνεται από 1,4 έως 20MHz. Κάθε κανάλι έχει έναν συγκεκριμένο αριθμό ομάδων πόρων (resource blocks), τα οποία αποτελούν την βασική μονάδα μέτρησης των συχνοτήτων στις ραδιοδιεπαφές (μετρούνται είτε σε ομάδες πόρων είτε σε υποφέρουσες). Σε κάθε ομάδα πόρων αντιστοιχούν 12 υπο-φέρουσες συχνότητες (subcarriers) με εύρος ζώνης 15KHz η κάθε μία. Γι' αυτό το λόγο το συνολικό εύρος ζώνης δίνεται από το τύπο:

$$15 \times 12 \times \text{αριθμός ομάδων πόρων καναλιού} \quad (2.1)$$

Στη κατερχόμενη ζεύξη τα δίκτυα LTE χρησιμοποιούν πολλαπλή πρόσβαση ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας **OFDMA** (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), ενώ για την ανερχόμενη ζεύξη χρησιμοποιείται η πολλαπλή πρόσβαση καναλιού με διαίρεση συχνότητας μιας υποφέρουσας **SC-FDMA** (Single Carrier – Frequency Division Multiple Access). Σημειώνεται ότι η ραδιοσυχνότητα της ανερχόμενης ζεύξης είναι (σχεδόν πάντα) μικρότερη από τη συχνότητα κατερχόμενης καθώς εξοικονομείται έτσι ενέργεια στα κινητά τερματικά.

Στα κανάλια κατερχόμενης ζεύξης υπάρχει μια επιπλέον υποφέρουσα 15KHz στο κέντρο των υπολοίπων η οποία ονομάζεται μηδενική υποφέρουσα στην οποία δε γίνεται καμία μετάδοση. Γι' αυτό εάν έχουμε δέκα (10) ομάδες πόρων, τότε ο συνολικός αριθμός των υποφέρουσων θα είναι εκατόν είκοσι ένα (121) και όχι εκατόν είκοσι (120).

Για λόγους φασματικής προστασίας (guard band) λοιπόν, το συνολικό εύρος ζώνης των υποφέρουσων θα πρέπει να είναι μικρότερο από το εύρος ζώνης του κάθε καναλιού, για να καλύπτεται το ενδεχόμενο εξασθένησης (roll-off). [4]



Το πρότυπο LTE χρησιμοποιεί τρεις τρόπους αμφίδρομης επικοινωνίας, τη συχνοδιαιρετική **FDD** (Frequency Division Duplexing), την χρονοδιαιρετική **TDD** (Time Division Duplexing) και την **ημιαμφίδρομη FDD** (Half Duplex FDD). Συγκεκριμένα:

- **Συχνοδιαιρετική FDD:** Χρησιμοποιούνται δύο φέρουσες συχνότητες, μια για την ανερχόμενη και μια για την κατερχόμενη ζεύξη. Η εκπομπή της ραδιοσυχνότητας γίνεται ταυτόχρονα καθώς ο χρήστης (συνήθως) εκπέμπει μια χαμηλή ραδιοσυχνότητα προς το σταθμό βάσης, και ο σταθμός μια υψηλή ραδιοσυχνότητα προς το χρήστη. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συμμετρικές ζεύξεις, δηλαδή όταν η απαίτηση σε χωρητικότητα των δεδομένων που στέλνει και λαμβάνει ο χρήστης είναι της ίδιας τάξης. Έτσι απασχολεί συνεχώς το κανάλι επιτυγχάνοντας αποδοτική αξιοποίηση της σύνδεσης. Η FDD, επίσης, δεν έχει προβλήματα συγχρονισμού, καθώς χρησιμοποιούνται, όπως προαναφέρθηκε, δύο φέρουσες συχνότητες.
- **Χρονοδιαιρετική TDD:** Χρησιμοποιεί μια φέρουσα ραδιοσυχνότητα για την λήψη και αποστολή δεδομένων τόσο στην κατερχόμενη όσο και στην ανερχόμενη ζεύξη. Η εκπομπή της ραδιοσυχνότητας σε αυτή τη περίπτωση δε μπορεί να γίνει ταυτόχρονα καθώς χρησιμοποιούν την ίδια, το οποίο θέτει επίσης προβλήματα συγχρονισμού. Χρησιμοποιείται κυρίως σε ασύμμετρες ζεύξεις, δηλαδή όταν τα δεδομένα που στέλνει και λαμβάνει ο χρήστης είναι διαφορετικής τάξης. Γνωρίζοντας της απαιτήσεις σε χωρητικότητα, το κανάλι μπορεί να προσαρμόσει τις ζεύξεις (ανερχόμενη και κατερχόμενη) καταλλήλως ούτως ώστε να το απασχολεί (σχεδόν) πλήρως. Πλεονέκτημα αυτής της επικοινωνίας είναι ότι δε χρειάζεται διπλέκτη (duplexer) σε αντίθεση με την συχνοδιαιρετική επικοινωνία που είναι απαραίτητη.
- **Ημιαμφίδρομη FDD:** Ειδική περίπτωση της FDD όπου ο σταθμός βάσης είναι ο μόνος που χρησιμοποιεί διπλέκτη για την επικοινωνία (ταυτόχρονα και πομπός και δέκτης) και οι χρήστες χρησιμοποιούν τα κανάλια επικοινωνίας με εφαρμογή της χρονικής πολυπλεξίας.



2.5.3 Δίκτυα 4.5G

Τα νέα δίκτυα 4.5G (ή 4.5G Pro ή Pre-5G), αποτελούν τον 13^ο και 14^ο release της τέταρτης γενιάς, φέροντας υψηλότερες ταχύτητες μετάδοσης (>3Gbps). Χρησιμοποιεί συσσωμάτωση φορέα (**32-carrier aggregation**) για να αυξήσει τους ρυθμούς των δεδομένων ανά χρήστη και την νέα τεχνολογία **LAA** (License Assisted Access) για την κοινή χρήση αδειοδοτούμενου και μη φάσματος. Επίσης εισάγει αρκετές νέες τεχνολογίες που σχετίζονται με τα δίκτυα πέμπτης γενιάς (5G), όπως τετραγωνικής διατομής διαμόρφωση **256-QAM** (Quadrature Amplitude Modulation), μαζικές κεραιές **MIMO 4x4** και **NB-IoT** (Narrowband Internet of Things), οι οποίες θα κάνουν πιο εύκολη την μετάβαση των δικτύων τέταρτης γενιάς στην πέμπτη. Οι ταχύτητες στην κατερχόμενη ζεύξη έχουν δεκαπλασιαστεί (10x) ενώ για την ανερχόμενη έχουν τριπλασιαστεί (3x) κάνοντάς το ένα ιδανικό δίκτυο για τα κρίσιμα δεδομένα και εφαρμογές (data intensive & critical applications) όπως κινητών εφαρμογών υψηλής ταχύτητας (in-vehicle applications) ή ιστοσελιδών ταχείας πρόσβασης (rapid site). Επίσης σημαντικό πλεονέκτημα του νέου προτύπου είναι η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας (εως 10x φορές) στις κινητές συσκευές χάρη στις νέες διαμορφώσεις και της χρήσης φάσματος χαμηλής συχνότητας (κυρίως για τα τερματικά).

2.5.4 Υφιστάμενες υπηρεσίες LTE

Η τέταρτη γενιά χάρη στις πολύ υψηλές ταχύτητες που προσφέρει, ανοίγει το δρόμο στη βελτιστοποίηση προϋπάρχουσων υπηρεσιών αλλά και σε νέες υπηρεσίες που λαμβάνουν ήδη χώρα όπως είναι η υψηλής ανάλυσης βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Κάποιες από αυτές τις υπηρεσίες είναι :

- **Τηλεϊατρική:** Γρήγορη πρόσβαση σε ιστορικό ασθενών, με σεβασμό στα προσωπικά τους δεδομένα, για την απομακρυσμένη παρακολούθηση του σε απρόσιτα μέρη και μη καθώς και τηλεδιάσκεψης των ασθενών με γιατρούς. Επίσης γίνεται πιο εύκολη η μετάδοση πληροφοριών ιστορικού ασθενών από το ένα νοσοκομείο στο άλλο.
- **Τηλε-παρουσία:** Εξέλιξη των σημερινών τηλεδιασκέψεων. Αποτελούν υπηρεσίες εικονικής πραγματικότητας όπου κάποιος θα μπορεί να βρίσκεται



σε πραγματικό χρόνο σε εικονικές συνδεδριάσεις. Τέτοιες υπηρεσίες απαιτούν μεγάλες ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων (>100Mbps) καθώς και αποδοτικές τεχνικές συμπίεσης.

- **Εργασία εξ' αποστάσεως:** Μέσω πολυμεσικών εφαρμογών και των μεγάλων ταχυτήτων του δικτύου, κάνει εφικτό την εργασία σε απομακρυσμένες περιοχές εκτός εργασιακού χώρου ή απρόσιτων περιοχών. Επίσης επιτυγχάνεται πολύ πιο εύκολα υπηρεσίες online βοήθειας.

- **Εικονική πλοήγηση (virtual navigation):** Απομακρυσμένη βάση δεδομένων στέλνει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες σχετικά με μία γεωγραφική περιοχή (αναπαράσταση δρόμων, τοπογραφίες κ.λπ.) σε μία κινητή συσκευή. Αυτό θα βοηθάει στην άμεση πλοήγηση ενός ανθρώπου, χρησιμοποιώντας πάντα τη βέλτιστη διαδρομή, δρόμους που έχουν συμφόρηση κατά τη διάρκεια της ημέρα, αξιοθέατα και πληροφορίες σχετικά με μία περιοχή και εναλλακτικούς δρόμους σε περίπτωση φυσικών και άλλων καταστροφών. Ένα τέτοιο διαδεδομένο πρόγραμμα σήμερα αποτελεί η εφαρμογή του **Google Maps**.

- **Ασφάλεια δεδομένων:** Η ασφάλεια των εφαρμογών και των απομακρυσμένων συναλλαγών αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα των δικτύων των μελλοντικών γενιών. Η εξασφάλιση της ακεραιότητας των μεταφερόμενων δεδομένων είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που θα επιτρέψει τον πολλαπλασιασμό των τραπζικών εργασιών και των εφαρμοσμένων ηλεκτρονικών πληρωμών μέσω των ασύρματων δικτύων. [13]

- **Σταθμός πληροφορίας (infostation):** Η γρήγορη λήψη πληροφοριών και πολυμέσων σε κινητά μεταφορικά μέσα (αυτοκίνητο, λεοφορείο κ.λπ.) σε οποιαδήποτε διαδρομή και αν ακολουθήσουν.

- **Εφαρμογές τηλεγεωδαισίας (tele-geoprocessing):** Ο συνδυασμός συστημάτων γεωγραφικής πληροφορίας GIS (Geographic Information System) και συστημάτων παγκόσμιας πλοήγησης GPS (Global Positioning



System) με συνδυασμό ασύρματων κινητών συστημάτων υψηλής χωρητικότητας θα κάνει εφικτές εφαρμογές τηλεγεωδαισίας. [13]

- **Εφαρμογές διαχείρισης κρίσεων :** Υπηρεσία όπου αποστέλονται πληροφορίες στο χρήστη σχετικά με φυσικές και άλλες καταστροφές σε μία γεωγραφική περιοχή. Επίσης χάρη στην μεγάλη χωρητικότητα των δικτύων 4G, τα ασύρματα δίκτυα μπορούν να αντικαταστήθουν πολύ πιο γρήγορα από τα ενσύρματα δίκτυα που θα απαιτούσαν μέρες μετά από μία φυσική καταστροφή, καλύπτοντας πολύ πιο γρήγορα το «τηλεπικοινωνιακό κενό».
- **Τηλεκπαίδευση:** Εκπαίδευση εξ'αποστάσεως με χρήση πολυμεσικών υπηρεσιών σε δυσπρόσιτες περιοχές όπου η ενσύρματη σύνδεση στο Διαδίκτυο δεν αποτελεί λύση.
- **Κινητά δίκτυα υπολογιστών:** Κατα ανάλογο τρόπο με τις ενσύρματες τηλεπικοινωνίες, τα κινητά δίκτυα υπολογιστών θα διευκολύνουν οικονομικές συναλλαγές, επιχειρηματικές πράξεις και επιστημονική συνεργασία απο απόσταση. [13]
- **Ευφυείς αγορές:** Αυτόματη λήψη πληροφοριών ενός επισκεπτόμενου καταστήματος με πληροφορίες σχετικά με τα προϊόντα που είναι σε έκπτωση, καινούργιες παραλαβές κ.λπ.

2.6 Μια ματιά στα συστήματα κινητών επικοινωνιών πέμπτης γενιάς (5G)

Έχοντας φτάσει ήδη σε ένα πολύ αποδοτικό αποτέλεσμα με τα δίκτυα 4^{ης} γενιάς, και τις επεκτάσεις τους, στα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών, τα νέα δίκτυα 5^{ης} γενιάς (5G NR, New Radio) έρχονται για να καλύψουν και τις πιο “κρίσιμες περιοχές” αυξάνοντας ακόμα πιο πολύ τις ταχύτητες σύνδεσης, την χωρητικότητα και την απόδοση του συστήματος και εκμηδενίζοντας σχεδόν τους χρόνους αναμονής. Μπορεί να χρησιμοποιεί είτε συχνότητες χαμηλού εύρους (**Frequency Range 1, FR1**) μικρότερη

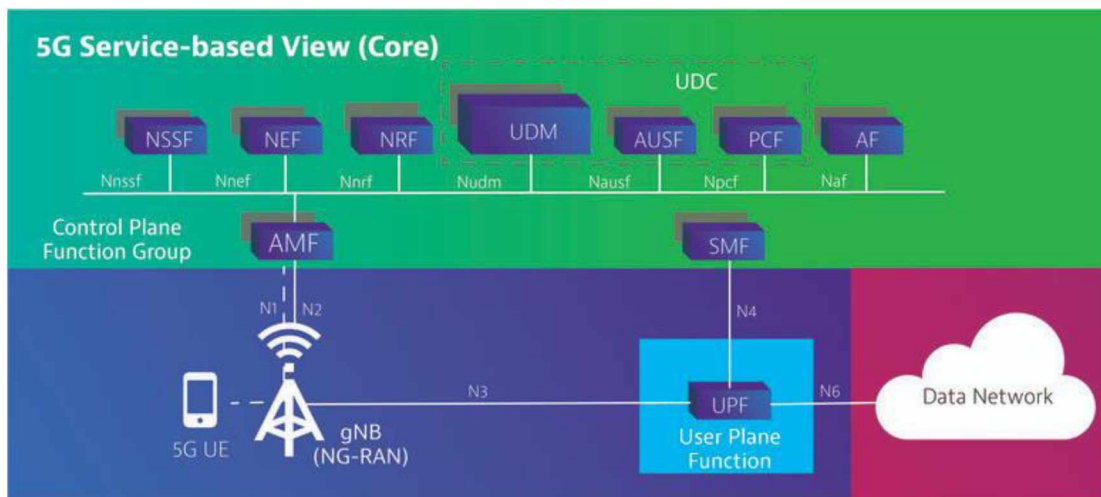


απο 6GHz (<6GHz), το οποίο αποδίδει ταχύτητες λίγο μεγαλύτερες από αυτές του 4G LTE, είτε συχνότητες υψηλού εύρους (**Frequency Range 2, FR2**) μεγαλύτερη των 24GHz (>24GHz) το οποίο χρησιμοποιεί χιλιοστομετρικά κύματα (**millimeter waves**) τα οποία αποδίδουν σημαντικά υψηλότερες ταχύτητες. Τα χιλιοστομετρικά κύματα έχουν μικρότερη εμβέλεια από τα μικροκύματα καθιστώντας τα πολύ ευαίσθητα στην επικοινωνία μεταξύ τερματικού και σταθμού βάσης. Έτσι για τη χρήση τέτοιων είδους κυμάτων θα πρέπει να επεκταθεί με περισσότερες κεραιές (μικρότερες από τις κεραιές προηγούμενων γενιών) για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Επίσης χρησιμοποιούνται, όπως και στα 4G δίκτυα, κεραιές **Massive MIMO** (Multiple Input Multiple Output) για την αποδοτικότερη ροή δεδομένων στο δίκτυο μας, η τεχνική της Υποβοηθούμενης Πρόσβασης με Άδεια Χρήσης (**License Assisted Access, LAA**) η οποία επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης κυψελωτών δικτύων να εκφορτώσουν κάποια από τα δεδομένα κυκλοφορίας (data traffic), χρησιμοποιώντας τη ζώνη συχνοτήτων 5GHz χωρίς άδεια, για την παροχή καλύτερης εξυπηρέτησης του χρήστη από το σύστημα (μεγάλη ρυθμοί μετάδοσης) και η τεχνική της χρήσης μη αδειοδοτούμενου φάσματος **NR-U**, το οποίο θα χρησιμοποιείται για παροχή υπηρεσιών 5G, τοπικά εικονικά δίκτυα (VPN) κ.λπ. Τα δίκτυα 5G πρόκειται να χρησιμοποιήσουν για πρόσβαση των καναλιών την τεχνική της μη ορθογωνίας πολλαπλής πρόσβασης (Non Orthogonal Multiple Access, **NOMA**), ενώ για την κωδικοποίηση της πληροφορίας χρησιμοποιούνται κώδικες polar για το κανάλι ελέγχου και κώδικες LDPC για το κανάλι επικοινωνίας.

«Η αρχιτεκτονική δικτύου 5G είναι στο επίκεντρο της νέας προδιαγραφής 5G και επιτρέπει την αυξημένη ζήτηση απόδοσης που πρέπει να υποστηρίξει. Ο νέος πυρήνας 5G, όπως ορίστηκε από το 3GPP, χρησιμοποιεί αρχιτεκτονική βασισμένη σε υπηρεσίες (Small Business Administration, SBA) που καλύπτει όλες τις λειτουργίες και αλληλεπιδράσεις 5G, όπως έλεγχος ταυτότητας, ασφάλεια, διαχείριση συνεδριών και συνάθροιση επισκεψιμότητας από τις τελικές συσκευές. Ο πυρήνας 5G υπογραμμίζει περαιτέρω την εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών (Network Function Virtualization, NFV), το οποίο αποσυνδέει το λογισμικό από το υλικό με την αντικατάσταση διαφόρων λειτουργιών δικτύου, ως ολοκληρωμένη φιλοσοφία σχεδίασης με λειτουργίες λογισμικού που μπορούν να αναπτυχθούν χρησιμοποιώντας



την υποδομή Multi-Access Edge Computing (MEC, εξέλιξη στο τομέα του cloud computing), που είναι κεντρική για τις 5G αρχιτεκτονικές αρχές.» [17]



Σχήμα 10: Κύρια αρχιτεκτονική δομή 5G. [S6]

Η ITU-Radiocommunication Sector (ITU-R) έχει καθιερώσει τρία βασικά σενάρια για την νέα τεχνολογία της 5^{ης} γενιάς. Αυτά είναι:

- **Βελτιωμένες Κινητές Ευρυζωνικές Επικοινωνίες (Enhanced Mobile Broadband, eMBB)**, οι οποίες αποτελούν εξέλιξη της ευρυζωνικότητας των δικτύων 4^{ης} γενιάς με υψηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερη χωρητικότητα συστήματος.
- **Υπεραξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης (Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC)**, οι οποίες απευθύνονται σε απαιτητικές εφαρμογές που χρειάζονται αδιάκοπη και ισχυρή ανταλλαγή δεδομένων.
- **Μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής (Massive Machine Type Communications, mMTC)**, οι οποίες θα χρησιμοποιούνται για να συνδέουν μαζικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης και μικρού κόστους, διαθέτοντας μεγάλη κλιμακότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας, σε ένα δίκτυο ευρείας περιοχής (Low Power Wide Area Network, LPWAN).

Ενώ τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς φαίνεται να δημιουργούν μια νέα οπτική για την μετάδοση των πληροφοριών με καινοτόμες εφαρμογές, φαίρνει μία ποικιλία απο αρνητικά



χαρακτηριστικά που την ακολουθούν. Πρώτο και πιο κύριο ζήτημα είναι το θέμα της υγείας καθώς τα 5G δίκτυα επιφέρουν μεγάλο δείκτη ακτινοβολίας κατά που θα μπορούσε να έχει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία μας. Η υψηλότερες συχνότητες μικροκυμάτων και χιλιοστομετρων κυμάτων που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με την επέκταση του δικτύου με περισσότερες κεραιές φέρνει μια ανησυχία στο ευρύ κοινό. Ένα δεύτερο κύριο ζήτημα αποτελεί αυτό της ασφάλειας των συστημάτων καθώς μια νέα τεχνολογία θα μπορούσε να ανοίξει έδαφος για μια νέα εποχή απειλών, καθώς επιτρέπει την διείσδυση σε μεγάλες ποσότητες δεδομένων καθώς και την ευαισθησία συστημάτων IoT σε cyberattacks όπως παραδείγματος χάρι μιας ενισχυμένης επίθεσης DDoS .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Εισαγωγή στα μοντέλα απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης.

Ο υπολογισμός της πιθανότητας απώλειας κλήσης είναι μια σύνθετη για το σύστημα διαδικασία. Κάθε κλήση έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και μοιράζεται το εύρος ζώνης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος με έναν μοναδικό τρόπο. Τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα χρησιμοποιούν πολυδιάστατα μοντέλα για τη εύρεση της πιθανότητας απώλειας κλήσης και τα δεδομένα εισόδου του, τα παίρνουν απο διάφορες πηγές κίνησης.

Η πολιτική που χρησιμοποιείται για το διαμοιρασμό του εύρους ζώνης είναι και αυτή μοναδική καθώς ο διαμοιρασμός των κλήσεων γίνεται με έναν απο τους εξής τρόπους:

- **Πολιτική πλήρους διάθεσης (Complete Sharing Policy):** Όλες οι κατηγορίες κλήσεων μοιράζονται το διαθέσιμο εύρος ζώνης
- **Πολιτική πλήρους διαμελισμού (Complete Portioning Policy):** Κάθε κατηγορία κλήσεων χρησιμοποιεί αποκλειστικά ένα μέρος του συνολικού εύρους ζώνης
- **Πολιτική κατωφλιού (Threshold Policy):** Ο αριθμός των κλήσεων περιορίζεται στα όρια ενός συγκεκριμένου αριθμού.
- **Πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης (Trunk Reservation Policy ή Bandwidth Reservation Policy):** Μια κλήση συγκεκριμένης κατηγορίας



γίνεται δεκτή μόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμες συγκεκριμένες μονάδες εύρους ζώνης.

Σε αυτή την μελέτη διακρίνουμε τέσσερα μοντέλα πολυδιάστατης κίνησης, τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω με έμφαση στη πολιτική πλήρους διάθεσης, και διακρίνονται στα:

1. Μοντέλο απωλειών Erlang Multirate Loss Model (EMLM)
2. Μοντέλο απωλειών Engset Multirate Loss Model (EnMLM)
3. Μοντέλο επανάκλησης (Retry Model)
4. Μοντέλο κατωφλιού (Threshold Model)

3.2 Μοντέλο Erlang Multirate Loss Model (EMLM)

Το EMLM διακρίνεται στα συστήματα απωλειών τα οποία έχουν αφίξεις με κατανομή Poisson (ρυθμού λ_k) και εκθετική κατανομή του χρόνου εξυπηρέτησης των κλήσεων με μέση τιμή $\frac{1}{\mu_k}$ ($\mu_k =$ ρυθμός εξυπηρέτησης της κάθε κλήσης) και με προσφερόμενο φορτίο κίνησης $\alpha_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k}$. Η χωρητικότητα μίας ζεύξης είναι C μονάδων εύρους ζώνης **b.u.** (bandwidth units) και οι αφίξεις των κλήσεων στο σύστημα διακρίνονται σε κατηγορίες $k \{k = 1, 2, \dots, K\}$ με κάθε κατηγορία να κατέχει b_k μονάδες εύρους ζώνης. Σε αυτά τα συστήματα οι κλήσεις διεκπαιρώνονται ως εξής:

- Αν υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης στο σύστημα μας κατά την άφιξή της, τότε η κλήση εξυπηρετείται.
- Αν δεν υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης, τότε η κλήση απορρίπτεται και χάνεται.

Εφόσον η κλήση μας εξυπηρετηθεί από το σύστημα, το εύρος ζώνης που καταλάμβανε (μονάδες b_k), αμέσως αποδεσμεύεται.

Η πολιτική διαμοιρασμού εύρους ζώνης που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του μοντέλου αυτού, είναι η πολιτική πλήρους διάθεσης CS (Complete Sharing policy), όπου οι b_k μονάδες εύρους ζώνης διαμοιράζονται στο ελεύθερο φάσμα του συστήματος, χωρίς να πρέπει αυτές να είναι συνεχόμενες (διαμοιράζονται παντού).

Οι κλήσεις που βρίσκονται ήδη στο σύστημα και εξυπηρετούνται (σε κατάσταση ισορροπίας) συμβολίζονται με n_k , όπου n το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης. Για να



δείξουμε εάν έχουμε αύξηση ή μείωση, στο ισορροπιμένο σύστημα, κατά μία κλήση τότε ορίζουμε τα διανύσματα αντίστοιχα:

$$n_k^+ = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k + 1, n_{k+1}, n_{k+2}, \dots, n_K)$$

$$n_k^- = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k - 1, n_{k+1}, n_{k+2}, \dots, n_K)$$

Ακόμα ορίζουμε το σύνολο δυνατών καταστάσεων Ω του συστήματος ως:

$$\Omega = \{n: 0 \leq nb \leq C\} \equiv \{n: 0 \leq \sum_{k=1}^K n_k b_k \leq C\} \quad (3.1)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι η πολιτική πλήρους διάθεσης ανήκει στις πολιτικές κυρτών συντεταγμένων (coordinate convex policies) οι οποίες έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: [1/46]

1. Μία κλήση γίνεται δεκτή απο το σύστημα όταν η νέα κατάσταση που θα προκύψει ανήκει επίσης στο σύνολο καταστάσεων Ω .
2. Η πιθανότητα $P(n)$ μόνιμης κατάστασης του συστήματος δίνεται σε μορφή γινομένου.

Τέλος, για να βρούμε τη πιθανότητα απώλειας κλήσεων σε ένα σύστημα με μέθοδο EMLM, μπορούμε να ακολουθήσουμε τρεις διαφορετικές μεθόδους :

1. **Επίλυση Γραμμικών Εξισώσεων:** επίλυση ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων (εξισώσεις σφαιρικής ισορροπίας), όπου το άθροισμα των πιθανοτήτων όλων των καταστάσεων ισούται με ένα ($P_a + P_b + \dots + P_n = 1$). Η εξισώσεις δημιουργούνται σύμφωνα με την έννοια της σφαιρικής ισορροπίας που προκύπτει απο τις αλυσίδες Markov. Έτσι η απώλεια κλήσης κάθε κατηγορίας θα ισούται με τις τιμές των πιθανοτήτων P_n . Γενικά αυτή η μέθοδος είναι και η πιο περίπλοκη καθώς πρέπει να «φτιαχτούν» όλες οι γραμμικές εξισώσεις στην κατάσταση ισορροπίας.
2. **Λύση μορφής γινομένου:** Η πιθανότητα μόνιμης κατάστασης $P(n)$ βγαίνει απο τη παρακάτω σχέση μορφής γινομένου: [1]



$$P(n) = \frac{\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!}}{\sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right)} \quad (3.2)$$

Ο παρανομαστής εκφράζει την σταθερά κανονικοποίησης, ο οποίος συμβολίζεται και ως $G(C, K) = G(\Omega)$.

Ο τύπος αυτός βγήκε μέσω της εξίσωσης κατανομής Erlang (βλέπε 1.8) που δίνει τη πιθανότητα να υπάρχουν r κλήσεις στο σύστημα, μετά απο ένα προκαθορισμένο διάστημα.

Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κατάσταση ισοροπίας (λόγω των αλυσίδων Markov K -διαστάσεων), η πιθανότητα απώλειας κλήσης μιας κατηγορίας k βγαίνει απο το τύπο:

$$P_{b_k} = \sum_{n \in B_k^+} P(n), \quad B_k^+ = \{r \in \Omega: n_k^+ \notin \Omega\} \quad (3.3)$$

Υπάρχει η περίπτωση, όμως, ένα σύστημα να βρεθεί σε μία κατάσταση η οποία είναι υποσύνολο του Ω (Ω_k). Εάν αυτό συμβεί, τότε η κλήση της κατηγορίας k μπορεί να εξυπηρετηθεί απο το σύστημα και η πιθανότητα απώλειας κλήσης της είναι:

$$P_{b_k} = 1 - \sum_{n \in \Omega_k} P(n) = 1 - \frac{\sum_{n \in \Omega_k} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right)}{\sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right)} = 1 - \frac{G(C - b_k, K)}{G(C, K)} \quad (3.4)$$

3. **Αναδρομικός-προσεγγιστικός τύπος Kaufman-Roberts:** Υπολογισμός πιθανότητας να είναι κατειλημμένες j απο τις C γραμμές.

Η πιθανότητα να είναι κατειλημμένες j γραμμές στην μόνιμη κατάσταση (κατάσταση ισοροπίας) δίνεται απο το τύπο: [1]

$$q(j) = \sum_{n \in \Omega_j} P(n) = \frac{\sum_{n \in \Omega_j} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right)}{\sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right)} = \frac{G(C - b_j, K)}{G(C, K)}$$



Ο αναδρομικός-προσεγγιστικός τύπος της πιθανότητας $q(j)$, $j = 1, 2, \dots, C$, δίνεται απο το παρακάτω σύστημα:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{i=1}^K a_i b_i q(j - b_i), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.5)$$

Σε περίπτωση που οι κατειλημμένες γραμμές είναι $j = nb > C - b_k$, τότε προκύπτει απώλεια κλήσεων της κατηγορίας k . Συνεπώς, αυτό εκφράζεται απο το παρακάτω τύπο: [1]

$$P_{b_k} = \sum_{i=C-b_k+1}^C q'(j) \quad (3.6)$$

$$\text{με } q'(j) = \frac{q(j)}{\sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{i=1}^K \frac{a_i^{n_i}}{n_i!} \right)} = \frac{q(j)}{G(C, K)} \quad (3.7)$$

3.2.1 Παράδειγμα πάνω στη μέθοδο EMLM

Για την δική μας διευκόλυνση, στα EMLM μοντέλα, χρησιμοποιούμε δύο κατηγορίες κίνησης ($K=2$) διότι όταν έχουμε παραπάνω απο δύο, γίνεται δυσκολότερη η κατανόηση του μοντέλου καθώς δε μπορεί να απεικονιστεί σε δισδυάστατη μορφή. (τοποθέτηση καταστάσεων σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων). Επίσης το παράδειγμα θα λυθεί με βάση τη μέθοδο της σφαιρικής ισοροπίας.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα που χρησιμοποιεί πολιτική πλήρους διάθεσης (CS policy), το οποίο έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

Χωρητικότητα εύρους ζώνης $C = 12$

Κατηγορίες κίνησης $K = 2$

Ρυθμός εξυπηρέτησης $\frac{1}{\mu_1} = \frac{1}{\mu_2} = 1 \text{ sec}$

Ρυθμός άφιξης $\lambda_1 = \lambda_2 = 1 \text{ sec}^{-1}$

Απαιτήσεις εύρους ζώνης/ κατηγορία: $b_1 = 2 \text{ b. u.}$ & $b_2 = 4 \text{ b. u.}$

Να βρεθεί η πιθανότητα απώλειας κλήσεων για κάθε κατηγορία κίνησης.



Απάντηση:

Αρχικά βρίσκουμε το σύνολο των δυνατών καταστάσεων για τις 2 κατηγορίες κλήσεων. Ισχύει ότι:

$$\Omega = \{n: 0 \leq n_k b_k \leq C\}$$

Άρα έχουμε $0 \leq 2n_1 + 4n_2 \leq 12$

Το Ω θα πρέπει να αποτελείται από καταστάσεις (n_1, n_2) οι οποίες πρέπει να ικανοποιούν την παραπάνω διπλή ανίσωση. Οι συνδυασμοί που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$\Omega = \{(0, 0), (0, 1), (0, 2), (0, 3), (1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 0), (2, 1), (2, 2), (3, 0), (3, 1), (4, 0), (4, 1), (5, 0), (6, 0)\}$$

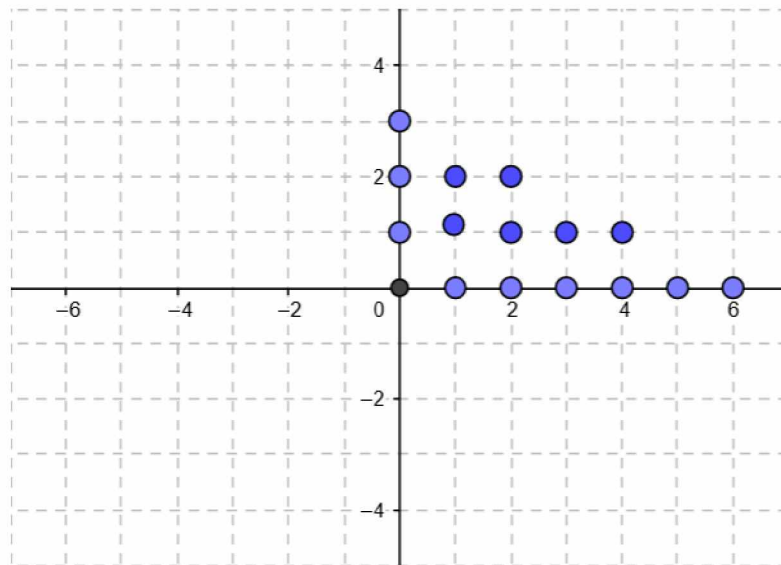
Προκύπτουν 16 συνδυασμοί, οι οποίοι μπορούν να απεικονηθούν σε έναν ενιαίο πίνακα, με επιπλέον τον αριθμό κατειλημμένων μονάδων ευρους ζώνης (j) για κάθε ζευγάρι.

n1	n2	j
0	0	0
0	1	4
0	2	8
0	3	12
1	0	2
1	1	6
1	2	10
2	0	4
2	1	8
2	2	12
3	0	6
3	1	10
4	0	8
4	1	12
5	0	10
6	0	12



Πίνακας καταστάσεων EMLM

Επιπλέον απεικονίζουμε τα ζευγάρια σε ορθοκανονικό σύστημα αξόνων.



Σχήμα 11: Σύνολο καταστάσεων σε καρτεσιανό σύστημα

Σημείωση: Για να επαληθεύσουμε τα ακραία σημεία των καταστάσεων μας, αρκεί να χρησιμοποιήσουμε τους εξής τύπους, κανονικοποιώντας προς τα κάτω:

- $\left\lfloor \frac{c}{b_1} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{12}{2} \right\rfloor = 6$, για τον άξονα $x'x$.
- $\left\lfloor \frac{c}{b_2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{12}{4} \right\rfloor = 3$, για τον άξονα $y'y$.

Πράγματι, επαληθεύεται ότι τα άκρα είναι 6 για το $x'x$ και 3 για το $y'y$.

Εφόσον έχουμε δημιουργήσει τις καταστάσεις του συνόλου μας στο τηλεπικοινωνιακό μας σύστημα, μπορούμε να αρχίσουμε τη διαδικασία δημιουργίας των γραμμικών εξισώσεων και εύρεση των πιθανοτήτων για κάθε κατηγορία.

➤ **1^η κατηγορία κλήσεων:**

Απο εκφώνηση γνωρίζουμε ότι για την 1^η κατηγορία κλήσεων υπάρχει μπλοκάρισμα στο σύστημα, όταν δεν υπάρχει το διαθέσιμο εύρος ζώνης $b_1 = 2b.u$. Αυτό συμβαίνει όταν $j > C - b_1 = 12 - 2 \Rightarrow j > 10$. Οπότε το σύστημα μας είναι κατειλημμένο όταν $j = 11$ ή 12 .



Η πιθανότητα λοιπόν να χαθεί μια κλήση 1^{ης} κατηγορίας είναι :

$$P_{b_1} = P(j > 10) = P(0,3) + P(2,2) + P(4,1) + P(6,0)$$

➤ **2^η κατηγορία κλήσεων:**

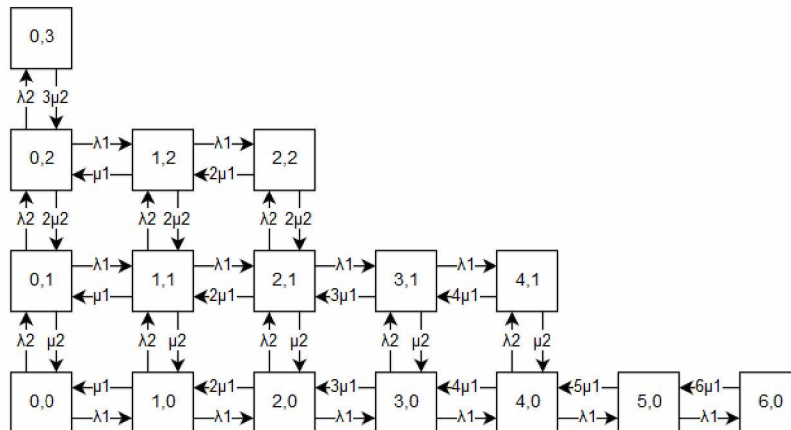
Το διαθέσιμο εύρος ζώνης που απαιτείται από τη δεύτερη κατηγορία είναι $b_2 = 4b$. u. Άρα απο το τύπο έχω:

$j > C - b_2 = 12 - 4 \Rightarrow j > 8$, δηλαδή το σύστημα είναι κατειλημμένο όταν $j = 9$ ή 10 ή 11 ή 12 .

Η πιθανότητα λοιπόν να χαθεί μια κλήση 2^{ης} κατηγορίας είναι :

$$P_{b_2} = P(j > 8) = P(1,2) + P(3,1) + P(5,0) + P(0,3) + P(2,2) + P(4,1) + P(6,0)$$

Δημιουργούμε ένα διάγραμμα μετάβασης των καταστάσεων, που λόγω της ιδιότητας PASTA ισχύει **Ρυθμός άφιξης = Ρυθμός εξαγωγής** και δημιουργούμε τις γραμμικές εξισώσεις για την εύρεση των πιθανοτήτων των καταστάσεων.



Σχήμα 12: Διάγραμμα μετάβασης EMLM

→ Κατάσταση (0,0)

$$\lambda_1 P(0,0) + \lambda_2 P(0,0) = \mu_1 P(1,0) + \mu_2 P(0,1) \Rightarrow$$

$$2P(0,0) = P(1,0) + P(0,1)$$



→ Κατάσταση (1,0)

$$\lambda_1 P(1,0) + \mu_1 P(1,0) + \lambda_2 P(1,0) = \lambda_1 P(0,0) + \mu_2 P(1,1) + 2\mu_1 P(2,0) \Rightarrow$$

$$\mathbf{3P(1,0) = P(0,0) + P(1,1) + 2P(2,0)}$$

→ Κατάσταση (2,0)

$$2\mu_1 P(2,0) + \lambda_2 P(2,0) + \lambda_1 P(2,0) = \lambda_1 P(1,0) + \mu_2 P(2,1) + 3\mu_1 P(3,0) \Rightarrow$$

$$\mathbf{4P(2,0) = P(1,0) + P(2,1) + 3P(3,0)}$$

→ Κατάσταση (3,0)

$$3\mu_1 P(3,0) + \lambda_2 P(3,0) + \lambda_1 P(3,0) = 4\mu_1 P(4,0) + \mu_2 P(3,1) + \lambda_1 P(2,0) \Rightarrow$$

$$\mathbf{5P(3,0) = 4P(4,0) + P(3,1) + P(2,0)}$$

→ Κατάσταση (4,0)

$$4\mu_1 P(4,0) + \lambda_2 P(4,0) + \lambda_1 P(4,0) = 5\mu_1 P(5,0) + \mu_2 P(4,1) + \lambda_1 P(3,0) \Rightarrow$$

$$\mathbf{6P(4,0) = 5P(5,0) + P(4,1) + P(3,0)}$$

→ Κατάσταση (5,0)

$$5\mu_1 P(5,0) + \lambda_1 P(5,0) = 6\mu_1 P(6,0) + \lambda_1 P(4,0) \Rightarrow$$

$$\mathbf{6P(5,0) = 6P(6,0) + P(4,0)}$$

→ Κατάσταση (6,0)

$$6\mu_1 P(6,0) = \lambda_1 P(5,0) \Rightarrow \mathbf{6P(6,0) = P(5,0)}$$

→ Κατάσταση (0,1)

$$\lambda_2 P(0,1) + \lambda_1 P(0,1) + \mu_2 P(0,1) = \lambda_2 P(0,0) + \mu_1 P(1,1) + 2\mu_2 P(0,2) \Rightarrow$$

$$\mathbf{3P(0,1) = P(0,0) + P(1,1) + 2P(0,2)}$$



→ Κατάσταση (1,1)

$$\begin{aligned} \lambda_2 P(1,1) + \lambda_1 P(1,1) + \mu_2 P(1,1) + \mu_2 P(1,1) = \\ 2\mu_2 P(1,2) + 2\mu_1 P(2,1) + \lambda_2 P(1,0) + \lambda_1 P(0,1) \Rightarrow \\ \mathbf{4P(1,1) = 2P(1,2) + 2P(2,1) + P(1,0) + P(0,1)} \end{aligned}$$

→ Κατάσταση (2,1)

$$\begin{aligned} \lambda_2 P(2,1) + \lambda_1 P(2,1) + \mu_2 P(2,1) + 2\mu_1 P(2,1) = \\ 2\mu_2 P(2,2) + 3\mu_1 P(3,1) + \lambda_2 P(2,0) + \lambda_1 P(1,1) \Rightarrow \\ \mathbf{5P(2,1) = 2P(2,2) + 3P(3,1) + P(2,0) + P(1,1)} \end{aligned}$$

→ Κατάσταση (3,1)

$$\begin{aligned} 3\mu_1 P(3,1) + \lambda_1 P(3,1) + \mu_2 P(3,1) = \lambda_1 P(2,1) + 4\mu_1 P(4,1) + \lambda_2 P(3,0) \Rightarrow \\ \mathbf{5P(3,1) = P(2,1) + 4P(4,1) + P(3,0)} \end{aligned}$$

→ Κατάσταση (4,1)

$$\begin{aligned} 4\mu_1 P(4,1) + \mu_2 P(4,1) = \lambda_1 P(3,1) + \lambda_2 P(4,0) \Rightarrow \\ \mathbf{5P(4,1) = P(3,1) + P(4,0)} \end{aligned}$$

→ Κατάσταση (0,2)

$$\begin{aligned} \lambda_2 P(0,2) + \lambda_1 P(0,2) + 2\mu_2 P(0,2) = \lambda_2 P(0,1) + \mu_1 P(1,2) + 3\mu_2 P(0,3) \Rightarrow \\ \mathbf{4P(0,2) = P(0,1) + P(1,2) + 3P(0,3)} \end{aligned}$$

→ Κατάσταση (1,2)

$$\begin{aligned} \mu_1 P(1,2) + \lambda_1 P(1,2) + 2\mu_2 P(1,2) = \lambda_1 P(0,2) + 2\mu_1 P(2,2) + \lambda_2 P(1,1) \Rightarrow \\ \mathbf{4P(1,2) = P(0,2) + 2P(2,2) + P(1,1)} \end{aligned}$$

→ Κατάσταση (2,2)

$$2\mu_1 P(2,2) + 2\mu_2 P(2,2) = \lambda_1 P(1,2) + \lambda_2 P(2,1) \Rightarrow$$



$$4P(2,2) = P(1,2) + P(2,1)$$

→ Κατάσταση (0,3)

$$3\mu_2 P(0,3) = \lambda_2 P(0,2) \Rightarrow 3P(0,3) = P(0,2)$$

Άρα έχουμε απο όλες τις καταστάσεις:

$$P(1,0) + P(0,1) - 2P(0,0) = 0$$

$$P(0,0) + P(1,1) + 2P(2,0) - 3P(1,0) = 0$$

$$P(1,0) + P(2,1) + 3P(3,0) - 4P(2,0) = 0$$

$$4P(4,0) + P(3,1) + P(2,0) - 5P(3,0) = 0$$

$$5P(5,0) + P(4,1) + P(3,0) - 6P(4,0) = 0$$

$$6P(6,0) + P(4,0) - 6P(5,0) = 0$$

$$P(5,0) - 6P(6,0) = 0$$

$$P(0,0) + P(1,1) + 2P(0,2) - 3P(0,1) = 0$$

$$2P(1,2) + 2P(2,1) + P(1,0) + P(0,1) - 4P(1,1) = 0$$

$$2P(2,2) + 3P(3,1) + P(2,0) + P(1,1) - 5P(2,1) = 0$$

$$P(2,1) + 4P(4,1) + P(3,0) - 5P(3,1) = 0$$

$$P(3,1) + P(4,0) - 5P(4,1) = 0$$

$$P(0,1) + P(1,2) + 3P(0,3) - 4P(0,2) = 0$$

$$P(0,2) + 2P(2,2) + P(1,1) - 4P(1,2) = 0$$

$$P(1,2) + P(2,1) - 4P(2,2) = 0$$

$$P(0,2) - 3P(0,3) = 0$$

Επιπλέον έχουμε τη εξίσωση:

$$\sum_{(n_1, n_2)} P(n_1, n_2) = 1$$



Άρα έχουμε:

P(0,0)	P(1,0)	P(2,0)	P(3,0)	P(4,0)	P(5,0)	P(6,0)	P(0,1)	P(1,1)	P(2,1)	P(3,1)	P(4,1)	P(0,2)	P(1,2)	P(2,2)	P(0,3)
-2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
1	-3	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	1	-4	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	-5	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	1	-6	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	-6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	-3	1	0	0	0	2	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	-4	2	0	0	0	2	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	1	-5	3	0	0	0	2	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-5	4	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-5	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	-4	1	0	3
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-4	2	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	-4	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-3

Πίνακας συντελεστών εξισώσεων

Αποτελέσματα λύσεων συστήματος μέσω λογισμικού QtsPlus.

$$q(0) = P(0,0) = 0,1461$$

$$q(1) = 0,0000$$

$$q(2) = P(1,0) = 0,1461$$

$$q(3) = 0,0000$$

$$q(4) = P(0,1) + P(2,0) = 0,2192$$

$$q(5) = 0,0000$$

$$q(6) = P(1,1) + P(3,0) = 0,1705$$

$$q(7) = 0,0000$$

$$q(8) = P(0,2) + P(2,1) + P(4,0) = 0,1522$$

$$q(9) = 0,0000$$

$$q(10) = P(1,2) + P(3,1) + P(5,0) = 0,0986$$

$$q(11) = 0,0000$$

$$q(12) = P(0,3) + P(2,2) + P(4,1) + P(6,0) = 0,0671$$

Άρα έχουμε:

➤ 1^η κατηγορία κλήσεων:

$$P_{b1} = P(j > 10) = q(12) = 0,0671$$



➤ 2^η κατηγορία κλήσεων:

$$P_{b2} = P(j > 8) = q(10) + q(12) = 0,1658$$

3.3 Μοντέλο Απωλειών Engset (EnMLM)

Το EnMLM διακρίνεται στα συστήματα απωλειών τα οποία ο αριθμός των πηγών είναι πεπερασμένος, εν αντιθέση των συστημάτων απωλειών του Erlang που είναι μη πεπερασμένα (άπειρα), και εκφράζεται με το συντελεστή N. Ωστόσο ο τρόπος υπολογισμού των δεδομένων δεν διαφέρει πολύ.

Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης σε αυτή τη κατηγορία, υπολογίζεται ανά ελεύθερη πηγή και έχει τύπο:

$$a' = \frac{\nu}{\mu} = \nu, \quad a = a'N \quad (3.8)$$

με ν η μέση τιμή ρυθμού αφίξεως ανά κλήση και μ η μέση τιμή εξυπηρέτησης των κλήσεων.

Η κάθε κλήση καταλαμβάνει από ένα εξυπηρετητή, όπως και στο EMLM, οι οποίες προέρχονται από ελεύθερες πηγές κίνησης με ρυθμό άφιξης $\lambda(\mathbf{n})$ και ρυθμό εξυπηρέτησης $\mu(\mathbf{n})$:

$$\lambda(\mathbf{n}) = \begin{cases} (N - n)\nu, & 0 \leq n \leq N \\ 0, & n = N \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\mu(\mathbf{n}) = n\mu, \quad 1 \leq n \leq s, \quad \text{με } s = \text{εξυπηρετητές}$$

Ο υπολογισμός πιθανότητας μπλοκαρίσματος εαν βρεθεί η πιθανότητα όλοι οι εξυπηρετητές να είναι απασχολημένοι (με $\mathbf{n} < \mathbf{s}$) κατά την άφιξη μιας κλήσης από N-1 πηγές. Γενικά, μπορούμε να περιγράψουμε το τύπο απώλειας μιας κλήσης από το σύστημα ως:

$$P(n) = \frac{\binom{N}{n} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^n}{\sum_{i=0}^s \binom{N}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i} \quad (3.10)$$



με γενικό τύπο να ισχύει για $P(0)$:

$$P(0) = \frac{1}{\sum_{i=0}^s \binom{N}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i}$$

Ο τύπος (3.8) μπορεί να μας περιγράψει επίσης τη πιθανότητα συμφόρησης στο χρόνο αντικαθιστώντας στην εξίσωση των αριθμό των κλήσεων \mathbf{n} με τον αριθμό των εξυπηρετητών \mathbf{s} (καθώς κάθε εξυπηρετητής αναλαμβάνει μία κλήση). Άρα έχουμε:

$$\text{Πιθανότητα συμφόρησης στο χρόνο : } P(s) = \frac{\binom{N}{s} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^s}{\sum_{i=0}^s \binom{N}{i} \left(\frac{\lambda_{\mu\epsilon\sigma\sigma}}{\mu}\right)^i} \quad (3.11)$$

«Για να βρεθεί η πιθανότητας μπλοκαρίσματος λοιπόν, θα πρέπει να ορίσουμε ένα μεγάλο χρονικό διάστημα $(0, T)$, κατά το οποίο ο μέσος χρόνος που το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση n είναι $P(n) \cdot T$ (όπου το $P(n)$ βρίσκεται απο τη σχέση (3.10)).» [1]

Έχουμε ότι:

→ Μέση τιμή αφίξεων ν' στην κατάσταση n είναι : $\nu' = (N - n) \cdot \nu \cdot P(n) \cdot T$

Άρα θα έχω:

$$P'(n) = \frac{(N - n) \cdot \nu \cdot P(n) \cdot T}{\sum_{i=0}^s (N - i) \cdot \nu \cdot P(i) \cdot T}$$

$$\Rightarrow P'(n) = \frac{(N - n) \cdot P(n)}{\sum_{i=0}^s (N - i) \cdot P(i)}$$

$$\stackrel{(3.10)}{\Rightarrow} P'(n) = \frac{(N - n) \binom{N}{n} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^n}{\sum_{i=0}^s (N - i) \binom{N}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i}$$

$$\Rightarrow P'(n) = \frac{\binom{N-1}{n} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^n}{\sum_{i=0}^s \binom{N-1}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i}$$



Για $n = s$, αρκεί να αντικαταστήσουμε τη μεταβλητή n στο $P'(n)$ με s .

$$P'(s) = \frac{\binom{N-1}{s} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^s}{\sum_{i=0}^s \binom{N-1}{i} \left(\frac{\nu}{\mu}\right)^i}$$

Απο τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι η πιθανότητα μπλοκαρίσματος μιας κλήσης (N πηγών / s εξυπηρετητών) ισούται με την πιθανότητα συμφόρησης στο χρόνο ($N-1$ πηγών / s εξυπηρετητών).

Για μεγάλο αριθμό εξυπηρετητών είναι αδύνατος ο υπολογισμός μπλοκαρίσματος καθώς υπάρχει μεγάλος αριθμός παραγοντικών όρων, ειδικά στον παρανομαστή.

Ο υπολογισμός της πιθανότητας μπλοκαρίσματος μια κλήσης στα συστήματα EnMLM μπορεί να βρεθεί με τους τρεις διαφορετικούς τρόπους που είδαμε και στο EMLM ο οποίοι είναι:

- 1. Εξισώσεις σφαιρικής ισοροπίας:** Γραμμικές εξισώσεις οι οποίες με λύση των συστημάτων τους και με τη εξίσωση κλειδί $\sum_{n=0}^s P(n) = 1$, βρίσκουμε τη πιθανότητα απώλειας κλήσεων κάθε κατηγορίας κίνησης.
- 2. Λύση μορφής γινομένου:** Η πιθανότητα απώλειας κλήσης δίνεται απο το παρακάτω τύπο γινομένου:

$$P(n) = \frac{\prod_{k=1}^K \binom{N_k}{n_k} \left(\frac{\nu_k}{\mu_k}\right)^{n_k}}{\sum_{n \in \Omega} \left(\prod_{j=1}^K \binom{N_j}{n_j} \left(\frac{\nu_j}{\mu_j}\right)^{n_j} \right)} \quad (3.12)$$

«Παρ' όλη τη χρησιμότητά της, η λύση μορφής γινομένου δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα στα μεγάλα συστήματα με πολλές κατηγορίες κίνησης και υψηλής χωρητικότητας.» [1]

- 3. Αναδρομικός τύπος (Stamatelos & Hayes):** Η πιθανότητα απώλειας κλήσεων δίνεται απο το παρακάτω αναδρομικό τύπο:



$$j q(j) = \sum_{k=1}^K (N_k - n_k + 1) a_k b_k q(j - b_k), \quad a_k = \frac{n_k}{\mu_k} \quad (3.13)$$

Το μειονέκτημα που παρουσιάζει αυτός ο τύπος είναι ότι δυσκολεύεται στο υπολογισμό των $q(j)$ καθώς η κατάσταση j μπορεί να αναφέρεται σε περισσότερες από μία καταστάσεις. Γι' αυτό ο Stamatelos & Hayes πρότειναν ένα ισοδύναμο σύνολο καταστάσεων τα οποία:

- Έχει τις ίδιες ακριβώς καταστάσεις με το αρχικό σύνολο
- Έχει τις ίδιες ακριβώς καταστάσεις συμφόρησης
- Πρέπει να έχει διαφορετικό j για κάθε κατάσταση. Για να γίνει αυτό επιλέγονται τέτοια b_k ώστε σε συνδυασμό με το n_k να δίνουν μοναδικό j . ($j_{max} = C$)

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_k+1}^C \frac{q(j)}{G} = \sum_{j=C-b_k+1}^C q'(j) \quad (3.14)$$

Με G να είναι το άθροισμα όλων των τιμών $q(j)$:

$$G = \sum_{j=0}^{j_{max}=C} q(j)$$

3.3.1 Παράδειγμα πάνω στη μέθοδο EnMLM

Όλες οι προαναφερόμενες μέθοδοι λύνονται με τον ίδιο τρόπο που λύνονται τα συστήματα EMLM. Το παράδειγμα αυτό θα λυθεί με τον αναδρομικό τύπο του Stamatelos & Hayes για τον υπολογισμό απώλειας κλήσης στο σύστημα EnMLM.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά :

Χωρητικότητα συστήματος: $C=7 \text{ b.u.}$

Απαιτήσεις ευρους ζώνης / κατηγορία: $b_1 = 3 \text{ b.u.}$ & $b_2 = 2 \text{ b.u.}$

Μέση τιμή αφίξεως / κατηγορία : $v_1 = 0.3 \text{ sec}$ & $v_2 = 0.2 \text{ sec}$

Ρυθμός εξυπηρέτησης: $\mu_1 = \mu_2 = 1 \text{ sec}$

Πηγές κίνησης / κατηγορία : $N_1 = N_2 = 10$



Να βρεθεί η πιθανότητα απώλειας κλήσεων για κάθε κατηγορία κίνησης.

Απάντηση:

Αρχικά βρίσκουμε το σύνολο των δυνατών καταστάσεων για τις 2 κατηγορίες κλήσεων. Ισχύει ότι:

$$\Omega = \{n: 0 \leq n_k b_k \leq C\}$$

Άρα έχουμε $0 \leq 3n_1 + 2n_2 \leq 7$

Το Ω θα πρέπει να αποτελείται από καταστάσεις (n_1, n_2) οι οποίες πρέπει να ικανοποιούν την παραπάνω διπλή ανίσωση. Οι συνδυασμοί που προκύπτουν είναι οι εξής:

$$\Omega = \{(0, 0), (0, 1), (0, 2), (0, 3), (1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 0)\}$$

Οι πιθανότητες μπλοκαρίσματος / κατηγορία είναι :

- 1^η κατηγορίας κλήσεων: $j > C - b_1 \Rightarrow j > 7 - 3 \Rightarrow j > 4$
- 2^η κατηγορία κλήσεων: $j > C - b_2 \Rightarrow j > 7 - 2 \Rightarrow j > 5$

Οι 8 συνδυασμοί που προκύπτουν, οι οποίοι μπορούν να απεικονηθούν σε έναν ενιαίο πίνακα, με επιπλέον τον αριθμό κατειλημμένων μονάδων ευρους ζώνης (j) για κάθε ζευγάρι.

n_1	n_2	j
0	0	0
0	1	2
0	2	4
0	3	6
1	0	3
1	1	5
1	2	7
2	0	6



Όπως διακρίνουμε παραπάνω το σύστημα μας δεν έχει μοναδικές τιμές j , καθώς σε δύο καταστάσεις (0,3) & (2,0) έχουμε το ίδιο j ($j=6$) και ο αναδρομικός τύπος δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί καθώς δε μπορούμε να ξέρουμε τη μετάβαση που πρέπει να κάνουμε (συνεπώς κάθε διαφορετική κατάσταση και αν πέραμε θα μας έβγαζε διαφορετικά αποτελέσματα). Άρα το επόμενο βήμα για την επίλυση του προβλήματος είναι να φτιάξουμε ένα ισοδύναμο σύστημα στο οποίο θα περιλαμβάνει όλες τις προηγούμενες καταστάσεις όμως με διαφορετικά b_1, b_2 και C τέτοια ώστε να μας δίνουν μοναδικά j για κάθε κατάσταση.

Έστω $b_1 = 7, b_2 = 5$, και $C = 17$, το οποίο προκύπτει από το j_{max}

Φτιάχνουμε έναν πίνακα όπου θα απεικονίζει τις δυνατές καταστάσεις καθώς και τις καταστάσεις μπλοκαρίσματος της κλήσης στο σύστημα.

n_1	n_2	j	$j_{equivalent}$	P_{b_1}	P_{b_2}
0	0	0	0		
0	1	2	5		
0	2	4	10		
0	3	6	15	*	*
1	0	3	7		
1	1	5	12	*	
1	2	7	17	*	*
2	0	6	14	*	*

Συνεπώς τώρα που όλα τα j είναι μοναδικά, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον αναδρομικό τύπο:

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K (N_k - n_k + 1) a_k b_k q(j - b_k), \quad a_k = \frac{n_k}{\mu_k}$$

Υποθέτουμε ότι για $j = 0, q(0) = 1$ και έχουμε $\alpha_1 = 0, 3$ & $\alpha_2 = 0, 2$

$$\rightarrow j=5, \quad 5q(5) = (N_2 - n_2 + 1) a_2 b_2 q(5 - 5)$$



$$\Rightarrow 5q(5) = (10 - 1 + 1) \cdot 0,2 \cdot 5q(0)$$

$$\Rightarrow 5q(5) = 10q(0) \Rightarrow \mathbf{q(5) = 2}$$

$$\rightarrow \mathbf{j=10} \quad 10q(10) = (N_2 - n_2 + 1)a_2b_2q(10 - 5)$$

$$\Rightarrow 10q \cdot (10) = (10 - 2 + 1) \cdot 0,2 \cdot 5 \cdot q(5)$$

$$\Rightarrow 10q(10) = 9q(5) \Rightarrow \mathbf{q(10) = 1,8}$$

$$\rightarrow \mathbf{j=15} \quad 15q(15) = (N_2 - n_2 + 1)a_2b_2q(15 - 5)$$

$$\Rightarrow 15q(15) = (10 - 3 + 1) \cdot 0,2 \cdot 5 \cdot q(10) = 8q(10) = 8 \cdot 1,8$$

$$\Rightarrow q(15) = \frac{14,4}{15} \Rightarrow \mathbf{q(15) = 0,96}$$

$$\rightarrow \mathbf{j=7} \quad 7q(7) = (N_1 - n_1 + 1)a_1b_1q(7 - 7) = (10 - 1 + 1) \cdot 0,3 \cdot 7q(0)$$

$$\Rightarrow 7q(7) = 21 \cdot 1 \Rightarrow \mathbf{q(7) = 3}$$

$$\rightarrow \mathbf{j=12} \quad 12q(12) = (N_1 - n_1 + 1)a_1b_1q(12 - 7) +$$

$$(N_2 - n_2 + 1)a_2b_2q(12 - 5) = (10 - 1 + 1) \cdot 0,3 \cdot 7 \cdot q(5) +$$

$$(10 + 1 - 1) \cdot 0,2 \cdot 5 \cdot q(7)$$

$$\Rightarrow 12q(12) = 21 \cdot q(5) + 10 \cdot q(7) = 42 + 30 \Rightarrow \mathbf{q(12) = 6}$$

$$\rightarrow \mathbf{j=17} \quad 17q(17) = (N_1 - n_1 + 1)a_1b_1q(17 - 7) +$$

$$(N_2 - n_2 + 1)a_2b_2q(17 - 5) \Rightarrow 17q(17) = (10 - 1 + 1) \cdot 0,3 \cdot 7q(10) +$$

$$(10 - 2 + 1) \cdot 0,2 \cdot 5q(12) = 21q(10) + 9q(12) \Rightarrow \mathbf{q(17) = 5,4}$$

$$\rightarrow \mathbf{j=14} \quad 14q(14) = (N_1 - n_1 + 1)a_1b_1q(14 - 7) =$$

$$(10 - 2 + 1) \cdot 0,3 \cdot 7q(7) \Rightarrow 14q(14) = 18,9q(7) \Rightarrow \mathbf{q(14) = 1,35}$$



Εφόσον βρήκαμε τις τιμές $q(j)$, θα πρέπει να βρούμε και το αθροισμα αυτών G , το οποίο θα διαιρεί τις τιμές μία προς μία, όπως θα φανεί και στο τύπο.

$$G = \sum_{j=0}^{j_{max}=C} q(j) = \sum_{j=0}^{17} q(j) \Rightarrow G = 21,51$$

Άρα έχουμε:

➤ Απώλεια κλήσεων 1^{ης} κατηγορίας:

$$P_{b_1} = \sum_{j=11}^{17} \frac{q(j)}{G} = \frac{q(12) + q(14) + q(15) + q(17)}{G} = \frac{13,71}{21,51}$$

$$\Rightarrow P_{b_1} \approx 0,6373 \text{ ή } 63,7\%$$

➤ Απώλεια κλήσεων 2^{ης} κατηγορίας:

$$P_{b_2} = \sum_{j=13}^C \frac{q(j)}{G} = \frac{q(14) + q(15) + q(17)}{G} = \frac{7,71}{21,51}$$

$$\Rightarrow P_{b_2} \approx 0,3584 \text{ ή } 35,8\%$$

Εν τέλει, συμπεραίνουμε ότι ένα τέτοιο σύστημα δεν είναι αποδοτικό, καθώς η πιθανότητες απώλειας, ιδιαίτερα στη 1^η κατηγορία κλήσεων, είναι πολύ μεγάλη (παραπάνω από έξι στους δέκα μπλοκάρονται απο το σύστημα).

3.3.2 Προσεγγιστική μέθοδος Stasiak & Glabowski

Ο αναδρομικός τύπος απο τη μέθοδο των Stamatelos & Hayes αν και δίνει ακριβή αποτελέσματα δε θεωρείται και ο πιο αποδοτικός, ειδικά σε περιπτώσεις με μεγάλη χωρητικότητα συστήματος και πολλών κατηγοριών κίνησης, καθώς η εύρεση ενός ισοδύναμου συστήματος είναι δύσκολη.

Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος, οι Stasiak & Glabowski, πρότειναν μία προσεγγιστική μέθοδο, στην οποία:



- Υπολογίζουμε το EMLM σύστημα.
- Υπολογίζουμε τις κανονικοποιημένες τιμές $q(j)$ μέσω του αναδρομικού τύπου:

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k), \quad j = 1, 2, \dots, j_{max} = C \quad (\mathbf{Kaufman - Roberts})$$

Υποθέτοντας ότι: $q(0) = 1$ & $q(j) = 0, \forall j < 0$

- Βρίσκουμε σε κάθε κατάσταση j τη μέση τιμή των κλήσεων $y_k(j)$, το οποίο δίνεται από το ακόλουθο τύπο:

$$y_k(j) = \frac{a_k q(j - b_k)}{q(j)}, \quad j = \sum_{k=1}^K b_k y_k(j) \quad (3.15)$$

- Υπολογίζουμε τα $q(j)$ μέσω της σχέσης :

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K (N_k - y_k(j - b_k)) a_k b_k q(j - b_k), \quad a_k = \frac{n_k}{\mu_k} \quad (3.16)$$

Παρατηρούμε ότι αντικαταστάθηκε ο όρος $n_k - 1$ της προηγούμενης αναδρομικής σχέσης από τον όρο $y_k(j - b_k)$.

- Υπολογίζουμε τη πιθανότητα απώλειας μέσω του τύπου:

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_k+1}^C \frac{q(j)}{G} = \sum_{j=C-b_k+1}^C q'(j)$$

3.3.3 Παράδειγμα πάνω στη προσεγγιστική μέθοδο Stasiak & Glabowski.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Χωρητικότητα συστήματος: $C=9 \text{ b.u.}$

Απαιτήσεις ευρους ζώνης / κατηγορία: $b_1 = 1 \text{ b.u.}$ & $b_2 = 2 \text{ b.u.}$

Μέση τιμή αφίξεως / κατηγορία : $v_1 = 0.1 \text{ sec}$ & $v_2 = 0.2 \text{ sec}$

Ρυθμός εξυπηρέτησης: $\mu_1 = \mu_2 = 1 \text{ sec}$



Πηγές κίνησης / κατηγορία : $N_1 = N_2 = 10$ sources

Φορτίο κίνησης / πηγή: $\alpha_1 = \frac{\nu_1}{\mu_1} N_1 = 1erl$ & $\alpha_2 = \frac{\nu_2}{\mu_2} N_2 = 2erl$

→ Να βρεθεί η πιθανότητα μπλοκαρίσματος των κλήσεων ανά κατηγορία.

Απάντηση:

Υπολογισμός $q(j)$ μέσω του αναδρομικού τύπου Kaufman-Roberts (με βάση τα δεδομένα μας):

$$jq(j) = 1q(j-1) + 4q(j-2)$$

$$j=0 \quad q(0) = 1 \text{ (Υπόθεση)}$$

$$j=1 \quad q(1) = 1q(0) + 4q(-1) = 1 + 0 \Rightarrow q(1) = 1$$

$$j=2 \quad 2q(2) = 1q(1) + 4q(0) = 1 + 4 \Rightarrow q(2) = 2.5$$

$$j=3 \quad 3q(3) = 1q(2) + 4q(1) = 2.5 + 4 \Rightarrow q(3) = 2.16$$

$$j=4 \quad 4q(4) = 1q(3) + 4q(2) = 2.16 + 10 \Rightarrow q(4) = 3.04$$

$$j=5 \quad 5q(5) = 1q(4) + 4q(3) = 3.04 + 8.64 \Rightarrow q(5) = 2.34$$

$$j=6 \quad 6q(6) = 1q(5) + 4q(4) = 2.34 + 12.16 \Rightarrow q(6) = 2.41$$

$$j=7 \quad 7q(7) = 1q(6) + 4q(5) = 2.41 + 9.36 \Rightarrow q(7) = 1.68$$

$$j=8 \quad 8q(8) = 1q(7) + 4q(6) = 1.68 + 9.64 \Rightarrow q(8) = 1.41$$

$$j=9 \quad 9q(9) = 1q(8) + 4q(7) = 1.41 + 6.72 \Rightarrow q(9) = 0.9$$

Αθροίζουμε τα $q(j)$ έτσι ώστε μετά να πάρουμε τα κανονικοποιημένα $q'(j)$ για την εύρεση των $y_k(j)$ του επόμενου βήματος.

$$G = \sum_{j=0}^{j_{max}=C} q(j) = \sum_{j=0}^7 q(j) \Rightarrow G = 18.47$$



Άρα έχω:

$$q'(0) = 0.054121$$

$$q'(1) = 0.054121$$

$$q'(2) = 0.135303$$

$$q'(3) = 0.117263$$

$$q'(4) = 0.164619$$

$$q'(5) = 0.126734$$

$$q'(6) = 0.130868$$

$$q'(7) = 0,091115$$

$$q'(8) = 0,076824$$

$$q'(9) = 0,049031$$

Μέση τιμή των κλήσεων: $y_k(j) = \frac{a_k q'(j-b_k)}{q'(j)}$

$y_1(j)$	$y_2(j)$	j
0	0	0
1	0	1
0,4	0,8	2
1,16	0,92	3
0,72	1,64	4
1,3	1,85	5
0,96	2,52	6
1,44	2,78	7
1,2	3,4	8
1,56	3,72	9

Παρατηρούμε ότι από το $j = \sum_{k=1}^K b_k y_k$, μπορούμε να επαληθεύσουμε τα y_k .

Πράγματι, για $j = 5$ έχουμε: $b_1 y_1 + b_2 y_2 = 1,3 + 2 \cdot 1,85 = 5$



Τέλος, μέσω του παρακάτω αναδρομικού τύπου, βρίσκουμε τα $q(j)$ και ακολουθούμε παρόμοια διαδικασία με αυτή της εύρεσης πιθανότητας απώλειας κλήσεων με τη προσεγγιστική μέθοδο Stamatelos & Hayes.

$$jq(j) = \sum_{k=1}^K (N_k - y_k(j - b_k)) a_k b_k q(j - b_k), \quad a_k = \frac{n_k}{\mu_k}$$

$$q'(0) = 0,0641 \quad q'(1) = 0,0641 \quad q'(2) = 0,1570 \quad q'(3) = 0,1357$$

$$q'(4) = 0,1745 \quad q'(5) = 0,1310 \quad q'(6) = 0,1162 \quad q'(7) = 0,0760$$

$$q'(8) = 0,0516 \quad q'(9) = 0,0294$$

Άρα έχω:

- 1^{ης} κατηγορίας κλήσεων:

$$P_{b_1} = \sum_{j=c-b_1+1}^c q'(j) = \sum_{j=9}^9 q'(j) = 0,0294 \text{ ή } \approx 2,9\%$$

- 2^{ης} κατηγορίας κλήσεων:

$$P_{b_2} = \sum_{j=c-b_2+1}^c q'(j) = \sum_{j=8}^9 q'(j) = 0,081 \text{ ή } \approx 8\%$$

3.4 Μοντέλα Επανάκλησης (Retry Model)

Τα μοντέλα απλής επανάκλησης **SRM** (Single Retry Model), είναι μοντέλα που όταν μια κλήση δεν γίνει αρχικά αποδεκτή απο το τηλεπικοινωνιακό μας σύστημα, να ξαναστείλει αίτημα εξυπηρέτησης, αλλά με κάποιο κόστος. Ακολουθούν την διαδικασία Poisson στις αφίξεις των κλήσεων ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης των κλήσεων ακολουθεί την εκθετική κατανομή. Το εύρος ζώνης που θα διαθετηθεί για αυτήν την κλήση θα είναι μικρότερο απο το προαπαιτούμενο της ($b_k > b_{k_r}$), αλλά ο χρόνος εξυπηρέτησης της (μέση τιμή) κατά την επανάκληση θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος ($\mu_k < \mu_{k_r}$). (Ουτως ώστε να εξισορροπεί την απώλεια.)



Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, χρησιμοποιείται η πολιτική της πλήρους διάθεσης (CS Policy), και ο αριθμός κατηγοριών κίνησης για λόγους κατανοήσης του μοντέλου θεωρείται δύο ($K=2$).

Μια κλήση η οποία έχει κάνει επανάκληση, είναι πετυχημένη όταν:

$$C - b_{k_r} \leq j \leq C - b_k, \quad \mu\epsilon \quad j = \sum_{k=1}^K (n_k b_k + n_{k_r} b_{k_r}) \quad (3.17)$$

«Θεωρούμε ότι οι κλήσεις της δεύτερης κατηγορίας κίνησης έχουν παραμέτρους επανάκλησης, ενώ οι κλήσεις της πρώτης κατηγορίας όχι». [2]

Για την εύρεση πιθανότητας μπλοκαρίσματος των κλήσεων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε τη κλασική μέθοδο επίλυσης γραμμικών εξισώσεων (όπως στο EMLM, EnMLM) είτε να μέσω ενός αναδρομικού τύπου που έχει κατασκευαστεί, ο οποίος είναι: [20]

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{k_r} b_{k_r} y_k(j) q(j - b_{k_r}) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.18)$$

Με $a_k = \frac{\lambda_{k_r}}{\mu_{k_r}}$ και $y_k(j) = \begin{cases} 1, & j > C - (b_k - b_{k_r}) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$, όπου a_k το προσφερόμενο φορτίο κίνησης και y_k η μέση τιμή των κλήσεων.

Εφόσον βρεθούν οι κατηγορίες κλήσεων $q(j)$, η πιθανότητα απωλειών κλήσεων κατά την επανάκληση, είναι :

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_{k_r}+1}^C \frac{q(j)}{G} \quad (3.19)$$

ενώ για να βρεθεί η δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης κατά την επανάκληση ο τύπος διαμορφώνεται ως εξής:

$$P_{b_{k_r}} = \frac{P_{b_k}}{P'_{b_k}} \quad (3.20)$$

$$\text{Με } P_{b_k} = \sum_{j=C-b_{k_r}+1}^C \frac{q(j)}{G} \text{ και } P'_{b_k} = \sum_{j=C-b_k+1}^C \frac{q(j)}{G} \quad \text{και } G = \sum_{j=0}^C q(j)$$



3.4.1 Παράδειγμα πάνω στο Μοντέλο απλής Επανάνκλησης.

Το παράδειγμα που θα αναφερθεί, θα λυθεί μέσω του προαναφερόμενου αναδρομικού τύπου. Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Εύρος ζώνης $C=16$

Κατηγορίες κίνησης $K=2$

Εύρος ζώνης / κατηγορία: $b_1 = 3, b_2 = 12, b_{2r} = 8$

Προσφερόμενο φορτίο κίνησης/κατηγορία: $\alpha_1 = 0.3, \alpha_2 = 0.2, \alpha_{2k} = 0.4$

Ρυθμός άφιξης: $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$

Ρυθμός εξυπηρέτησης: $\mu_1 = \mu_2 = 1, \mu_{2r} = 2,5$

→ Να βρεθεί η πιθανότητα απώλειας κλήσεως δεδομένου ότι έχει απορριφθεί από την πρώτη απόπειρα.

Απάντηση:

Χρησιμοποιώντας τον αναδρομικό τύπο έχω:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{k_r} b_{k_r} y_k(j) q(j - b_{k_r}) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

$$q(0) = 1 \quad q(1) = 0 \quad q(2) = 0 \quad q(3) = 0,3 \quad q(4) = 0$$

$$q(5) = 0 \quad q(6) = 0,045 \quad q(7) = 0 \quad q(8) = 0 \quad q(9) = 0,0045$$

$$q(10) = 0 \quad q(11) = 0 \quad q(12) = 0,2003 \quad q(13) = 0 \quad q(14) = 0,0102$$

$$q(15) = 0,0600 \quad q(16) = 0$$

$$\text{Με άθροισμα των } G \text{ των } q(j): G = \sum_{j=0}^C q(j) = \sum_{j=0}^{16} q(j) = 1,6201$$

Άρα έχω:



- Για 1^η κατηγορία κίνησης χωρίς επανάκληση

$$P_{b_1} = \sum_{j=14}^{16} \frac{q(j)}{G} = \frac{q(14) + q(15) + q(16)}{G} = 0,0433 \text{ ή } \approx 4,33\%$$

- Για 2^η κατηγορία κίνησης χωρίς επανάκληση

$$P_{b_2} = \sum_{j=5}^{16} \frac{q(j)}{G} = \frac{q(5) + \dots + q(14) + q(15) + q(16)}{G} = 0,1976 \text{ ή } \approx 19,76\%$$

- Για 2^η κατηγορία κίνησης με επανάκληση

$$P_{b_2} = \sum_{j=9}^{16} \frac{q(j)}{G} = \frac{q(9) + q(10) + \dots + q(16)}{G} = 0,1698 \text{ ή } \approx 16,98\%$$

Και έχω $P'_{b_2} = 0,1924$ πιθανότητα απώλειας κλήσης χωρίς επανάκληση. Άρα τελικά θα έχω:

$$P_{b_{22}} = \frac{P_{b_2}}{P'_{b_2}} = \frac{0,1698}{0,1924} = 0,8825 \text{ ή } \approx 88,25\%$$

3.4.2 Μοντέλο Πολλαπλής Επανάκλησης (Multi retry model, MRM).

Το μοντέλο αυτό, θεωρείται επέκταση του μοντέλου απλής επανάκλησης, καθώς τώρα ο χρήστης μπορεί να απαιτήσει σύνδεση στο σύστημα ξανά, περισσότερες από δύο φορές. ($r_1, r_2, r_3, \dots, r_s$ με $b_r > b_{r_1} > b_{r_2} > b_{r_3} > \dots > b_{r_s}$). Για κάθε κίνηση K θεωρείται διαφορετικός από το σύστημα αριθμός επανάκλησης ο οποίος θα συμβολιστεί ως $S(k)$. Σύμφωνα με τα δεδομένα της προηγούμενης παραγράφου, το μοντέλο πολλαπλής επανάκλησης βασίζεται πάνω στην ιδεολογία. Δηλαδή για την εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσεων σε ένα σύστημα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε γραμμικές εξισώσεις και επίλυση αυτών (εξισώσεις τοπικής ισορροπίας, ρυθμός εισόδου=ρυθμός εξόδου) είτε μέσω του προσεγγιστικού αναδρομικού τύπου που αναφέρθηκε, απλά τώρα ο τύπος θα παραμετροποιηθεί έτσι ώστε να δέχεται περισσότερες επανακλήσεις.



Ο τύπος της απλής επανάκληση είναι:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{k_r} b_{k_r} y_k(j) q(j - b_{k_r}) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Για να μπορέσουμε να επεκτείνουμε το τύπο, θα πρέπει να παραμετροποιήσουμε το δεύτερο μέρος του $q(j)$ για $j = 0, 1, 2, \dots, C$. Σε κάθε κίνηση κλήσεων K , όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται διαφορετικός αριθμός επανακλήσεων. Οπότε για να προσθεθούν αυτές οι επανακλήσεις, αρκεί να προσθέσουμε ένα άθροισμα παραπάνω στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης $\sum_{k=1}^K a_{k_r} b_{k_r} y_k(j) q(j - b_{k_r})$, έτσι ώστε να τις υποδηλώσουμε. Άρα ο νέος τύπος πολλαπλής επανάκλησης μετατρέπεται σε:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \left(\sum_{s=1}^{s_{max}} a_{k_{r_s}} b_{k_{r_s}} y_{k_s}(j) q(j - b_{k_{r_s}}) \right) \right), & j = 1, 2, \dots, C \quad (3.21) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

$$\text{με } a_{k_{r_s}} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_{r_s}}} \text{ και } y_k(j) = \begin{cases} 1, & j > C - (b_{k_{r_{s-1}}} - b_{k_{r_s}}) \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Για να θεωρηθεί μια κλήση επανάκλησης επιτυχής αρκεί να ισχύει:

$$j > C - (b_{k_{r_{s-1}}} - b_{k_{r_s}})$$

Εφόσον βρεθούν οι κατηγορίες κλήσεων $q(j)$, τότε η πιθανότητα απώλειας κλήσεων βρίσκεται απο τον ίδιο τύπο της απλής επανάκλησης με κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις. Αυτές είναι:

$$P_{b_{k_{r_s}}} = \frac{P_{b_k}}{P'_{b_k}} \quad (3.22)$$

$$\text{Με } P_{b_k} = \sum_{j=C-b_{k_{r_s}(k)}+1}^C \frac{q(j)}{G} \text{ και } P'_{b_k} = \sum_{j=C-b_{k_{r_{s-1}}}+1}^C \frac{q(j)}{G} \text{ και } G = \sum_{j=0}^C q(j)$$



3.4.3 Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο πολλαπλής επανάκλησης

Εφαρμογή του μοντέλου πολλαπλής επανάκλησης MRM, θα γίνει μέσω του αναδρομικού τύπου σε προγραμματιστικό περιβάλλον C με 3 επανακλήσεις για τη 2^η κατηγορία κλήσεων.

Έστω λοιπόν ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Εύρος ζώνης C=20

Κατηγορίες κίνησης K=2

Εύρος ζώνης / κατηγορία: $b_1 = 2, b_2 = 5, b_{2r_1} = 4, b_{2r_2} = 2, b_{2r_3} = 1$

Προσφερόμενο φορτίο κίνησης/κατηγορία: $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.4, \alpha_{2r_1} = 0.6, \alpha_{2r_2} = 1.2$ και $\alpha_{2r_3} = 1.6$

Ρυθμός άφιξης: $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$

Ρυθμός εξυπηρέτησης: $\mu_1 = 1, \mu_2 = 2.5, \mu_{2r_1} \approx 1.6666, \mu_{2r_2} \approx 0.8333, \mu_{2r_3} = 0.625$

Να βρεθούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων ανά κατηγορία καθώς και οι δεσμευμένες πιθανότητες των επανακλήσεων.

Απάντηση:

Αρχικά μέσω του αναδρομικού τύπου βρίσκουμε τα $q(j)$ και τα $q'(j)$.

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \left(\sum_{s=1}^{s_{max}} a_{kr_s} b_{kr_s} y_{ks}(j) q(j - b_{kr_s}) \right) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

Με $q'(j) = \frac{q(j)}{G}$ και $G = \sum_{j=0}^C q(j) = 4.054618$

j	$q(j)$	$q'(j)$
0	1.000000	0.246632
1	0.000000	0.000000
2	1.000000	0.246632
3	0.000000	0.000000



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

4	0.500000	0.123316
5	0.400000	0.098653
6	0.166667	0.041105
7	0.400000	0.098653
8	0.041667	0.010276
9	0.200000	0.049326
10	0.088333	0.021786
11	0.066667	0.016442
12	0.081389	0.020073
13	0.016667	0.004111
14	0.040198	0.009914
15	0.014000	0.003453
16	0.013358	0.003295
17	0.011222	0.002768
18	0.003336	0.000823
19	0.006830	0.001685
20	0.004283	0.001056

Άρα απο τα παραπάνω στοιχεία, καταλήγουμε στο:

- Πιθανότητα απώλειας κλήσεων εύρους b_k :

$$\rightarrow Pb_1 = \sum_{j=19}^{20} q'(j) = 0.002741 \text{ ή } \approx 0,27\%$$

$$\rightarrow Pb_2 = \sum_{j=16}^{20} q'(j) = 0.009626 \text{ ή } \approx 0,96\%$$

- Πιθανότητα απώλειας κλήσεων εύρους $b_{2,r}$:

$$\rightarrow Pb_{2,r1} = \sum_{j=17}^{20} q'(j) = 0.006332 \text{ ή } \approx 0,63\%$$

$$\rightarrow Pb_{2,r2} = \sum_{j=19}^{20} q'(j) = 0.002741 \text{ ή } \approx 0,27\%$$

$$\rightarrow Pb_{2,r3} = \sum_{j=20}^{20} q'(j) = 0.001056 \text{ ή } \approx 0,1\%$$

- Δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης με προϋπόθεση ότι η προηγούμενη ήταν ανεπιτυχής:

$$\rightarrow P'b_{2,r1} = \frac{P_{b_{2,r1}}}{P_{b_2}} = 0.657747 \text{ ή } \approx 65,77\%$$



$$\rightarrow P' b_{2r2} = \frac{P_{b_{2r2}}}{P_{b_{2r1}}} = 0.432908 \text{ ή } \approx 43,29\%$$

$$\rightarrow P' b_{2r3} = \frac{P_{b_{2r3}}}{P_{b_{2r2}}} = 0.385415 \text{ ή } \approx 38,54\%$$

3.5 Μοντέλο απλού Κατωφλιού (Single Threshold Model, STM)

Το μοντέλο κατωφλιού είναι ένα μοντέλο απωλειών στο οποίο οι κλήσεις εξαρτώνται από τον αριθμό j των κατειλημμένων μονάδων εύρους ζώνης του συστήματος. Το σύστημα μας δίνει ένα προκαθορισμένο αριθμό, **έστω J_0** , ο οποίος ορίζει το όριο ενός κατωφλιού. Όταν ο αριθμός j είναι μεγαλύτερος του J_0 ($j > J_0$), τότε η κλήση απορρίπτεται και προσπαθεί να συνδεθεί με νέο εύρος ζώνης b_{k_c} και νέο ρυθμό εξυπηρέτησης μ_{k_c} , στα οποία πρέπει να ισχύουν:

$$b_k > b_{k_c} \text{ και } \frac{1}{\mu_k} < \frac{1}{\mu_{k_c}} \Rightarrow \mu_{k_c} < \mu_k$$

Η διαδικασία άφιξης ακολουθεί την κατανομή Poisson και ο χρόνος εξυπηρέτησης ακολουθεί την εκθετική κατανομή, ενώ θεωρούμε ότι ο καθορισμός θέσεων εύρους ζώνης, γίνεται με την πολιτική πλήρους διάθεσης CS policy (Complete Sharing policy). Επίσης, ο αριθμός κατηγοριών κίνησης για λόγους κατανόησης του μοντέλου θεωρείται δύο ($K=2$).

Όπως και στα 2 προηγούμενα κλασσικά μοντέλα απωλειών, το μοντέλο κατωφλιού μπορεί να χρησιμοποιήσει δύο μεθόδους για την εύρεση της πιθανότητας μπλοκαρίσματος μίας κλήσης από το σύστημα, οι οποίες είναι:

- Επίλυση γραμμικών εξισώσεων (Εξισώσεις Σφαιρικής Ισορροπίας) όπως στα μοντέλα του Erlang και του Engset. (χρονοβόρα και πολύπλοκη διαδικασία)
- Επίλυση μέσω αναδρομικού-προσεγγιστικού τύπου

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k \delta_k(j) q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{k_c} b_{k_c} \delta_{k_c}(j) q(j - b_{k_c}) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.23)$$



$$\text{Με } a_{k_c} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_c}}, \delta_k(j) = \begin{cases} 1, & 1 \leq j \leq J_o + b_{k_c} \text{ και } b_{k_c} > 0 \text{ ή } 1 \leq j \leq C \text{ και } b_{k_c} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$
$$\delta_{k_c}(j) = \begin{cases} 1, & j > J_o + b_{k_c} \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.24)$$

με δ_k = πιθανότητα ευρεσης κλήσης στο σύστημα με εύρος ζώνης b_k .

Εφόσον βρεθούν οι κατηγορίες κίνησης $q(j)$ η πιθανότητα απώλειας μια κλήσης απο το σύστημα δεδομένου ότι η χωρητικότητα του συστήματος είναι μεγαλύτερη απο αυτή που ορίζει το κατώφλι ($j > J_o$) δίνεται απο το παρακάτω τύπο:

$$P_{b_{k_c}} = \frac{\sum_{j=C-b_{k_c}+1}^C q(j)}{\sum_{j=J_o+1}^C q(j)} \quad (3.25)$$

,ενώ η πιθανότητα απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης b_{k_c} είναι:

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_{k_c}+1}^C \frac{q(j)}{G} \text{ και } G = \sum_{j=0}^C q(j) \quad (3.26)$$

«Θεωρούμε ότι οι κλήσεις της δεύτερης κατηγορίας κίνησης έχουν παραμέτρους διαφοροποίησης κατωφλιού, ενώ οι κλήσεις της πρώτης κατηγορίας όχι». [2]

3.5.1 Παράδειγμα πάνω στο μοντέλου απλού κατωφλιού.

Έστω λοιπόν ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Εύρος ζώνης $C=10$

Κατηγορίες κίνησης $K=2$ και όριο κατωφλιού $J_o=7$

Εύρος ζώνης / κατηγορία: $b_1 = 4, b_2 = 3, b_{2_1} = 1$

Προσφερόμενο φορτίο κίνησης/κατηγορία: $\alpha_1 = 2, \alpha_2 = 1, \alpha_{2_{c1}} = 1,5$

Ρυθμός άφιξης: $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$

Ρυθμός εξυπηρέτησης: $\mu_1 = 0,5, \mu_2 = 1, \mu_{2_{c1}} \approx 0.6666$

Να βρεθούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων ανά κατηγορία καθώς και οι δεσμευμένες πιθανότητες των επανακλήσεων.



Απάντηση:

Μέσω του αναδρομικού τύπου έχω:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k \delta_k(j) q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{k_c} b_{k_c} \delta_{k_c}(j) q(j - b_{k_c}) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

j	$q(j)$	$q'(j)$
0	1.0	0.099256
1	0.0	0.000000
2	0.0	0.000000
3	1.0	0.099256
4	2.0	0.198511
5	0.0	0.000000
6	0.5	0.049628
7	2.0	0.198511
8	2.0	0.198511
9	0.5	0.049628
10	1.075	0.106700

Άρα απο τα παραπάνω στοιχεία, καταλήγουμε στο:

- Πιθανότητα απώλειας κλήσεων εύρους b_k :

$$\rightarrow P b_1 = \sum_{j=7}^{10} q'(j) = 0.553350 \text{ ή } \approx 55,33\%$$

$$\rightarrow P b_2 = \sum_{j=8}^{10} q'(j) = 0.354839 \text{ ή } \approx 35,48\%$$

- Πιθανότητα απώλειας κλήσεων εύρους b_{2_c} :

$$\rightarrow P b_{2_{c1}} = \sum_{j=10}^{10} q'(j) = 0.106700 \text{ ή } \approx 10,67\%$$



- Δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης με προϋπόθεση ότι η προηγούμενη ήταν ανεπιτυχής:

$$\rightarrow P' b_{2_{c1}} = \frac{\sum_{j=10}^{10} q(j)}{\sum_{j=8}^C q(j)} = 0.300699 \text{ ή } \approx 30.07\%$$

3.5.2 Μοντέλο Πολλαπλών κατωφλιών (Multi Threshold Model, MTM).

Το μοντέλο πολλαπλών κατωφλιών θεωρείται η επέκταση του προηγούμενου μοντέλου STM, όπου τώρα μία κλήση μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα απο τα S πλήθη κατώφλια για να εξυπηρετηθεί. Οι προαπαιτήσεις είναι οι ίδιες με αυτές του STM ($\mathbf{b}_k > \mathbf{b}_{k_{c1}} > \dots > \mathbf{b}_{k_{cs}} \ \& \ \mu_{k_{cs}} < \dots < \mu_{k_{c1}} < \mu_k$), και μία κλήση χρησιμοποιεί ένα s κατώφλι ($s = 1, 2, 3, \dots, S$) όταν ισχύει $J_{s-1} \leq j \leq J_s$. ($J_{s+1} = C$).

Η επίλυση γίνεται πάλι είτε μέσω γραμμικών εξισώσεων είτε μέσω ενός αναδρομικού-προσεγγιστικού τύπου. Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε τον αναδρομικό προσεγγιστικό τύπο που χρησιμοποιήσαμε στο μοντέλο απλού κατωφλιού, με κάποιες τροποποιήσεις σε αυτόν για την επέκταση του. Εφόσον θέλουμε να προσθέσουμε παραπάνω απο ένα κατώφλια στο σύστημα μας, ο τύπος πρέπει να επεκταθεί όταν $j \in [1, C]$. Γι' αυτό αρκεί ένα άθροισμα των κατωφλιών S στο σύστημα ανά κατηγορία κίνησης k . Άρα έχουμε το νέο αναδρομικό τύπο:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k \delta_k(j) q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (a_{k_{cs}} b_{k_{cs}} \delta_{k_{cs}}(j - b_{k_{cs}})) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\text{Με } a_{k_{cs}} = \frac{\lambda_k}{\mu_{k_{cs}}},$$

$$\delta_k(j) = \begin{cases} 1, & 1 \leq j \leq J_o + b_k \text{ και } b_{k_{cs}} > 0 \text{ ή } 1 \leq j \leq C \text{ και } b_{k_{cs}} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.28)$$

$$\delta_{k_{cs}}(j) = \begin{cases} 1, & J_s + b_{k_{cs}} \geq j \geq J_{s-1} + b_{k_{cs}} > 0 \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.29)$$

Εφόσον βρεθούν οι κατηγορίες κίνησης $q(j)$ η πιθανότητα απώλειας μιας κλήσης η οποία βρίσκεται σε κάποιο κατώφλι δίνεται απο το παρακάτω τύπο:



$$P_{b_{k_c}} = \frac{\sum_{j=c-b_{k_{c_s}}+1}^c q(j)}{\sum_{j=J_s+1}^c q(j)} \quad (3.30)$$

Ενώ η πιθανότητα απώλειας κλήσεων μιας κατηγορίας k με εύρος ζώνης b_{k_c} είναι:

$$P_{b_k} = \sum_{j=c-b_{k_{c_s}}+1}^c \frac{q(j)}{G} \text{ και } G = \sum_{j=0}^c q(j) \quad (3.31)$$

3.5.2 Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο των πολλαπλών κατωφλιών.

Έστω λοιπόν ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Εύρος ζώνης C=10

Κατηγορίες κίνησης K=2

Εύρος ζώνης / κατηγορία: $b_1 = 2, b_2 = 6, b_{2_1} = 3, b_{2_2} = 1$

Προσφερόμενο φορτίο κίνησης/κατηγορία: $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0.5, \alpha_{2_{c1}} = 1, \alpha_{2_{c2}} = 1.5$

Ρυθμός άφιξης: $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$

Ρυθμός εξυπηρέτησης: $\mu_1 = 1, \mu_2 = 2, \mu_{2_{c1}} = 1, \mu_{2_{c2}} \approx 0.66667$

Όρια πρώτου κατωφλιού $J_o = 7$ και όρια δεύτερου κατωφλιού $J_1 = 9$

Να βρεθούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεων ανά κατηγορία καθώς και οι δεσμευμένες πιθανότητες των κατωφλιών.

Απάντηση:

Σύμφωνα με τον αναδρομικό προσεγγιστικό τύπο έχω:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ \frac{1}{j} \left(\sum_{k=1}^K a_k b_k \delta_k(j) q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^S (a_{k_{c_s}} b_{k_{c_s}} \delta_{k_{c_s}}(j - b_{k_{c_s}})) \right), & j = 1, 2, \dots, C \\ 0, & \text{αλλού} \end{cases}$$

j	q(j)	q'(j)
0	1,0000	0,0296
1	1,5000	0,0444
2	2,1250	0,0629
3	3,0625	0,0907



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

4	3,3359	0,0988
5	3,5008	0,1037
6	4,0184	0,1191
7	3,9339	0,1166
8	3,8519	0,1141
9	3,8765	0,1149
10	3,5328	0,1047

Με σταθερά κανονικοποίησης $G=33,7376$

Άρα απο τα παραπάνω στοιχεία, καταλήγουμε στο:

- Πιθανότητα απώλειας κλήσεων εύρους b_k :

$$\rightarrow Pb_1 = \sum_{j=9}^{10} q'(j) = 0.219614 \text{ ή } \approx 21,96\%$$

$$\rightarrow Pb_2 = \sum_{j=5}^{10} q'(j) = 673260 \text{ ή } \approx 67,32\%$$

- Πιθανότητα απώλειας κλήσεων εύρους b_{2c} :

$$\rightarrow Pb_{2c1} = \sum_{j=8}^{10} q'(j) = 0.333786 \text{ ή } \approx 33,37\%$$

$$\rightarrow Pb_{2c2} = \sum_{j=10}^{10} q'(j) = 0.104713 \text{ ή } \approx 10,47\%$$

- Δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης με προϋπόθεση ότι η προηγούμενη σύνδεση στο κατώφλι ήταν ανεπιτυχής και προσπαθεί να συνδεθεί στο νέο με καινούργιες απαιτήσεις:

$$\rightarrow P'b_{2c1} = \frac{\sum_{j=8}^{10} q(j)}{\sum_{j=7}^C q(j)} = 0.741108 \text{ ή } \approx 74,11\%$$

$$\rightarrow P'b_{2c2} = \frac{\sum_{j=10}^{10} q(j)}{\sum_{j=9}^C q(j)} = 0.476807 \text{ ή } \approx 47,68\%$$



Κεφάλαιο 4

4.1 Διασύνδεση X2 στο LTE πρότυπο.

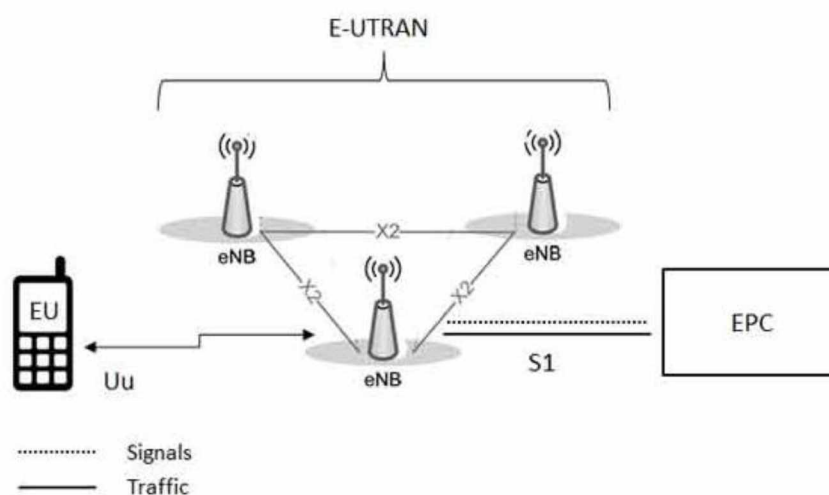
Με το πέρασμα του χρόνου, η απαιτητικότητα για κινητή επικοινωνία έγινε ολοένα και πιο διαδεδομένη. Αρχικά η έμφαση δινόταν μόνο στην ομιλία καθώς η ανάπτυξη του Διαδικτύου ήταν ακόμα στο πρωταρχικό της στάδιο. Βασισμένο στη λογική της μεταγωγής κυκλώματος, λοιπόν, άρχισαν οι πρώτες ασύρματες επικοινωνίες, οι οποίες είχαν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης αποτρέποντας με αυτό το τρόπο την δυνατότητα ύπαρξης υπηρεσιών δεδομένων. Η εκκίνηση έγινε με την εισαγωγή στα συστήματα της λογικής μεταγωγής πακέτου, η οποία αύξησε δραματικά το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας. Ειδικά με το πέρασμα του χρόνου και την εφαρμογή των διαφορετικών προτύπων (Αρχικά GPRS και στη συνέχεια LTE πρότυπου), η ανάγκη για υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό τη μείωση του κόστους ανα μεταφερόμενο bit, έφερε τον ανασχεδιασμό των αρχιτεκτονικών προτύπων. Στα ασύρματα συστήματα επικοινωνιών 4^{ης} γενιάς (4G, LTE), η μετάδοση υπηρεσιών δεδομένων καθώς και η μετάδοση φωνής (VoIP) βασίζεται εξ' ολοκλήρου στο πρωτόκολλο IP. Επίσης έγινε αφαίρεση του συντονιστή RNC από το δίκτυο πυρήνα (Core Network) ο οποίος συντόνιζε τους σταθμούς βάσης NB. Η αντικατάσταση της λειτουργίας αυτής έγινε από τη **διεπαφή X2**, η οποία λαμβάνει χώρα από τους ίδιους τους σταθμούς βάσεων (eNBs) και ρόλος της είναι ο συντονισμός αυτών.

Κύριος Ρόλος της διεπαφής X2 είναι η μεταφορά ελέγχου και δεδομένων των χρηστών από τον ένα σταθμό βάσης στον άλλον, τον οποίο πετυχαίνει με δύο επίπεδα επικοινωνίας:

- **X2-CP (X2-Control Plane)**, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων ελέγχου μεταξύ των σταθμών βάσης χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SCTP (Stream Control Transmission Protocol).
- **X2-UP (X2-User Plane)**, το οποίο χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων των χρηστών χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο GTP-U (GPRS Tunneling Protocol-User).

Η μεταφορά των δεδομένων βασίζεται εξ'ολοκλήρου στο πρωτόκολο IP υποστηρίζοντας ποικίλες σημαντικές λειτουργίες για την επίτευξη ροής δεδομένων και φωνής στο σύστημα όπως:

- 1) **Μεταπομπή (Handover)**: Μεταφορά της κινητικότητας ενός τερματικού χρήστη UE από τον ένα σταθμό βάσης σε έναν άλλον.
- 2) **Διαχείριση φορτίου (Load Management)**: Διαμοιρασμός πληροφοριών μεταξύ των σταθμών βάσεων για την αποδοτικότερη κατανομή χρηστών και φορτίων στο δίκτυο.
- 3) **Συντονισμένη μετάδοση ή λήψη πολλαπλών σημείων CoMP (Co-ordinated Multipoint Transmission or Reception)**: Συντονισμός των γειτονικών κόμβων με επίτευξη την μείωση των παρεμβολών μεταξύ τους (interference level).
- 4) **Βελτιστοποίηση κινητικότητας (Mobility Optimization)**.
- 5) **Βελτιστοποίηση Δικτύων (Network Optimization)**.
- 6) **Ενημέρωση (update)** της διαμόρφωσης των eNBs, **ενεργοποίηση** των κυψελών και των γειτονικών σταθμών βάσης.
- 7) **Γενική διαχείριση της διεπαφής X2**. (General Management): Αρχικοποίηση και επαναφορά της διεπαφής.



Σχήμα 13: Διασύνδεση X2 μεταξύ κόμβων [S7]



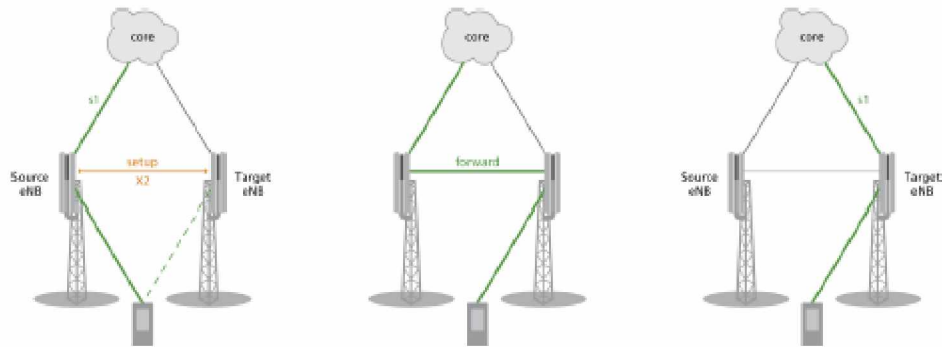
4.2 Κινητικότητα και μεταπομπή μέσω της διεπαφής X2.

Η κινητικότητα (mobility) στη διεπαφή X2 διαφέρει ανάλογα των προδιαγραφών της Ποιότητας της Εξυπηρέτησης (QoS) κάθε φορέα που λαμβάνει απο τη διεπαφή S1 και κατηγοριοποιείται με την ελαστικότητα του στην απώλεια πακέτων κατά τη παράδοση. Διακρίνονται στην **απρόσκοπτη παράδοση (seamless)**, όπου έχουμε μειωμένο χρόνο διακοπής εν κινήση του τερματικού UE και στην **παράδοση χωρίς απώλειες (lossless)**, όπου η απώλεια πακέτων δεν είναι εφικτή. Ένας σταθμός eNB χρησιμοποιεί αυτή τη μέθοδο παράδοσης που έχει οριστεί απο το φορέα.

Η μεταπομπή (handover) θεωρείται μια διαδικασία όπου ένας κινούμενος χρήστης αφήνει την προφερόμενη κάλυψη ενός σταθμού βάσης και μετακινείται σε έναν άλλο όπου η κάλυψη είναι αποδοτικότερη. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να σταλούν κάποια δεδομένα χρήστη και κάποια δεδομένα ελέγχου απο τον ένα σταθμό βάσης στον άλλον μέσω της διεπαφής X2. Η όλη αυτή διαδικασία απαιτεί διακοπή της σύνδεσης για λίγα msec (περίπου 25msec για τα LTE), αποκαθιστώντας την κλήση στο νέο σταθμό βάσης.

Βασικά χαρακτηριστικά της μεταπομπής στα LTE δίκτυα με βάση της διεπαφή X2 είναι: [1]

- Η απευθείας παράδοση μεταξύ των σταθμών βάσεων γίνεται σε αμελητέο χρόνο.
- Η προώθηση των δεδομένων μπορεί να λειτουργήσει ανά φορέα προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απώλεια δεδομένων.
- Η Μονάδα διαχείρισης Κινητικότητας MME (Mobile Management Entity) ενημερώνεται μόνο στο τέλος της διαδικασίας παράδοσης, όταν η μεταπομπή είναι επιτυχής, προκειμένου να ενεργοποιήσει το διακόπτη διαδρομής
- Η απελευθέρωση των πόρων απο τη πλευρά της πηγής ενεργοποιείται άμεσα απο τον κόμβο eNB στόχο (Target eNB).



Σχήμα 14: Η μεταπομπή (handover) στη διεπαφή X2 [S1]

Η διαδικασία της μεταπομπής ακολουθεί τρεις φάσεις, οι οποίες είναι:

- **Φάση προετοιμασίας (Preparation Phase)**

Λαμβάνει χώρα όταν ένας τερματικός χρήστης UE φτάνει στα όρια κάλυψης ενός σταθμού βάσης και ανιχνεύει σήμα από γειτονικούς σταθμούς βάσης. Αν κριθεί απαραίτητη η μεταπομπή του σήματος, τότε ο τωρινός σταθμός βάσης Source-eNB στέλνει ένα αίτημα μεταπομπής (Handover Request Message) προς το νέο σταθμό βάσης Target-eNB μέσω της διεπαφής X2. Αν επιβεβαιωθεί επιτυχώς και νέος σταθμός έχει επαρκείς πόρους, τότε ξεκινάει η διαδικασία της μεταπομπής και ο Target-eNB στέλνει πληροφορίες ταυτοποίησης και ασφάλειας πίσω στον Source-eNB.

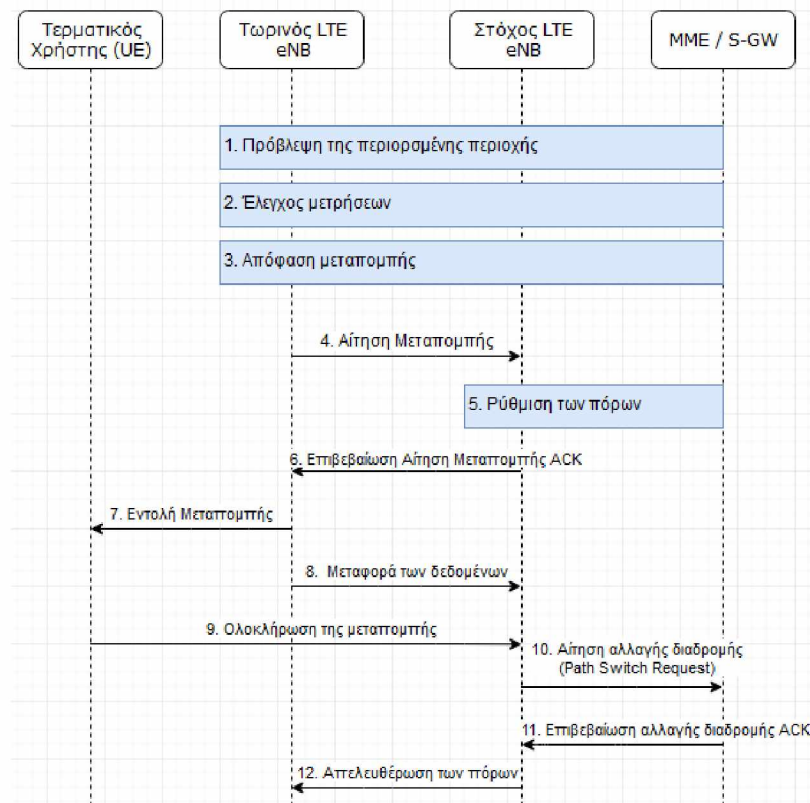
- **Φάση εκτέλεσης (Execution Phase)**

Ο Source-eNB στέλνει μία εντολή μεταβίβασης (Handover Request) προς το τερματικό UE, όπου περιέχει πληροφορίες που σχετίζονται με τη διασύνδεση με το νέο σταθμό Target-eNB. Αν επιβεβαιωθεί επιτυχώς, τότε ο χρήστης συνδέεται με το νέο σταθμό βάσης και οι ροές πληροφορίας που πήγαιναν αρχικά στο Source-eNB, προωθούνται μέσω της διεπαφής X2 στο Target-eNB και από εκεί στο χρήστη. Στην ανερχόμενη ζεύξη (uplink), τα πακέτα από το νέο σταθμό βάσης πάνε κατευθείαν στην S-GW (Source-Gateway).

- **Φάση Ολοκλήρωσης (Completion Phase)**

Στη φάση ολοκλήρωσης αρχίζει να αποδεσμεύεται ο παλιός σταθμός βάσης, στέλνοντας μία εντολή διακοπής προς το δίκτυο κορμού. Εφόσον γίνει η

αλλαγή της διαδρομής απο τη Μονάδα Διαχείρισης Κινητικότητας MME μέσω της διεπαφής X2, ενημερώνονται η διεπαφή S1 και ο τερματικός χρήστης UE. Η ροή πληροφορίας επιτυγχάνεται τώρα απο το Τερματικό στο Δίκτυο Κορμού με μόνο ενδιάμεσο κόμβο το νέο σταθμό βάσης ενώ οι πόροι που δεσμεύτηκαν για την διαδικασία της μεταπομπής αμέσως απελευθερώνονται.



Σχήμα 15: Διαδικασία Μεταπομπής

Συμπερασματικά, η διεπαφή X2 προσφέρει ένα μεγάλο πλεονέκτημα στους χρήστες των δικτύων ασύρματων επικοινωνιών, καθώς η διάρκεια της μεταπομπής έχει μειωθεί, σε σχέση με παλαιότερες μεθόδους, αφού η μεταφορά των δεδομένων γίνεται σε τοπικό επίπεδο (μεταξύ κόμβων). Κατ' επέκταση έχει μειωθεί και η πιθανότητα αποτυχίας μεταπομπής, ειδικά σε περιοχές με μεγάλη κίνητικότητα, όπου οι συνθήκες απο την κίνηση των χρηστών συνεχώς μεταβάλλονται.



4.3 Εφαρμογή Μοντέλων Πολυδιάστατης Τυχαίας Κίνησης στη Διασύνδεση X2.

Σε αυτή την ενότητα θα δούμε πως πραγματοποιείται η διαστασιολόγηση της διασύνδεσης X2 στα συστήματα LTE δηλαδή θα αναλυθεί η απαίτηση του εύρους ζώνης που χρειάζεται σε επίπεδο ελέγχου (X2-CP) και σε επίπεδο χρήστη (X2-UP) ενός συστήματος καθώς και η εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσεων κάθε κατηγορίας κίνησης k με χρήση διάφορων μοντέλων. Συγκεκριμένα θα αναλυθούν τα εξής:

Χωρίς Χρήση του μοντέλου Erlang (EMLM)

- Μοντέλο Απωλειών Blogowski Klopfenstein & Renard (BKR), με χρήση πολιτικής πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης (CS-Policy).

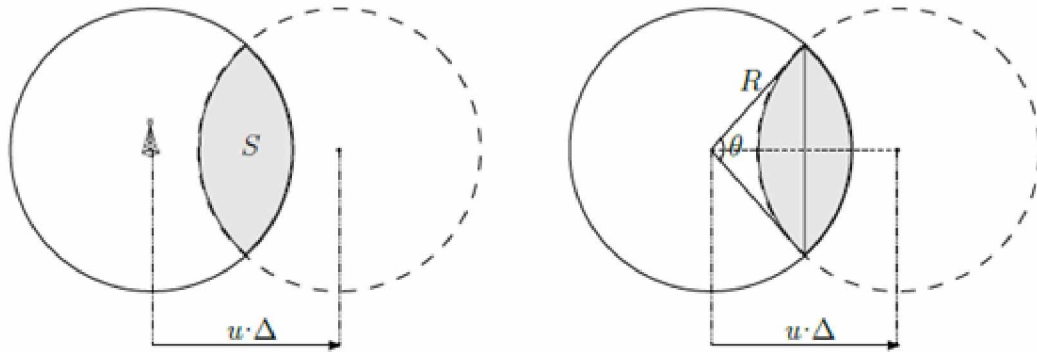
Με χρήση του μοντέλου Erlang (EMLM)

- Μοντέλο Απωλειών Widjaja & La Roche (WLR), με χρήση πολιτικής πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης (CS-Policy) και πολιτικής δέσμευσης εύρους ζώνης (BR-Policy).
- Μοντέλο Απωλειών Ομαδικών κλήσεων Batch Poisson (BP-EMLM).

4.3.1 Εφαρμογή Μοντέλου Blogowski Klopfenstein & Renard (BKR).

Κατά αυτό το μοντέλο, ένας χρήστης βρίσκεται εντός μιας κυκλικής περιοχής (κάλυψη σταθμού βάσης) ακτίνας R και κινείται (θεωρητικά) με σταθερή ταχύτητα u προς μία σταθερή κατεύθυνση (ευθεία γραμμή). Η απόσταση που θα διανύσει ο χρήστης κατά τη διάρκεια της κλήσης είναι $u\Delta$, Δ = σταθερή διάρκεια της κλήσης. Για τον χρήστη ισχύει:

- $u\Delta > 2R$, τότε ο χρήστης θα βρίσκεται σίγουρα σε άλλο σταθμό βάσης στο τέλος της κλήσης του, οπότε η πιθανότητα εξόδου $P_{exit} = 1$ ή 100%
- $u\Delta \leq 2R$, τότε ο χρήστης έχει μία πιθανότητα παραμονής στον ίδιο σταθμό βάσης ο οποίος θα εξαρτάται από τη αρχική θέση του χρήστη και την κατεύθυνση πορείας του.

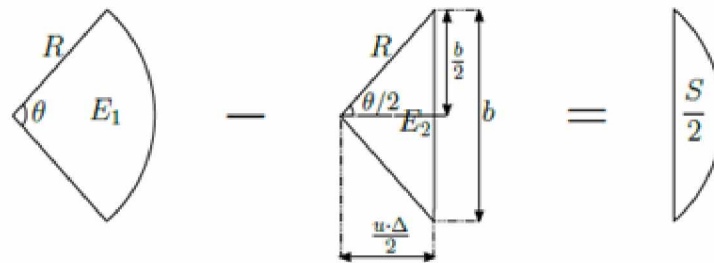


Σχήμα 16 : Ραδιοκάλυψη δύο σταθμών βάσεων με σκιαγραφημένη περιοχή πιθανότητας παραμονής χρήστη στη κυψέλη εμβαδού S. [S2]

→ Υπολογισμός πιθανότητας παραμονής στη κυψέλη.

$$P_{\text{stay}} = \frac{S}{\pi R^2}, \quad (1)$$

Και έχουμε ότι: $\frac{S}{2} = E_1 - E_2 \Rightarrow S = 2(E_1 - E_2), \quad (2)$



Σχήμα 17: Εύρεση επιφάνειας τομής [S2]

Εμβαδόν κυκλικού τομέα:

$$E_1 = \frac{\theta}{2\pi} \pi R^2 = \frac{\theta}{2} R^2$$

& για τη γωνία θ ισχύει:

$$\cos\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{\frac{u\Delta}{2}}{R} = \frac{u\Delta}{2R} \Rightarrow \frac{\theta}{2} = \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right)$$



Άρα απο τα παραπάνω προκύπτει ότι: $E_1 = R^2 \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right)$, (3)

Εμβαδόν τριγώνου:

$$E_2 = \frac{b \cdot \frac{u\Delta}{2}}{2}$$

Όμως λόγω εμβαδού ορθογώνιου τριγώνου θα ισχύει:

$$R^2 = \left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{u\Delta}{2}\right)^2 \Rightarrow \frac{b}{2} = \sqrt{R^2 - \left(\frac{u\Delta}{2}\right)^2}$$

$$\text{Άρα } E_2 = \frac{u\Delta}{2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{u\Delta}{2}\right)^2}, \quad (4)$$

Απο τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι:

$$\begin{aligned} S &= 2 \left[R^2 \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right) - \frac{u\Delta}{2} \sqrt{R^2 - \left(\frac{u\Delta}{2}\right)^2} \right] \Rightarrow \\ S &= 2R^2 \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right) - u\Delta \sqrt{R^2 - \left(\frac{u\Delta}{2}\right)^2} \Rightarrow \\ S &= 2R^2 \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right) - u\Delta R \sqrt{1 - \left(\frac{u\Delta}{2R}\right)^2} \Rightarrow \\ S &= R^2 \left[2 \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right) - \frac{u\Delta}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{u\Delta}{2R}\right)^2} \right] \end{aligned}$$

$$\text{Άρα σύμφωνα με την (1) έχω: } P_{stay} = \frac{1}{\pi} \left[2 \arccos\left(\frac{u\Delta}{2R}\right) - \frac{u\Delta}{R} \sqrt{1 - \left(\frac{u\Delta}{2R}\right)^2} \right] \quad (4.1)$$

→ Υπολογισμός πιθανότητας μεταπομπής

$$u\Delta = 2R \rightarrow P_{stay} = 0$$



$$u\Delta = 0 \rightarrow P_{stay} = 1$$

Επίσης συμπαίρνουμε ότι η πιθανότητα εξόδου είναι:

$$P_{exit} = 1 - P_{stay} \quad (4.2)$$

Όπου P_{exit} μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση των u, Δ . Αντικαθιστώντας το $\frac{u\Delta}{2R} = \omega$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$P_{exit}(\omega) = 1 - P_{stay}(\omega) \Rightarrow$$
$$P_{exit}(\omega) = 1 - \frac{1}{\pi} [2\arccos(\omega) - 2\omega\sqrt{1-\omega^2}] \quad (4.3)$$

Για μικρές τιμές του ω (ω κοντά στο μηδέν) η πιθανότητα εξόδου μπορεί να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας το ανάπτυγμα Taylor. Παραγωγίζοντας την P_{exit} ως προς ω θα έχω:

$$P'_{exit} = -\frac{1}{\pi} \left[-2 \frac{1}{\sqrt{1-\omega^2}} - 2\sqrt{1-\omega^2} + \frac{4\omega}{\sqrt{1-\omega^2}} \right] \Rightarrow$$
$$P'_{exit} = \frac{4\sqrt{1-\omega^2}}{\pi}$$

Για $\omega = 0$ έχω:

$$P_{exit}(0) = 1 - \frac{1}{\pi} \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{2} = 1 - 1 = 0 \quad \&$$
$$P'_{exit}(0) = \frac{4}{\pi}$$

Άρα απο το ανάπτυγμα Taylor για $\omega = 0$ έχω:

$$P_{exit}(\omega) = P_{exit}(0) + \omega \cdot P'_{exit}(0) + R_2 \Rightarrow$$
$$P_{exit}(\omega) = \frac{4\omega}{\pi} + R_2$$

Όπου R_2 θεωρείται το υπόλοιπο που βρίσκεται ανάμεσα απο 2 σταθερές τιμές m, M (m =ελάχιστη τιμή & M =μέγιστη τιμή της δεύτερης παραγώγου $P''_{exit}(\omega)$),



με $R_2 \in \left(\frac{\omega^2}{2} m, \frac{\omega^2}{2} M\right)$, το οποίο μπορεί να γραφεί και ως $O(\omega^2) =$ ασυμπτωτικό άνω φράγμα της R_2 .

Με βάση τα παραπάνω έχουμε ότι:

$$P_{\text{exit}}(\omega) = \frac{4\omega}{\pi} + O(\omega^2)$$

Όμως η τιμή $\omega = \frac{u\Delta}{2R}$ έχει θεωρηθεί πολύ κοντά στο μηδέν και η τετραγωνιοποίηση της την κάνει ακόμα πιο αμελητέα, οπότε το ασυμπτωματικό άνω όριο θεωρείται 0 και τη παραλείπουμε από την εξίσωση. Τελικά έχουμε ότι:

$$P_{\text{exit}}(\omega) \approx \frac{4\omega}{\pi} \xrightarrow{\omega = \frac{u\Delta}{2R}} P_{\text{exit}}(u, \Delta) \approx \frac{2u\Delta}{\pi R} \quad (4.4)$$

Συμπεραίνουμε ότι η έξοδος ενός χρήστη από τη κυψέλη εξαρτάται άμεσα από τα u, Δ .

«Η αντικατάσταση των u, Δ με τις μέσες τιμές τους, δίνει το μέσο αριθμό μεταπομπών (handover) κατά τη διάρκεια μιας επικοινωνίας. Δηλαδή αν ένας χρήστης μπορεί να κάνει μέχρι μία το πολύ μεταπομπή, ο μέσος αριθμός των μεταπομπών θα είναι ίσος με την πιθανότητα εξόδου από την τρέχουσα κυψέλη.» [4]

→ Απαιτούμενη Χωρητικότητα

Από τη στιγμή που θα αρχίσει η μεταπομπή, θα πρέπει να προωθηθούν τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα και τα δεδομένα που καταφθάνουν μέσω της διεπαφής S1 από τον παλιό σταθμό βάσης στο καινούργιο, μέσω της διεπαφής X2. Αυτή η μεταβίβαση πληροφοριών προκαλεί επίσης μία διακοπή της σύνδεσης χρήστη-σταθμού βάσης για ένα χρονικό διάστημα T . Οπότε η χωρητικότητα που θα χρειάζεται κάθε χρήστης θα πρέπει να είναι η ποσότητα των πληροφοριών που θα μεταφερθεί προς το χρονικό διάστημα της διαδικασίας. Δηλαδή:

$$D_{X2} = \frac{Q}{T}$$



«Για να είναι δυνατή η απρόσκοπτη επικοινωνία του χρήστη κατά τη διάρκεια της μεταπομπής, θα πρέπει Q ποσότητα δεδομένων να μεταφερθεί μέσω της διασύνδεσης X2, σε λιγότερο από δ δευτερόλεπτα.» [2]

Επίσης ορίζουμε το λόγο $\beta = \frac{Q}{d}$, d = διαμετακομιστική ικανότητα.

Εν τέλει συμπαιρνουμε ότι η απαιτούμενη χωρητικότητα δίνεται από το τύπο:

$$D_{X2} = \frac{Q}{T} = \frac{\beta d}{T} \quad (4.5)$$

4.3.1.2 Υπολογισμοί για πολλούς Χρήστες μιας κατηγορίας κίνησης

Για τον υπολογισμό πιθανότητας εξόδου χρήστη από ένα σταθμό βάσης όταν έχουμε περισσότερους του ενός χρήστες, τότε θα πρέπει αρχικά να υποθέσουμε ότι όλοι οι χρήστες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά κίνησης και φορτίου. Εφόσον πια όλοι οι χρήστες έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά, η πιθανότητα εξόδου δεν εξαρτάται ξεχωριστά από το κάθε χρήστη, οπότε αποσυναρτητοποιείται και γίνεται:

$$P_{exit} \approx \frac{2u\Delta}{\pi R} \quad (4.6)$$

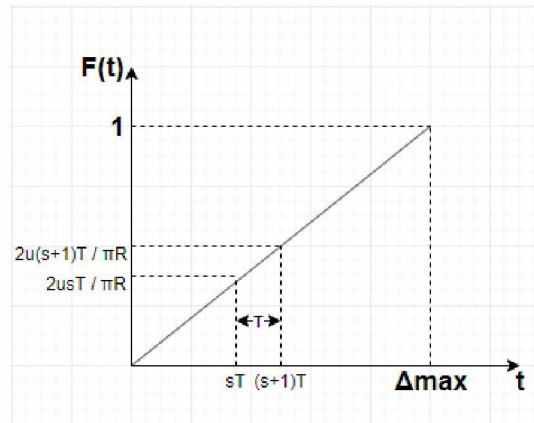
Επίσης ο μέγιστος αριθμός N των χρηστών μέσα σε μία κυψέλη θεωρείται γνωστός εξ' αρχής, γενικεύοντας με αυτό το τρόπο τα αποτελέσματά μας.

Επίσης γνωστό θεωρείται και η ποιότητα εξυπηρέτησης QoS καθώς είναι απαραίτητη η σωστή διαστασιολόγηση της διασύνδεσης X2, για την σωστή δέσμευση χωρητικότητας D_{X2} .

→ Πιθανότητα μεταπομπής ενός χρήστη εντός χρονικού διαστήματος T.

Η συνάρτηση κατανομής της τυχαίας μεταβλητής “χρονικής εξόδου” τ, θα είναι στο χρονικό διάστημα [0, Δ] :

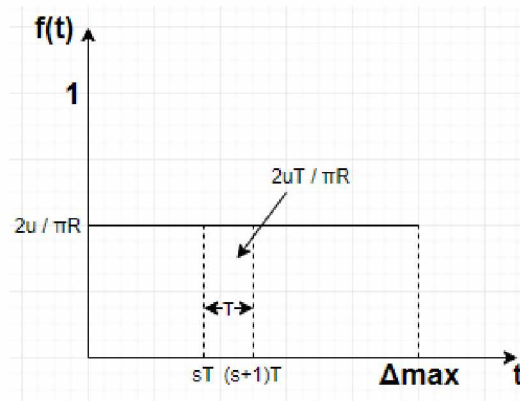
$$P_{exit}(\tau \leq t) \approx \frac{2ut}{\pi R}, \quad t \leq \Delta \quad (4.7)$$



Σχήμα 18: Συνάρτηση κατανομής

με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$f_{\tau}(t) = \frac{2u}{\pi R} \quad (4.8)$$



Σχήμα 19 : Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

Όπως προαναφέραμε, όλοι οι χρήστες θα έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά κίνησης και φορτίου, οπότε για κάθε χρήστη δίνουμε μια ξεχωριστή χρονοθυρίδα m ίσης διάρκειας για το καθένα. Άρα θα ισχύει:

$$\Delta = m \cdot T$$

και επειδή έχουμε $s = 1, 2, 3, \dots, m$ χρονοθυρίδες, η πιθανότητα μεταπομπής σε κάθε χρονοθυρίδα s θα είναι:

$$P_{exit}(s) = \frac{2uT}{\pi R}$$

Βάζοντας και την αποσυναρτητοποιημένη σχέση στη παραπάνω έχουμε:



$$P_{exit}(s) = \frac{2uT}{\pi R} \cdot \frac{\Delta}{\Delta} \Rightarrow \frac{2u\Delta}{\pi R} \cdot \frac{T}{\Delta} \Rightarrow$$

$$P_{exit}(s) = P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta} \quad (4.9)$$

→ **Πιθανότητα Μεταπομπής ακριβώς R χρηστών.**

Μέσω της συνάρτησης μάζας πιθανότητας της διωνυμικής κατανομής μπορούμε να υπολογίσουμε την μεταπομπή για ακριβώς r χρήστες.

$$P_{exit}(r, N) = \binom{N}{r} \cdot \left(P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta}\right)^r \cdot \left(1 - P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta}\right)^{N-r} \quad (4.10)$$

Η παραπάνω παράσταση μπορεί να προσεγγιστεί με μια κατανομή Poisson παραμέτρου λ όπου:

→ Η τιμή των μέγιστων χρηστών N είναι μεγάλη.

→ Η τιμή $P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta}$ είναι πολύ μικρή.

Οπότε έχουμε:

$$P_{exit}(r, \lambda) = \frac{\lambda^r e^{-\lambda}}{r!}, \quad \lambda = \frac{N \cdot P_{exit} \cdot T}{\Delta} \quad (4.11)$$

→ **Πιθανότητα μηδαμινής συμφόρησης εντός χρονικού διαστήματος T.**

Χρειαζόμαστε διαμετακομιστική ικανότητα $r \cdot D_{X2} = r \cdot \frac{Q}{T}$

Συμβολίζοντας με $P_{C_{X2}}(r)$ την πιθανότητα να χρειαστεί διαμετακομιστική ικανότητα η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη της $r \cdot \frac{Q}{T}$ έχουμε:

$$P_{C_{X2}}(r) = \sum_{i=0}^r P_{exit}(i, N) = \sum_{i=0}^r \binom{N}{i} \cdot \left(P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta}\right)^i \cdot \left(1 - P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta}\right)^{N-i} \quad (4.12)$$

→ **Πιθανότητα συμφόρησης κατά τη διάρκεια επικοινωνίας T ενός χρήστη.**

Πιθανότητα τουλάχιστον r χρήστες να εγκαταλήψουν την κυψέλη κατά τη διάρκεια του ίδιου χρονικού διαστήματος s είναι:



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

$$P_{exit}(i \geq r, N) = \sum_{i=r}^{N-1} P_{exit}(i, N-1) \quad (4.13)$$

Οπότε η πιθανότητα ένας χρήστης να μπλοκαριστεί κατά την έξοδό του, σε μια οποιαδήποτε χρονοθυρίδα s , είναι:

$$P_{CC,s}(r) = P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta} \cdot \sum_{i=r}^{N-1} P_{exit}(i, N-1) \quad (4.14)$$

Η πιθανότητα ένας χρήστης να αντιληφθεί συμφόρηση οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας του Δ είναι:

$$P_{CC}(r) = \sum_{s=1}^m P_{CC,s}(r) = m \cdot P_{exit} \cdot \frac{T}{\Delta} \cdot \sum_{i=r}^{N-1} P_{exit}(i, N-1) \quad (4.15)$$

Αφού $P_{CC,1}(r) = P_{CC,2}(r) = \dots = P_{CC,m}(r)$

Όμως $m \cdot T = \Delta$.

Άρα η πιθανότητα συμφόρησης ενός χρήστη τη χρονική διάρκεια Δ θα είναι:

$$P_{CC}(r) = P_{exit} \cdot \sum_{i=r}^{N-1} P_{exit}(i, N-1) \quad (4.16)$$

Εκτός από τα παραπάνω μπορούμε να πάμε τη διαδικασία αντίστροφα. Δηλαδή δεδομένου της πιθανότητας συμφόρησης ενός χρήστη, να βρούμε τη κατάλληλη χωρητικότητα για τη διασύνδεση X2 έτσι ώστε να πετύχουμε την καταλληλότερη ποιότητα εξυπηρέτησης (QoS).

Αν p = μέγιστη αποδεκτή πιθανότητα συμφόρησης τότε ο χρήστης έχει πιθανότητα να υποστεί συμφόρηση μικρότερη ίση του p .

Η χωρητικότητα της διασύνδεσης X2 θα είναι:

$$C_{X2} = r^* \cdot D_{X2} = r^* \cdot \frac{Q}{T}, \quad r^* = \min\{r \in \mathbb{N} \mid P_{CC}(r) \leq p\} \quad (4.17)$$



4.3.1.3 Πολλές κατηγορίες κίνησης k

Τα σημερινά δίκτυα για να καλύψουν τις ανάγκες των χρηστών χρησιμοποιούν περισσότερες από μία κατηγορίες κίνησης οι οποίες επίσης διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα βασικά τους χαρακτηριστικά (ρυθμό μετάδοσης, μέση διάρκεια επικοινωνίας, ποσότητα δεδομένων, πιθανότητα συμφόρησης).

Κάθε κατηγορία κίνησης k ($k=1,2,\dots,K$) έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Ρυθμό μετάδοσης δεδομένων d_k
- Μέση διάρκεια επικοινωνίας Δ_k
- Ποσότητα δεδομένων Q_k
- Μέγιστη πιθανότητα συμφόρησης p_k
- Σταθερό αριθμό χρηστών N_k

Όπως και στα προηγούμενα έτσι και εδώ θα ισχύει:

- Πιθανότητα ένας χρήστης κατηγορίας k να παραμείνει στη κυψέλη κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας:

$$P_{exit,k} = 1 - P_{stay,k} \quad (4.18)$$

Όπου το μόνο που αλλάζει είναι το Δ που γίνεται Δ_k .

- Πιθανότητα μεταπομπών με κατανομή χρηστών $r = r_1, r_2, \dots, r_k$ κατά τη χρονική διάρκεια T είναι:

$$P_{exit}(r, N) = \prod_{k=1}^K P_{exit,k}(r_k, N_k) = \prod_{k=1}^K \binom{N_k}{r_k} \cdot \left(P_{exit,k} \cdot \frac{T}{\Delta_k} \right)^{r_k} \cdot \left(1 - P_{exit,k} \cdot \frac{T}{\Delta_k} \right)^{N_k - r_k} \quad (4.19)$$

Κατανομή συνολικού αριθμού ενεργών χρηστών N :

$$H_N = \prod_{k=1}^K (N_k + 1) \quad (4.20)$$



Παραδείγματος χάρη: Έχουμε $K=2$ με $N_1 = 3$ & $N_2 = 2$. Απο το παραπάνω τύπο προκύπτει ότι οι δυνατές κατανομές των χρηστών θα είναι 12.

Πράγματι $H_N = \{(0,0), (0,1), (0,2), (1,0), (1,1), (1,2), (2,0), (2,1), (2,2), (3,0), (3,1), (3,2)\}$

Και προφανώς ισχύει ότι αθροιστικά όλες οι δυνατές πιθανότητες των χρηστών μας δίνουν αποτέλεσμα 1, δηλαδή:

$$\sum_{r \in H_N} P_{exit}(r, N) = 1 \text{ ή } 100\%$$

→ Πιθανότητα συμφόρησης κατα τη διάρκεια επικοινωνίας Δ_K ενός χρήστη κατηγορίας k .

Η πιθανότητα μπλοκαρίσματος κατα τη διάρκεια της επικοινωνίας του , με διαστασιολογημένη διασύνδεση r χρηστών ισχύει:

$$P_{CC,k}(r) = P_{exit,k} \cdot \sum_{I \in A_r^k} P_{exit}(I, N - e_k) \quad (4.21)$$

Με $e_k = \text{μοναδιαίο ορθοκανονικό διάνυσμα για την κατηγορία } k$.

$$A_r^k = \left\{ I \in H_{N-e_k} \mid \sum_{i=1}^K I_i \beta_i d_i + \beta_k d_k > \sum_{i=1}^K r_i \beta_i \delta_i \right\} \quad (4.22)$$

Όπου το πρώτο μέλος είναι η απαιτούμενη χωρητικότητα ενώ στο δεύτερο μέλος η χωρητικότητα σχεδιασμού (που προκύπτει απο την κατανομή σχεδιασμού r) ενώ όταν είναι γνωστή η χωρητικότητα C_{X2} η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$A_r^k = \left\{ I \in H_{N-e_k} \mid \sum_{i=1}^K \frac{I_i \beta_i d_i + \beta_k d_k}{T} > C_{X2} \right\} \quad (4.23)$$

→ Απαιτούμενη χωρητικότητα για δεδομένες πιθανότητες συμφόρησης.

$$C_{X2} = \sum_{k=1}^K \frac{d_k \beta_k r_k^*}{T}, \quad r^* = \min\{r \in \mathbb{N} \mid P_{CC,k}(r) \leq p_k\} \quad (4.24)$$



→ **Μείωση του απαιτούμενου ρυθμού μετάδοσης στη διασύνδεση X2.**

Αν κατά τη χρονική περίοδο T υπάρχει πιθανότητα συμφόρησης, για να αποφευχθεί μπορούμε να μεταφέρουμε τις πληροφορίες ενός χρήστη κατά την επόμενη χρονική περίοδο T+1 ούτως ώστε να αποφευχθεί η συμφόρηση ακόμα περισσότερο.

$$P_{CC,k}(r) = P_{exit,k} \cdot \sum_{I \in \Lambda_r^k} P_{exit}(I, N - e_i)$$

με

$$\Lambda_r^k = \left\{ I \in H_{N-e_k} \mid \sum_{i=1}^K I_i d_i + d_k > \sum_{i=1}^K r_i d_i \right\} \text{ ή } \left\{ I \in H_{N-e_k} \mid \sum_{i=1}^K I_i d_i + d_k > C_{X2,enh} \right\} \quad (4.25)$$

$$\text{και } C_{X2,enh} = \sum_{k=1}^K d_k r_k^* \quad (4.26)$$

Η μέθοδος αυτή φέρνει αισθητή μείωση της απαιτούμενης χωρητικότητας της διασύνδεσης X2.

→ **Επίδραση της μείωσης του ρυθμού μετάδοσης σε πρωτόκολλα επιπέδου μεταφοράς.**

Μειονέκτημα : Αν στο νέο κόμβο αρχίσει να δέχεται πακέτα απο τη διασύνδεση S1 αμέσως μετά απο την αποκατάσταση ραδιοζεύξης, ο χρήστης θα λαμβάνει πακέτα εκτός σειράς καθώς θα αντικρούονται με αυτά που θα έρχονται ακόμα απο την X2.

Λύση: Αναδιάταξη πακέτων πριν την αποστολή στο χρήστη (στο σταθμό βάσης).

TCP (Transmission Control Protocol) :

Πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων του Διαδικτύου.



Χωρίς επιβεβαίωση κάθε πακέτου καθώς προσαρτά έναν αθροιστικό αριθμό επιβεβαίωσης των πακέτων ACK (Acknowledge number).

Αν κανένα πακέτο δεν είναι έτοιμο:

Ο αποδέκτης στέλνει ένα κενό πακέτο επιβεβαίωσης (γρηγορότερη μετάδοση).

Αν λάβει κάποιο πακέτο με αριθμό ακολουθίας εκτός σειράς:

Στέλνει ένα πακέτο επιβεβαίωσης (fast retransmit) με αριθμό επιβεβαίωσης το πρώτο byte θα έπρεπε να λάβει.

Σε περίπτωση που ληφθούν τρία διαδοχικά πανομοιότυπα πακέτα επιβεβαίωσης ή λήξει το χρονοόμετρο επαναμετάδοσης, το χαμένο πακέτο αποστέλλεται ξανά.

Όμως ο ρυθμός μετάδοσης $X2 \geq$ ρυθμό μετάδοσης $S1$

Άρα η επίδραση πάνω σε αυτό το πρωτόκολλο είναι μηδαμινή, καθώς δεν απαιτείται επαναμετάδοση πακέτων.

RTP (Real Time Protocol):

Πρωτόκολλο μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου (όπως το UDP)

Περιλαμβάνει μια προσωρινή μνήμη αναδιάταξης (reordering buffer) με μέγεθος γ (sec).

Αναδιατάσει τα δεδομένα αν η χρονική τους απόσταση είναι $< \gamma$.

Η μεταπομπή θα γίνεται αντιληπτή εαν ο συνολικός χρόνος μετάδοσης μέσω της διασύνδεσης X2 είναι $> \gamma + T$.

Οπότε πρέπει :

Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων να είναι τέτοιος ώστε

$$D_{X2,k} < d_k \cdot \frac{\beta_k}{\gamma + T}, \quad \forall k, \beta_k \leq \gamma + T \quad (4.27)$$

Που σημαίνει τα δεδομένα που αφορούν το χρηστη κατηγορίας k μπορούν να μεταφερθούν μέσω της X2 σε χρόνο μικρότερο $\gamma + T$, κάνοντας την επίδραση του προηγούμενου μοντέλου αρνητική για το πρωτόκολλο αυτό.



Αν έχουμε όμως $\beta_k > \gamma + T$ τότε:

Ο νέος ρυθμός μετάδοσης δεδομένων είναι:

$$D'_{X2,k} = d_k \cdot \frac{C_{X2}}{\sum_i r_i d_i} \quad (4.28)$$

Τέτοιος ώστε:

$$D'_{X2,k} < d_k \cdot \frac{\beta_k}{\gamma + T} \Rightarrow \sum_i r_i d_i > C_{X2} \cdot \frac{\gamma + T}{\beta_k}$$

ένω η σχέση πιθανότητας συμμόρφωσης γίνεται:

$$P_{CC,k}(C_{X2}) = P_{exit,k} \cdot \sum_{I \in \Omega_{C_{X2}}^k} P_{exit}(I, n - e_i) \quad (4.29)$$

$$\mu \epsilon \Omega_{C_{X2}}^k = \left\{ r \in H_{N-e_k} \mid \sum_{i=1}^K r_i d_i + d_k > C_{X2} \cdot \frac{\gamma+T}{\beta_k} \right\} \quad (4.30)$$

Αυτή η λύση αυξάνει τις λειτουργικές απαιτήσεις του δικτύου.

4.3.2 Παράδειγμα πάνω στο μοντέλο BKR.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τρεις κατηγορίες κίνησης {VoIP, web browsing, video streaming} και τα εξής χαρακτηριστικά:

Ακτίνα κυψέλης **R=0.2 km**

Ταχύτητα χρηστών **V=3.5 km/hr**

Χρόνος διακοπής της κλήσης **T=0.02 sec**

Συνολικός αριθμός χρηστών **N=50**

Χωρητικότητα συστήματος **C_{X2} = 1500 Kbps**

Κατανομή χρηστών μ στις 3 κατηγορίες {50%,30%,20%}

Απαίτηση εύρους ζώνης στις 3 κατηγορίες {64,256,1024} Kbps

Χρονική διάρκεια επικοινωνίας στις 3 κατηγορίες {120,30,240} sec



→ Να βρεθεί η πιθανότητα απώλειας κλήσης για κάθε κατηγορία κίνησης.

Λύση:

Αρχικά βρίσκουμε τη πιθανότητα εξόδου ενός χρήστη απο τη κυψέλη εντός της χρονικής διάρκειας επικοινωνίας Δ . Θα πρέπει να προσέξουμε η χρονική διάρκεια κάθε χρήστη να μην ξεπερνάει τη μέγιστη διάρκεια για την οποία η $P_{exit} < 1$.

Οπότε παίρνουμε τον περιορισμό $\forall \Delta_k: \Delta_k < \frac{\pi R}{2u} \Rightarrow \Delta_k < 323,13 \text{ sec}$. Σε περίπτωση μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας απο τη μέγιστη η πιθανότητα εξόδου απο τη κυψέλη είναι 100% (δηλαδή $P_{exit,k} = 1$). Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση στο παρόν παράδειγμα δεν έχουμε χρονική διάρκεια κλήσης μεγαλύτερη απο τη μέγιστη διάρκεια.

Οπότε για κάθε κατηγορία κίνησης k θα έχουμε:

$$P_{exit,1} = \frac{2 \cdot (3,5/3600) \text{ km/sec} \cdot 120 \text{ sec}}{3,14 \cdot 0,2 \text{ km}} = 0,371362$$

$$P_{exit,2} = \frac{2 \cdot (3,5/3600) \text{ km/sec} \cdot 30 \text{ sec}}{3,14 \cdot 0,2 \text{ km}} = 0,092840$$

$$P_{exit,3} = \frac{2 \cdot (3,5/3600) \text{ km/sec} \cdot 240 \text{ sec}}{3,14 \cdot 0,2 \text{ km}} = 0,742723$$

Στη συνέχεια για δεδομένη ποσότητα χρηστών στο σύστημα $N_{total} = 50$ και κατανομή αυτών στις διάφορες κατηγορίες κίνησης $\{25,15,10\}$ θα υπολογιστεί η πιθανότητα απώλειας κλήσης για τις διάφορες κατηγορίες κίνησης. Για να γίνει αυτό θα αφαιρούμε κάθε φορά έναν χρήστη (στη τρέχουσα κατηγορία που εξετάζουμε), και θα υπολογίζουμε:

- Συνολικοί συνδυασμοί χρηστών.
- Συνδυασμοί χρηστών οι οποίοι απαιτούν χωρητικότητα μεγαλύτερη απο αυτή του συστήματος.
- Τη πιθανότητα συμφόρησης κάθε συνδυασμού χρήστη.
- Πιθανότητα συμφόρησης της εκάστοτε κατηγορίας κίνησης (Άθροισμα των πιθανοτήτων κάθε συνδυασμού).



→ Για την 1^η κατηγορία κίνησης $k = 1$:

Η κατανομή χρηστών γίνεται εκ νέου {24,15,10} (αφαίρεση χρήστη τρέχουσας κατηγορίας). Οι συνολικοί συνδυασμοί των χρηστών που προκύπτουν είναι 4400 από τους οποίους οι 4312 απαιτούν χωρητικότητα μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος (>1500 Kbps). Στο κάθε άθροισμα συνδυασμού των χρηστών συμπεριλαμβάνουμε και την απαίτηση του τρέχοντος χρήστη. Δηλαδή θα ισχύει:

$$sum = x \cdot b_1 + y \cdot b_2 + z \cdot b_3 + b_1, \quad \{x, y, z\} = \text{συνδυασμός χρήστη}$$

Οι συνδυασμοί είναι από {0,0,0} → {24,15,10} στη προκειμένη περίπτωση.

Εάν $sum > C_{X2}$ τότε έχουμε έναν συνδυασμό χρήστη που προκαλεί συμφόρηση.

Μέσω της σχέσης (4.19) προκύπτει η πιθανότητα συμφόρησης $Pb_1 \approx 1,71 \cdot 10^{-7}$ που αντιλαμβάνεται ένας χρήστης της 1^{ης} κατηγορίας κίνησης. Για την τελική πιθανότητα θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και τη πιθανότητα εξόδου που θα επιχειρήσει ο χρήστης. Οπότε η τελική πιθανότητα να αντιληφθεί συμφόρηση είναι:

$$P_{cc,1} = P_{exit,1} \cdot Pb_1 = 6,38 \cdot 10^{-8}$$

→ Για την 2^η κατηγορία κίνησης $k = 2$:

Η κατανομή των χρηστών γίνεται εκ νέου {25,14,10}. Οι συνολικοί συνδυασμοί των χρηστών που προκύπτουν είναι 4290 εκ των οποίων οι 4226 απαιτούν χωρητικότητα μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος. Η αθροιστική πιθανότητα των συνδυασμών αυτών είναι $Pb_2 \approx 1,97 \cdot 10^{-7}$. Όπως και πριν για την τελική πιθανότητα θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και την πιθανότητα εξόδου του χρήστη οπότε θα έχουμε τελική πιθανότητα συμφόρησης:

$$P_{cc,2} = P_{exit,2} \cdot Pb_2 = 1,83 \cdot 10^{-8}$$

→ Για την 3^η κατηγορία κίνησης $k = 3$:

Η κατανομή των χρηστών γίνεται εκ νέου {25,15,9}. Οι συνολικοί συνδυασμοί χρηστών που προκύπτουν είναι 4160 από τους οποίους οι 4148 απαιτούν χωρητικότητα μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος. Το άθροισμα των συνδυασμών αυτών μας δίνει



τη πιθανότητα συμφόρησης $Pb_3 \approx 5,55 \cdot 10^{-4}$ ενός χρήστη 3^{ης} κατηγορίας κίνησης. Συμπεριλαμβάνοντας και την πιθανότητα εξόδου η τελική πιθανότητα γίνεται:

$$P_{cc,3} = P_{exit,3} \cdot Pb_3 = 4,12 \cdot 10^{-4}$$

4.3.3 Εφαρμογή Μοντέλου Widjaja & La Roche με πολιτική πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης.

Οι Widjaja & La Roche προτείνουν μία διαστασιολόγηση της διασύνδεσης X2 η οποία βασίζεται πάνω στη μεθοδολογία πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης του Erlang (EMLM), και συγκεκριμένα πάνω στον αναδρομικό τύπο των Kaufman-Roberts. Δηλαδή οι αφίξεις των χρηστών (χρήση της διασύνδεσης X2 από τους χρήστες στη προκειμένη περίπτωση) χρησιμοποιούν την κατανομή Poisson με εκθετικό χρόνο εξυπηρέτησης. Η ανάλυση του μοντέλου αυτού γίνεται πάνω στο επίπεδο ελέγχου X2-CP και πάνω στο επίπεδο χρήστη X2-UP.

Σε επίπεδο ελέγχου X2-CP:

Για να έχουμε μια ολοκληρώσιμη διαδικασία μεταπομπής μεταξύ δύο σταθμών βάσεων, θα χρειαστεί να γίνει σε επίπεδο ελέγχου μια επικοινωνία μεταξύ των σταθμών αυτών. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω τεσσάρων μηνυμάτων τα οποία είναι:

- Handover Request
- Handover Request ACK
- SN Status Transfer
- Release Resource

«Τα πρώτα δύο μηνύματα είναι της τάξης των 200 byte, ενώ τα άλλα δύο είναι 25-50 byte. Το μέσο μέγεθος m του καθενός απο τα μηνύματα αυτά υπολογίζεται στα ≈ 120 byte» [4]

Αρχικά για την ανάλυση πρέπει να δούμε τον ρυθμό μεταπομπής των χρηστών καθώς και τη χωρητικότητα C που απαιτείται για την απρόσκοπη επικοινωνία του χρήστη. Σύμφωνα με το μοντέλο ροής έχουμε πρέπει πρώτα να βρούμε τον ρυθμό R_c με τον οποίο διασχίζουν οι χρήστες το όριο μιας κυψέλης, πηγαίνοντας στη γειτονική:



$$R_c = \frac{\rho \cdot u \cdot L}{\pi} \quad (4.31)$$

με ρ ($\frac{UE's}{km^2}$) δνα είναι η πυκνότητα των χρηστών σε μία κυψέλη, u ($\frac{km}{hr}$) να είναι η μέση ταχύτητα των χρηστών και L (km) η περίμετρος της κυψέλης.

Ο ρυθμός μεταπομπής (Handover Rate) βρίσκεται εάν μια δεδομένη χρονική στιγμή βρούμε τη πιθανότητα ενεργών χρηστών σε μία κυψέλη p_A και τη πολλαπλασιάσουμε με το ρυθμό διάσχισης της R_c . Δηλαδή:

$$Handover Rate = p_A \cdot R_c \quad (4.32)$$

$$\text{με } p_A = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

Ωστόσο για τη χωρητικότητα C δεδομένων σε επίπεδο ελέγχου θα πρέπει να ισχύει:

$$C_{X2_{CP}} = 4mp_A R_c \quad (4.33)$$

με m το μέσο μέγεθος μηνύματος και ο αριθμός 4 τα μηνύματα που στέλνονται κατα τη διαδικασία.

Λόγω της σύνηθης διαστασιολόγησης των κυψελών των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων (εξάγωνη δομή), η χωρητικότητα C για κάθε ζεύγος σταθμών, θα πρέπει να είναι:

$$C' = \frac{C_{X2_{CP}}}{6} \quad (4.34)$$

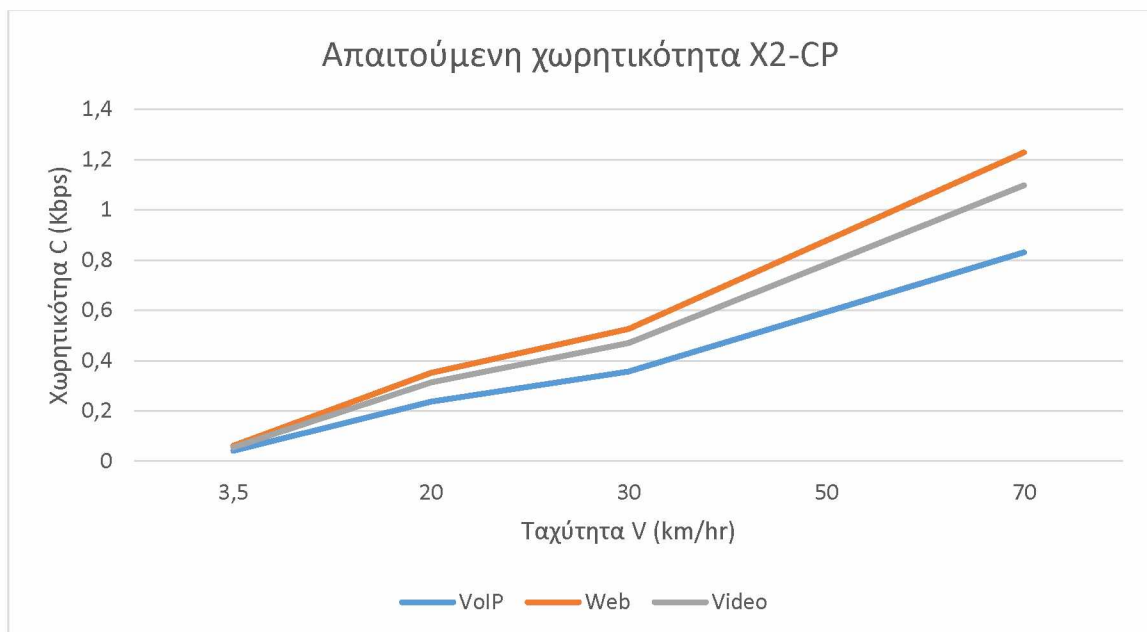
Παράδειγμα:

Έστω ότι σε τερματική σκυσσκευή UE υπάρχουν ενεργές 3 εφαρμογές (VoIP, web browsing, video streaming) με ρυθμό άφιξης λ της καθεμίας {1.5, 1.0, 0.5} και ρυθμό εξυπηρέτησης μ^{-1} {0.02, 0.045, 0.08} αντίστοιχα. Επίσης η πυκνότητα των χρηστών στη περιοχή κάλυψης είναι $\rho=1200$ UEs/km² και η περίμετρος της κυψέλης $L=1$ km.

Το απαιτούμενο εύρος ζώνης που χρειάζεται κάθε εφαρμογή σε συναρτηση με τη ταχύτητα του χρήστη είναι:



Ταχύτητα V (km/hr)	VoIP (Kbps)	Web browsing (Kbps)	Video Streaming (Kbps)
Περπάτημα – 3.5	0.041535	0.061408	0.054847
Όχημα – 20	0.237342	0.350902	0.313413
Όχημα – 30	0.356013	0.526354	0.470119
Όχημα – 50	0.593354	0.877256	0.783532
Όχημα – 70	0.830696	1.228158	1.096945



Σχήμα 20: Διάγραμμα απαιτούμενης χωρητικότητας σε επίπεδο ελέγχου.

Σε επίπεδο χρήστη X2-UP:

Η διασύνδεση X2 σε επίπεδο χρήστη χρησιμοποιείται κατά την μεταπομπή για να στείλει κατά τη διάρκεια της διακοπής της σύνδεσης τα δεδομένα κατερχόμενης ζεύξης (downlink) από το παλιό σταθμό βάσης στο καινούργιο. Με την αποκατάσταση της σύνδεσης τα δεδομένα αυτά πάνε από το σταθμό βάσης στο τερματικό UE.

Για να γίνει μία μεταπομπή χρειάζεται να υπολογίσουμε ακόμα και το χρόνο αλλαγής της διαδρομής μεταγωγής. Δηλαδή ο συνολικός χρόνος μεταπομπής T είναι:

$$T = \text{διάρκεια διακοπής} + \text{διάρκεια αλλαγής διαδρομής μεταγωγής} \quad (4.35)$$



Οπότε το φορτίο κίνησης για κάθε χρήστη κατηγορίας κίνησης k θα ισούται με:

$$\alpha_k = p_{A_k} R_c T \quad (4.36)$$

➔ Θεωρώντας τώρα ότι όλα τα αιτήματα μεταπομπής θα εξυπηρετούνται, δηλαδή ότι έχουμε απεριόριστη χωρητικότητα C , μια δεδομένη χρονική στιγμή υπολογίζεται η κατανομή πιθανότητας Poisson για κάθε χρήστη ως:

$$P(\mathbf{r}) = \prod_{k=1}^K \frac{\alpha_k^{r_k}}{r_k!} e^{-\alpha_k} \quad (4.37)$$

Με r_k να είναι μία παράμετρος ενός διανύσματος $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_K)$ που περιγράφει τον αριθμό των χρηστών κάθε κατηγορίας που επιχειρούν μεταπομπή.

Λόγω πολλών κατηγοριών κινήσεων k χρησιμοποιούμε το γινόμενο στη σχέση αυτή.

Ορίζοντας τώρα ως διάνυσμα $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_K)$ χωρητικότητας εύρους ζώνης για κάθε κατηγορία k μπορούμε να βρούμε τη πιθανότητα της συνολικής χωρητικότητας που θα ζητηθεί για τις παράλληλες μεταπομπές ξεπερνώντας τη διαθέσιμη χωρητικότητα της διασύνδεσης X2-UP. [2] Αυτή εκφράζεται ως:

$$P_o = 1 - \sum_{\mathbf{r}} P(\mathbf{r}), \quad \mathbf{r} \cdot \mathbf{b} \leq C_{X2UP} \quad (4.38)$$

με $\mathbf{r} \cdot \mathbf{b}$ να είναι το εσωτερικό γινόμενο που εκφράζεται ως:

$$\mathbf{r} \cdot \mathbf{b} = \sum_{k=1}^K r_k b_k \quad (4.39)$$

Τα παραπάνω αναφέρονται σε μια **μη ρεαλιστική εφαρμογή** μεταπομπών καθώς, όπως προαναφέρθηκε, η χωρητικότητα του συστήματός μας πάνω στη διασύνδεση ήταν απεριόριστη.

Πολιτική πλήρους διάθεσης σε επίπεδο χρήστη.

Ο κάθε σταθμός βάσης θα πρέπει να ελέγχει την κίνηση αιτημάτων μεταπομπής για κάθε χρήστη ούτως ώστε να αποφευχθούν προβλήματα υπερχειλίσης της διαθέσιμης χωρητικότητας. Αυτό το ρόλο τον αναλαμβάνει ένας μηχανισμός ελέγχου, ο οποίος



τοποθετείται σε κάθε σταθμό βάσης εκτελώντας με αυτό το τρόπο μια πολιτική πλήρους διάθεσης. Έτσι βγαίνουμε στα εξής συμπεράσματα.

Για το χώρο καταστάσεων Ω θα πρέπει να ισχύει:

$$\Omega = \{r: r \cdot b \leq C_{X2UP}\}$$

Ενώ η πιθανότητα ενός συνδυασμού μεταπομπών στο σύνολο Ω είναι:

$$P(r) = \frac{1}{G} \prod_{k=1}^K \frac{a_k^{r_k}}{N_k!}, \forall r \in \Omega \quad (4.40)$$

$$\mu \varepsilon \frac{1}{G} = \sum_{r \in \Omega} \left(\prod_{k=1}^K \frac{a_k^{r_k}}{r_k!} \right)$$

Απο τα παραπάνω μπορούμε να βρούμε τη πιθανότητα ένας χρήστης να αντιληφθεί συμφόρηση κατα τη μεταπομπή θα είναι:

$$P_{b,k} = 1 - \sum_{r \in \Omega_k} P(r) \quad (4.41)$$

$$\mu \varepsilon \Omega_k = \{r: r \cdot b \leq C_{X2UP} - b_k\}$$

→ **Αναδρομικός τύπος Kauffman-Roberts.**

Για δεδομένα τα a_k, b_k των χρηστών, χρησιμοποιούμε τον αναδρομικό προσεγγιστικό τύπο για να βρούμε τη πιθανότητα συμφόρησης των χρηστών σε κάθε κατηγορία κίνησης k . Για δεδομένη πολιτική, την πολιτική πλήρους διάθεσης (CS-Policy), βρίσκουμε τα $q(j)$ για τα οποία ισχύουν:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & j = 0 \\ 0, & j < 0 \end{cases} \quad q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k), \quad j = 1, 2, \dots, C$$

Εφόσον βρεθούν οι πιθανότητες $q(j)$ μπορούμε να βρούμε τη πιθανότητα συμφόρησης η οποία θα είναι:

$$P_{b,k} = \sum_{j=C-b_k+1}^C q'(j), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4.42)$$



με: $q'(j) = \frac{q(j)}{G}$ κανονικοποιημένη τιμή του $q(j)$, $G = \sum_{j=0}^C q(j)$.

4.3.4 Παράδειγμα εύρεσης πιθανότητας συμφόρησης με χρήση του μοντέλου WLR.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με 3 κατηγορίες κίνησης {VoIP, Web, Video} και τα εξής χαρακτηριστικά:

Χωρητικότητα συστήματος $C_{X2} = 20$ b.u.

Ρυθμός άφιξης κλήσεων λ {1.5, 1.0, 0.5} sessions/hr

Ρυθμός εξυπηρέτησης μ^{-1} {0.02, 0.45, 0.2} hr/sessions

Απαιτούμενο εύρος ζώνης κάθε κατηγορίας b_k {2, 8, 10} b.u.

Χρόνος διακοπής της κλήσης $T = 0.02$ sec

Ταχύτητα χρηστών $V=30$ km/hr

Περίμετρος κυψέλης $L=2$ km

Πυκνότητα χρηστών στη περιοχή κάλυψης $\rho = 2000$ UEs/km²

→ Να βρεθεί η πιθανότητα συμφόρησης για κάθε κατηγορία k.

Λύση:

Αρχικά βρίσκουμε το φορτίο κίνησης κάθε κατηγορίας κίνησης a_k , το οποίο θα χρησιμοποιήσουμε στο αναδρομικό τύπο. Σύμφωνα με τη 4.3.3 το φόρτιο κίνησης θα είναι :

$$a_k = p_{A_k} \cdot R_k \cdot T$$

$$a_1 = p_{A_1} \cdot R_1 \cdot T \Rightarrow a_1 \approx 0,0061$$

$$a_2 = p_{A_2} \cdot R_2 \cdot T \Rightarrow a_2 \approx 0,0658$$

$$a_3 = p_{A_3} \cdot R_3 \cdot T \Rightarrow a_3 \approx 0,0192$$



Σύμφωνα με τα βήματα του αναδρομικού τύπου που αναλύονται σε κώδικα C ερχόμαστε στο συμπέρασμα ότι οι πιθανότητες συμφόρησης για κάθε κατηγορία κίνησης θα είναι:

$$P_{b1} \approx 1,75 \cdot 10^{-4}$$

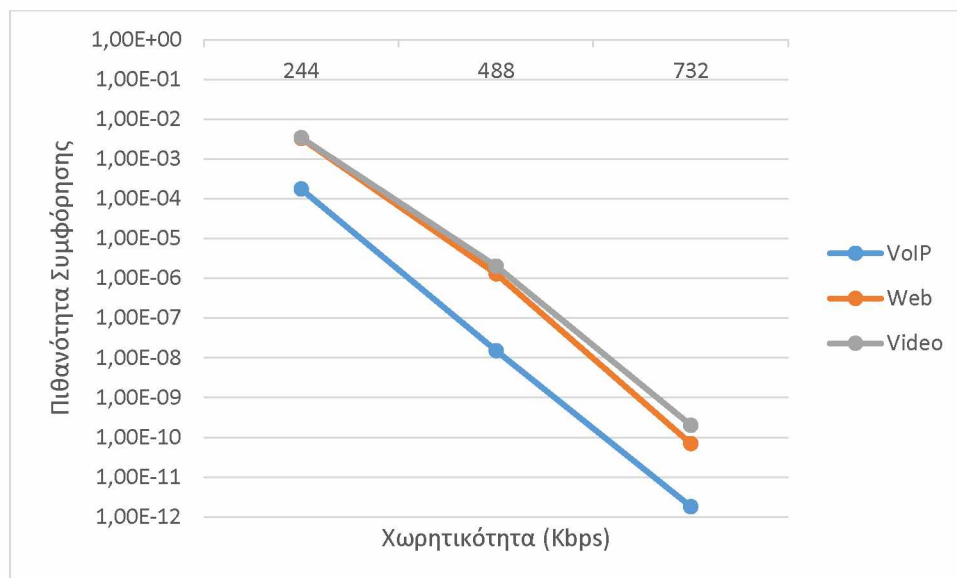
$$P_{b2} \approx 3,31 \cdot 10^{-3}$$

$$P_{b3} \approx 3,42 \cdot 10^{-3}$$

Τι θα γίνει αν διπλασιάσουμε ή τριπλασιάσουμε τη χωρητικότητα του συστήματος;

Χωρητικότητα C (b.u.)	VoIP	Web	Video
40	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,29 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$
60	$1,81 \cdot 10^{-12}$	$6,95 \cdot 10^{-11}$	$2,02 \cdot 10^{-10}$

Παρατηρούμε ότι για μεγαλύτερη δοσμένη χωρητικότητα στο σύστημα μας, η πιθανότητα συμφόρησης κάθε κατηγορίας κίνησης πέφτει δραματικά προς το 0.



Σχήμα 21: Πιθανότητα Συμφόρησης στο μοντέλο BKR σε λογαριθμική κλίμακα.



4.3.5 Σύγκριση μεθόδων BKR και WLR.

Για να συγκρίνουμε τις δύο αυτές μεθόδους ούτως ώστε να συγκρίνουμε τα αποτελέσματά τους, θα πρέπει να διαμορφώσουμε το φορτίο κίνησης της μεθόδου BKR, για να το ενσωματώσουμε στην μέθοδο WLR. Σύμφωνα με τη θεωρία της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, ο ρυθμός αίτησης μεταπομπής κάθε χρήστη σε ένα διάστημα T ισούται με τη πιθανότητα μεταπομπής μιας χρονοθυρίδας s. Εφόσον ο ρυθμός αυτός αφορά χρονική διάρκεια ίση με το χρόνο εξυπηρέτησης μιας μεταπομπής, τότε ρυθμός αυτός θα ισούται με το φορτίο κίνησης ενός χρήστη. Δηλαδή θα ισχύει:

$$a = P_{exit(s)} = \frac{2uT}{\pi R} \quad (4.43)$$

Στο μοντέλο των BKR όμως, ο αριθμός των χρηστών θεωρείται σταθερός και κάθε χρήστης που επιχειρεί μεταπομπή, διακόπτεται η κλήση του για T sec και στη συνέχεια επανέρχεται (Λογική Engset). Οπότε για πολλούς χρήστες N_k μπορούμε να θεωρήσουμε ως φορτίο κίνησης για κάθε κατηγορία k την παρακάτω εξίσωση, η οποία μας δίνει με καλή προσέγγιση τιμές πάνω σε αφίξεις Poisson. Δηλαδή θα έχουμε:

$$\alpha_k = a \cdot N_k = \frac{2uTN_k}{\pi R} \quad (4.44)$$

4.3.6 Παράδειγμα χρήσης Μοντέλου WLR με φορτίο κίνησης του μοντέλου BKR.

Χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα με αυτό του παραδείγματος 4.3.2 θα έχω:

Ακτίνα κυψέλης $R=0.2$ km

Ταχύτητα χρηστών $V=3.5$ km/hr

Χρόνος διακοπής της κλήσης $T=0.02$ sec

Συνολικός αριθμός χρηστών $N=50$

Χωρητικότητα συστήματος $C_{X2} = 1500$ Kbps



Κατανομή χρηστών u στις 3 κατηγορίες {50%,30%,20%}

Απαίτηση εύρους ζώνης στις 3 κατηγορίες {64,256,1024} Kbps

Χρονική διάρκεια επικοινωνίας στις 3 κατηγορίες {120,30,240} sec

Εύρεση φορτίου $\alpha_k = \frac{2VTN_k}{\pi R}$. Άρα θα έχω:

$$\alpha_1 = \frac{2 \cdot \left(\frac{3,5}{3600}\right) \cdot 0,02 \cdot 25}{3,14 \cdot 0,2} = 0,001547$$

$$\alpha_2 = \frac{2 \cdot \left(\frac{3,5}{3600}\right) \cdot 0,02 \cdot 15}{3,14 \cdot 0,2} = 0,000928$$

$$\alpha_3 = \frac{2 \cdot \left(\frac{3,5}{3600}\right) \cdot 0,02 \cdot 10}{3,14 \cdot 0,2} = 0,000619$$

Χρησιμοποιώντας τώρα τον αναδρομικό-προσεγγιστικό τύπο και βρίσκοντας τα κανονικοποιημένα $q(j)$, βρίσκουμε τη πιθανότητα συμφόρησης για κάθε κατηγορία k :

$$Pb_1 = 3,5371 \cdot 10^{-16}, Pb_2 = 5,7373 \cdot 10^{-7} \text{ και } Pb_3 = 6,1898 \cdot 10^{-4}$$

και για την τελική πιθανότητα συμφόρησης θα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε τη τωρινή μας πιθανότητα με τη πιθανότητα εξόδου του χρήστη από τη κυψέλη $P_{exit,k}$. Οπότε θα έχω:

$$P_{cc,1} \approx 1,31 \cdot 10^{-16}, P_{cc,2} = 5,32 \cdot 10^{-8} \text{ και } P_{cc,3} = 4,59 \cdot 10^{-4}$$

Σύγκριση αποτελεσμάτων WLR & BKR για συνολικούς χρήστες N=50.

Πιθανότητα Συμφόρησης	WLR	BKR
$P_{cc,1}$	1,31E-16	6,38E-8
$P_{cc,2}$	5,32E-8	1,83E-8
$P_{cc,3}$	4,59E-4	4,12E-4

Σύμφωνα με τους BKR, το μοντέλο που προτείνουν είναι απλούστερο από το



πλουσιότερο και πιο ρεαλιστικό στοχαστικό μοντέλο των WLR, ισχυρίζοντας ότι στα πλαίσια σχεδιασμού των δικτύων η μεθοδολογία τους δίνει αποτελέσματα παραπλήσια με αυτά των WLR. Πράγματι, παρατηρούμε ότι οι πιθανότητες συμφόρησης για τις κατηγορίες κίνησης 2 και 3 είναι παραπλήσιες με απόκλιση (ειδικά στη 3^η κατηγορία), ενώ στη κατηγορία 1 η απόκλιση της πιθανότητας είναι αρκετά μεγάλη.

4.3.7 2^ο Παράδειγμα πάνω στη σύγκριση των μοντέλων BKR & WLR.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με 3 κατηγορίες κίνησης {VoIP, Web browsing, Video streaming} και τα εξής χαρακτηριστικά:

Ακτίνα κυψέλης **R=0.5 km**

Ταχύτητα χρηστών **V=30 km/hr**

Χρόνος διακοπής της κλήσης **T=0.02 sec**

Χωρητικότητα συστήματος **C_{X2} = 520 Kbps**

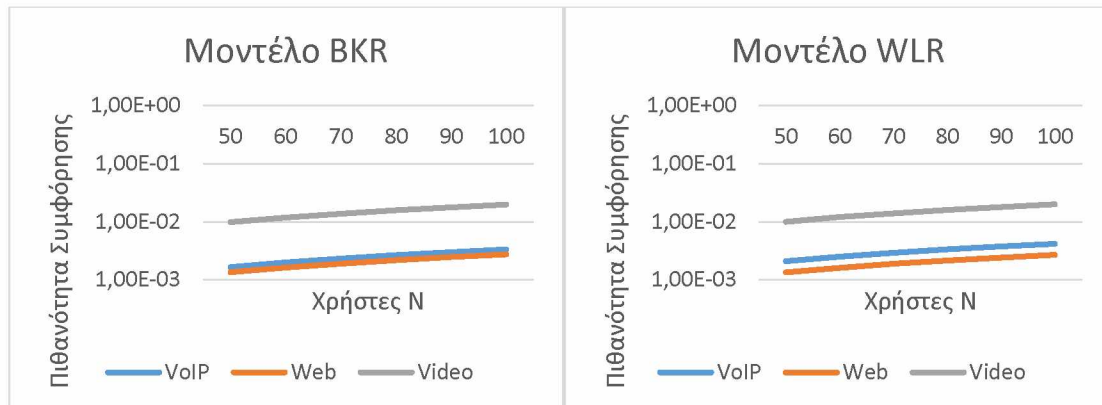
Κατανομή χρηστών μ στις 3 κατηγορίες {50%,30%,20%}

Απαίτηση εύρους ζώνης στις 3 κατηγορίες {64,256,512} Kbps

Χρονική διάρκεια επικοινωνίας στις 3 κατηγορίες {120,60,90} sec

Μέσω του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε σε γλώσσα C για $N_{total} = 50 \rightarrow 100$ αυξανόμενο κάθε φορά κατα 10 βρίσκουμε τα εξής αποτελέσματα.

Χρήστες	BKR			WLR		
	P _{CC,1}	P _{CC,2}	P _{CC,3}	P _{CC,1}	P _{CC,2}	P _{CC,3}
50	1,66E-3	1,36E-3	9,87E-3	2,10E-3	1,35E-3	1,00E-2
60	2,00E-3	1,63E-3	1,18E-2	2,52E-3	1,62E-3	1,21E-2
70	2,33E-3	1,91E-3	1,38E-2	2,93E-3	1,89E-3	1,40E-2
80	2,67E-3	2,19E-3	1,58E-2	3,35E-3	2,16E-3	1,60E-2
90	3,01E-3	2,47E-3	1,78E-2	3,76E-3	2,43E-3	1,80E-2
100	3,34E-3	2,75E-3	1,98E-2	4,17E-3	2,70E-3	2,00E-2



Σχήμα 22 : Σύγκριση Πιθανοτήτων Συμφόρησης στα μοντέλα BKR & WLR σε λογαριθμική κλίμακα.

Παρατηρείται ότι για όλες τις δεδομένες κατηγορίες κίνησης και στα 2 μοντέλα η πιθανότητα συμφόρησης είναι σχεδόν ίδια (ελάχιστη απόκλιση διαφορών), ενώ όσο αυξάνεται η πυκνότητα των χρηστών τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα της συμφόρησης για τη κάθε κατηγορία.

4.3.8 Μοντέλο WLR με πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης EMLM-BR

Στη προηγούμενη ενότητα η διαστασιολόγηση της διασύνδεσης X2, έγινε με πολιτική πλήρους διάθεσης (Complete Sharing Policy, CS-Policy) στην οποία οι υπηρεσίες διαμοιράζονται στο διαθέσιμο εύρος ζώνης. Σε αυτήν την ενότητα η διαστασιολόγηση θα ακολουθήσει την πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης (Bandwidth Reservation Policy, BR-Policy) στην οποία μια υπηρεσία συγκεκριμένης κατηγορίας k γίνεται δεκτή μόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμες συγκεκριμένες μονάδες εύρους ζώνης. Με αυτό το τρόπο πετυχαίνουμε εξισορρόπηση του συστήματος και κατ' επέκταση μείωση της πιθανότητας απώλειας κλήσεων καθώς υπάρχουν υπηρεσίες που έχουν διαφορετικές τιμές εύρους η καθεμία αλλά παρ' αυτά διεκδικούν στο σύστημα ίδιους πόρους. « Επιπρόσθετα το παρόν μοντέλο χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη να προτεραιοποιηθούν κλήσεις συγκεκριμένων κατηγοριών έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ποιότητα εξυπηρέτησης τους.» [1]

Έτσι, σύμφωνα με τη παραπάνω πολιτική, διακρίνουμε ότι:

1. Μια κλήση κατηγορίας k δεσμεύεται στο σύστημα μας εαν και μονο αν υπάρχουν τουλάχιστον t_k μονάδες εύρους ζώνης οι οποίες θα εποφελήσουν το



σύστημα μας καθώς θα δώσουν μεγαλύτερο εύρος για τις υπόλοιπες κατηγορίες κίνησης. Επίσης η νέα χωρητικότητα της δεσμευμένης κατηγορίας k είναι πια $\mathbf{C} - \mathbf{t}_k$.

2. Μια κλήση κατηγορίας k **μπλοκάρεται** και χάνεται απο το σύστημα όταν οι μονάδες εύρους ζώνης είναι μικρότερες από $\mathbf{t}_k + \mathbf{b}_k$.

Επειδή όμως θέλουμε να πετύχουμε εξισορρόπηση του συστήματος (δηλαδή ίδια πιθανότητα απώλειας κλήσεων για όλες τις κατηγορίες κίνησης k) θα πρέπει το άθροισμα της απαιτούμενης χωρητικότητας με τη δεσμευτική παράμετρο της κάθε κατηγορίας κίνησης k να είναι ίσα, δηλαδή:

$$\mathbf{b}_1 + \mathbf{t}_1 = \mathbf{b}_2 + \mathbf{t}_2 = \dots = \mathbf{b}_k + \mathbf{t}_k$$

ενώ για το σύνολο καταστάσεων Ω_{BR} το οποίο θεωρείται υποσύνολο του Ω (στο απλό μοντέλο EMLM, $\Omega_{BR} \subseteq \Omega$) ισχύει ότι:

$$\Omega_{BR} = \left\{ \mathbf{n} \in \Omega: \mathbf{0} \leq \sum_{k=1}^K (\mathbf{n}_k \mathbf{b}_k) + \mathbf{b}_k \leq \mathbf{C} - \mathbf{t}_k \right\} \quad (4.45)$$

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσης στο σύστημα μας γίνεται με τις μεθόδους της εύρεσης γραμμικών εξισώσεων σφαιρικής ισορροπίας και με τον αναδρομικό-προσεγγιστικό τύπο των Kaufman-Roberts. Η πρώτη μέθοδος μας δίνει να μεν τα πιο ακριβή αποτελέσματα για το σύστημα μας αλλά η απόδοση της πέφτει δραματικά ειδικά σε συστήματα μεγάλης χωρητικότητας και πολλών χρηστών. Γι' αυτό πιο συχνά χρησιμοποιείται ο προσεγγιστικός τύπος, ο οποίος μας δίνει παραπλήσια αποτελέσματα με αυτά της πρώτης μεθόδου (σχεδόν ίδια) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε πολύ μεγάλα συστήματα με πολλές κατηγορίες κίνησης και πληθυσμιακής κάλυψης. Επίσης σημαντικό να αναφερθεί είναι το ότι λόγω της έλλειψης τοπικής ισορροπίας, η χρήση της μεθόδου της μορφής γινομένου δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στην παρούσα πτυχιακή θα αναλυθεί μόνο η περίπτωση του αναδρομικού-προσεγγιστικού τύπου Kaufman-Roberts πάνω στη πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης.



Αναδρομικός τύπος Kaufman-Roberts με δέσμευση εύρους ζώνης.

Η ιδέα του αναδρομικού τύπου είναι ίδια με αυτήν στο μοντέλο WLR με μόνη διαφορά τώρα να είναι η ενσωμάτωση της πολιτικής δέσμευσης η οποία συμβολίζεται ως $D_k(j - b_k)$ και αντικαθιστά από τον αναδρομικό τύπο τη δεύτερη μεταβλητή b_k από την άθροιση μετασχηματίζοντάς τον σε:

$$q(j) = \frac{1}{j} \cdot \sum_{k=1}^K a_k D_k(j - b_k) q(j - b_k), \quad j = 1, 2, \dots, C \quad (4.46)$$

με $D_k(j - b_k)$ να είναι:

$$D_k(j - b_k) = \begin{cases} b_k, & j \leq C - t_k \\ 0, & \text{αλλοί} \end{cases} \quad (4.47)$$

Υπάρχουν περιπτώσεις όμως, όπου για $j > C - t_k$ υπάρχουν κλήσεις b_k στο διαστημα $j = C - t_k + 1, \dots, C$. Αυτό υποδηλώνει ότι ο τύπος μας είναι **προσεγγιστικός**.

Για παράδειγμα έχουμε ένα σύστημα χωρητικότητας $C = 8$ με δύο κατηγορίες κίνησης οι οποίες απαιτούν εύρος ζώνης $b_1 = 3$ και $b_2 = 1$ και με δεσμευτική παράμετρο αντίστοιχα $t_1 = 1$ και $t_2 = 3$.

Η κατάσταση (2,1) είναι μια τέτοια ειδική περίπτωση καθώς ενώ η κλήση μπορεί να διεκπαιρωθεί ($j=7$), οι περιορισμοί του τύπου δεν μας αφήνουν καθώς για $j > 8-3=5$ δε μας επιτρέπονται κλήσεις της πρώτης κατηγορίας.

Η εύρεση της πιθανότητας απώλειας κλήσεων συνεχίζεται κανονικά, χωρίς κάποια μετατροπή, με την εύρεση των κανονικοποιημένων $q(j)$. Επίσης για τον αναδρομικό τύπο ισχύει όπως και πριν ότι $q(1) = 0$ & $\forall x < 0: q(x) = 0$

4.3.9 Παράδειγμα εύρεσης πιθανότητας απώλειας κλήσεων με πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με τα εξής χαρακτηριστικά:

Περίμετρος κυψέλης $L = 2 \text{ km}$



Πυκνότητα χρηστών στο σύστημα $p = 2000 \text{ UEs/km}^2$

Ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε κατηγορίας $\lambda \{1.5, 1, 0.5\} \text{ sessions/hr}$

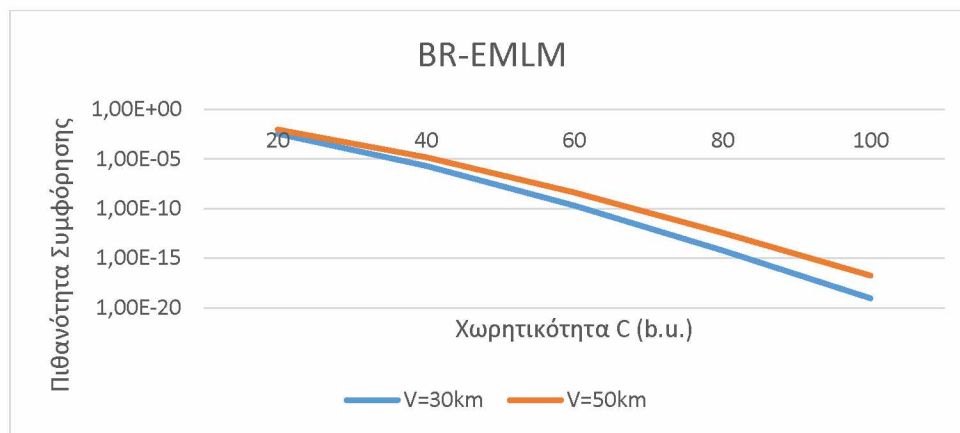
Ρυθμός εξυπηρέτησης $\mu^{-1} \{0.02, 0.45, 0.2\} \text{ hr/sessions}$

Απαίτηση εύρους ζώνης κάθε κατηγορίας $b \{2,8,10\} \text{ b.u.}$

Παράμετρος δέσμευσης εύρους ζώνης $t \{8,2,0\} \text{ b.u.}$

Για χωρητικότητα $C = 20 \rightarrow 100 \text{ b.u.}$ αυξανόμενο κάθε φορά κατά 20 b.u. βρίσκουμε τα εξής αποτελέσματα μέσω του αλγορίθμου, που υλοποιήθηκε σε γλώσσα C. Υπενθυμίζεται ότι $1 \text{ b.u.} \approx 12.2 \text{ Kbps}$.

C (b.u.)	V=30 km/hr			V=50 km/hr		
	VoIP	Web	Video	VoIP	Web	Video
	$a_1 = 0.0061$	$a_2 = 0.0658$	$a_3 = 0.0192$	$a_1 = 0.0103$	$a_2 = 0.1097$	$a_3 = 0.0321$
$b_1 = 2 \text{ b.u.}$	$b_2 = 8 \text{ b.u.}$	$b_3 = 10 \text{ b.u.}$	$b_1 = 2 \text{ b.u.}$	$b_2 = 8 \text{ b.u.}$	$b_3 = 10 \text{ b.u.}$	
$t_1 = 8 \text{ b.u.}$	$t_2 = 2 \text{ b.u.}$	$t_3 = 0 \text{ b.u.}$	$t_1 = 8 \text{ b.u.}$	$t_2 = 2 \text{ b.u.}$	$t_3 = 0 \text{ b.u.}$	
20	3,42E-3	3,42E-3	3,42E-3	8,99E-3	8,99E-3	8,99E-3
40	2,00E-6	2,00E-6	2,00E-6	1,46E-5	1,46E-5	1,46E-5
60	2,01E-10	2,01E-10	2,01E-10	4,16E-9	4,16E-9	4,16E-9
80	5,76E-15	5,76E-15	5,76E-15	3,51E-13	3,51E-13	3,51E-13
100	8,90E-20	8,90E-20	8,90E-20	1,73E-17	1,73E-17	1,73E-17

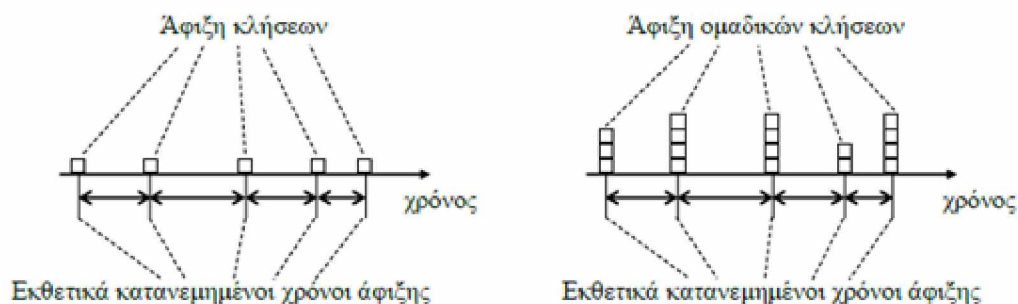


Σχήμα 23: Πιθανότητα Συμφόρησης στο μοντέλο EMLM-BR σε λογαριθμική κλίμακα.

4.3.10 Μοντέλο Απωλειών Ομαδικών Κλήσεων στη Διασύνδεση X2 (Batch Poisson-EMLM).

Στις προηγούμενες ενότητες είδαμε μοντέλα πάνω στην διεπαφή X2 στα οποία οι αφίξεις των κλήσεων γινόταν τυχαία μία προς μία στο σύστημα μας. Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε ομαδικές κλήσεις οι οποίες ακολουθούν την κατανομή Poisson κατά την άφιξη τους (Batch Poisson) και η κατανομή τους στο σύστημα ακολουθεί την γεωμετρική κατανομή (memoryless). Για να λειτουργήσει σωστά το συγκεκριμένο μοντέλο θα πρέπει:

- η κάθε ομάδα να περιλαμβάνει κλήσεις μόνο της ίδιας κατηγορίας k .
- όταν δεν υπάρχει διαθέσιμο εύρος ζώνης στο σύστημα μας, τότε κάποιες κλήσεις από την ομάδα απορρίπτονται και οι εναπομείναντες κλήσεις εξυπηρετούνται.



Σχήμα 24: Αφίξεις κλήσεων σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson. [S1]

Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, έτσι και εδώ χρησιμοποιούμε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα το οποίο εξυπηρετεί K κατηγορίες κίνησης και έχει χωρητικότητα C . Θεωρούμε, επίσης, μια μεταβλητή B_r^k η οποία περιγράφει τη πιθανότητα μια ομάδα κλήσεων κατηγορίας k να αποτελείται από r χρήστες.

Επειδή σε αυτή τη περίπτωση έχουμε περισσότερες από μία κλήσεις (λόγω batches), θεωρούμε ως απώλεια ένα μέρος της ομάδας αυτής. Δηλαδή αν μια ομάδα αποτελείται από n κλήσεις και το διαθέσιμο εύρος ζώνης m είναι μικρότερο από $n \cdot b_k$, τότε θα γίνουν δεκτές στο σύστημα $\text{floor}\left(\frac{m}{b_k}\right)$ ή $\lfloor \frac{m}{b_k} \rfloor$ όπου $\lfloor \frac{m}{b_k} \rfloor = \max\{n \in Z \mid n \leq \frac{m}{b_k}\}$, ενώ οι υπόλοιπες θα απορριφθούν.



Πιθανότητες συμφόρησης κλήσεων και χρόνου.

Μία σημαντική λεπτομέρεια που πρέπει να αναλυθεί στη κατηγορία ομαδικών κλήσεων είναι αυτή της διαφοράς της πιθανότητας συμφόρησης κλήσεων και της πιθανότητας συμφόρησης στο χρόνο. Ενώ στη απλή περίπτωση (άφιξη κλήσεων 1-1) οι δύο αυτές πιθανότητες συμπίπτουν, όποτε η $P_{call\ congestion} = P_{time\ congestion}$, στη κατηγορία με τις ομαδικές κλήσεις τα πράγματα είναι λίγο διαφορετικά. Αυτό συμβαίνει διότι όταν εισέρχονται ομαδικές κλήσεις στο σύστημα, μερικές φορές το εύρος ζώνης που απαιτείται απο τις εισερχόμενες κλήσεις είναι μεγαλύτερο απο το διαθέσιμο. Έτσι εαν μια χρονική στιγμή εισέλθει στο σύστημα μια ομάδα κλήσεων και μπορούν να εξυπηρετηθούν κάποιες απο αυτές (συμφόρηση σε χρόνο στις μη εξυπηρετούμενες κλήσεις), εφόσον υπάρχει έστω και μια που δε μπορεί να γίνει δεκτή στο σύστημα, απορρίπτονται όλες οι κλήσεις της ομάδας, λόγω συμφόρησης των κλήσεων.

Εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσεων.

Για την εύρεση της πιθανότητας απώλειας ομαδικών κλήσεων ακολουθούμε τον αναδρομικό τύπο ο οποίος είναι παρόμοιος λογικής με τον αναδρομικό τύπο των Kaufman-Roberts με κάποιες παραλλαγές. Δηλαδή θα ισχύει $q(1) = 0$ και $\forall j < 0$, $q(j) = 0$ ενώ στο διάστημα $[1, C]$ θα έχουμε:

$$q(j) = \frac{1}{j} \cdot \sum_{k=1}^K \left(a_k b_k \sum_{l=1}^{\lfloor \frac{j}{b_k} \rfloor} \widehat{B}_{l-1}^k q(j - lb_k) \right), \quad j = 1, 2, \dots, C \quad (4.48)$$

$$\text{με } \widehat{B}_l^k = \sum_{r=l+1}^{\infty} B_r^k, \quad B_r^k = \begin{cases} 1, & r = 1 \\ 0, & r > 1 \end{cases}$$

«Εάν οι κλήσεις κάθε κατηγορίας k φτάνουν κατά ομάδες μεγέθους s_k , όπου s_k καθορίζεται απο τη γεωμετρική κατανομή με παράμετρο β_k , δηλαδή $P_r(s_k = r) = (1 - \beta_k)\beta_k^{r-1}$ με $r \geq 1$, τότε το μοντέλο απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης παίρνει τη μορφή:» [1]



$$q(j) = \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \left(a_k b_k \sum_{l=1}^{\lfloor \frac{j}{b_k} \rfloor} \beta_k^{l-1} q(j - lb_k) \right), \quad j = 1, 2, \dots, C \quad (4.49)$$

Η **πιθανότητα συμφόρησης των κλήσεων** (δηλαδή η πιθανότητα απόρριψης μιας νέας κλήσης k απο το σύστημα) δίνεται απο το τύπο:

$$C_{b_k} = \sum_{j=0}^c q'(j) \beta_k^{\lfloor (c-j)/b_k \rfloor} \quad (4.50)$$

ενώ η **πιθανότητα συμφόρησης στο χρόνο** (δηλαδή η πιθανότητα να είναι κατειλημμένες το λιγότερο $C - b_k + 1$ μονάδες εύρους ζώνης) είναι:

$$B_{b_k} = \sum_{j=C-b_k+1}^c \frac{q(j)}{G}, \quad \text{με } G = \sum_{j=0}^c q(j) \quad (4.51)$$

4.3.11 Παράδειγμα εύρεσης πιθανότητας απώλειας κλήσεων στο BP-EMLM.

Έστω ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα με 3 κατηγορίες κίνησης και τα εξής χαρακτηριστικά:

Περίμετρος κυψέλης **$L = 2$ km**

Πυκνότητα χρηστών στο σύστημα **$p = 2000$ UEs/km²**

Ρυθμός εξυπηρέτησης κάθε κατηγορίας **$\lambda \{1.5, 1, 0.5\}$ sessions/hr**

Ρυθμός εξυπηρέτησης **$\mu^{-1} \{0.02, 0.45, 0.2\}$ hr/sessions**

Απαίτηση εύρους ζώνης κάθε κατηγορίας **$b \{2, 8, 10\}$ b.u.**

Γεωμετρική κατανομή ομάδων με συντελεστή για κάθε κίνηση **$\beta \{0.2, 0.5, 0.8\}$**

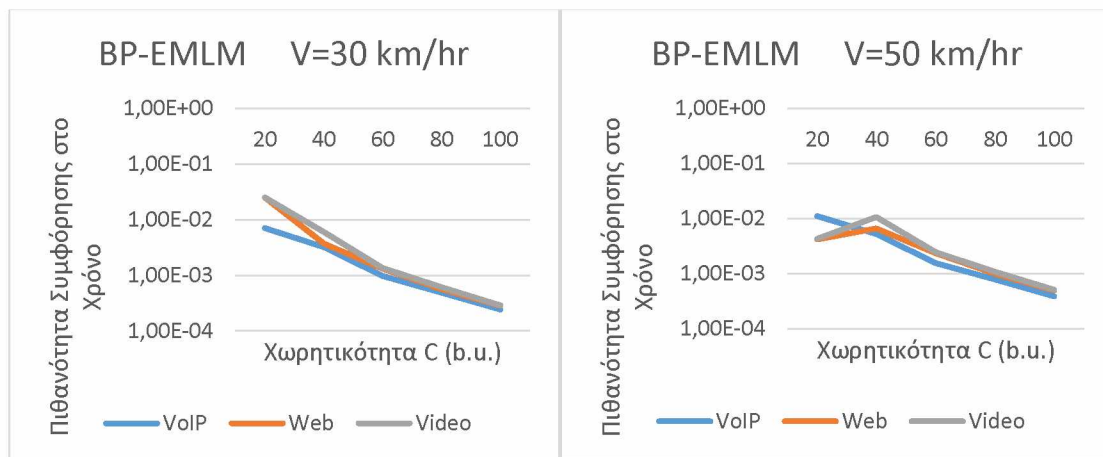
Χρονική διάρκεια μεταπομπής **$T = 0, 02$ sec**



Με χρήση του αλγορίθμου Batch Poisson που είναι γραμμένος σε κώδικα C, βγάζουμε τις πιθανότητες συμφόρησης στο χρόνο και τις πιθανότητες απώλειας κλήσεων για κάθε κατηγορία εφαρμογών.

Πιθανότητες Συμφόρησης στο Χρόνο.

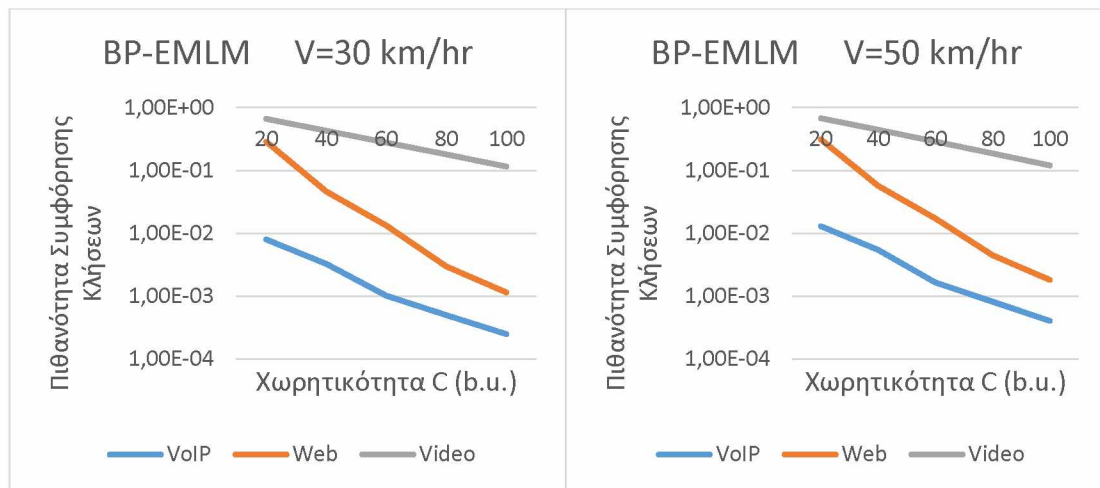
C (b.u.)	V=30			V=50		
	VoIP	Web	Video	VoIP	Web	Video
	$a_1 = 0.0061$	$a_2 = 0.0658$	$a_3 = 0.0192$	$a_1 = 0.0103$	$a_2 = 0.1097$	$a_3 = 0.0321$
	$b_1 = 2 \text{ b.u.}$	$b_2 = 8 \text{ b.u.}$	$b_3 = 10 \text{ b.u.}$	$b_1 = 2 \text{ b.u.}$	$b_2 = 8 \text{ b.u.}$	$b_3 = 10 \text{ b.u.}$
$\beta_1 = 0,2$	$\beta_2 = 0,5$	$\beta_3 = 0,8$	$\beta_1 = 0,2$	$\beta_2 = 0,5$	$\beta_3 = 0,8$	
20	7,037E-3	2,49E-2	2,50E-2	1,11E-2	0,42E-2	0,43E-2
40	3,19E-3	3,7E-3	5,99E-3	5,25E-3	6,64E-3	1,07E-2
60	9,77E-4	1,32E-3	1,35E-3	1,56E-3	2,36E-3	2,44E-3
80	4,86E-4	5,63E-4	6,09E-4	7,84E-4	9,97E-4	1,09E-3
100	2,42E-4	2,82E-4	2,87E-4	3,89E-4	4,98E-4	5,12E-4



Σχήμα 25: Πιθανότητα Συμφόρησης ομαδικών κλήσεων στο χρόνο σε λογαριθμική κλίμακα.

Πιθανότητες Συμφόρησης Κλήσεων.

C (b.u.)	V=30			V=50		
	VoIP	Web	Video	VoIP	Web	Video
	$a_1 = 0.0061$	$a_2 = 0.0658$	$a_3 = 0.0192$	$a_1 = 0.0103$	$a_2 = 0.1097$	$a_3 = 0.0321$
	$b_1 = 2$	$b_2 = 8$	$b_3 = 10$	$b_1 = 2$	$b_2 = 8$	$b_3 = 10$
$\beta_1 = 0,2$	$\beta_2 = 0,5$	$\beta_3 = 0,8$	$\beta_1 = 0,2$	$\beta_2 = 0,5$	$\beta_3 = 0,8$	
20	7,95E-3	2,87E-1	6,62E-1	1,29E-2	3,11E-1	6,75E-1
40	3,25E-3	4,62E-2	4,31E-1	5,41E-3	5,67E-2	4,45E-1
60	1,01E-3	1,32E-2	2,78E-1	1,63E-3	1,72E-2	2,88E-1
80	4,97E-4	2,96E-3	1,79E-1	8,11E-4	4,45E-3	1,86E-1
100	2,47E-4	1,14E-3	1,15E-1	4,02E-4	1,80E-3	1,20E-1



Σχήμα 26: Πιθανότητα Συμφόρησης ομαδικών κλήσεων σε λογαριθμική κλίμακα.

4.3.12 Συμπεράσματα

- Το μοντέλο BKR θεωρείται αρκετά πολύπλοκο και χρονοβόρο καθώς ο αυξανόμενος αριθμός χρηστών σε ένα τέτοιο σύστημα σε συνδυασμό με πολλές κατηγορίες κίνησης ($k \geq 3$) και μεγάλη χωρητικότητα συστήματος απαιτεί πολλούς υπολογισμούς.
- Το μοντέλο BKR στη παρούσα πτυχιακή αναλύθηκε σε πολιτική δέσμευσης πλήρους διάθεσης εύρους ζώνης (CS-Policy) η οποία θεωρείται και η πιο ελαστική απο τις άλλες μεθόδους. Η ενσωμάτωση άλλης πολιτικής πέραν αυτής



θα έκανε το μοντέλο ακόμα πιο δύσκολο στην μελέτη του και στην κατανόηση του.

- Στη σύγκριση των μεθόδων BKR & WLR παρατηρούμε ότι για όλες τις κατηγορίες κίνησης τα αποτελέσματα έχουν πολύ μικρή απόκλιση όταν η χωρητικότητα του συστήματος είναι παραπλήσια με την μεγαλύτερη χωρητικότητα που απαιτεί η κατηγορία κίνησης k (2^ο παράδειγμα σύγκρισης). Για διαφορετικά δεδομένα (1^ο παράδειγμα σύγκρισης) η απόκλιση μεταξύ των κατηγοριών κίνησης έχουν μικρή (πάλι) διαφορά, με μεγάλη απόκλιση σε μία κατηγορία κίνησης. Επίσης συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η πιθανότητα συμφόρησης (δηλαδή μείωση της χωρητικότητας του συστήματος) για κάθε χρήστη, τόσο τα αποτελέσματα μας είναι πιο κοντά.
- Στα μοντέλα που ακολουθούν τη διαδικασία Erlang μέσω του αναδρομικού τύπου Kaufman-Roberts έχουμε χαμηλή πολυπλοκότητα ως προς τον υπολογισμό των πιθανοτήτων συμφόρησης κάνοντας τα ιδανικά για συστήματα με μεγάλη χωρητικότητα και πολλές κατηγορίες κίνησης.
- Στο μοντέλο WLR και με τις δύο πολιτικές διάθεσης παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα των χρηστών τόσο μεγαλώνει και η πιθανότητα συμφόρησης της κάθε κίνησης. Επίσης όσο μεγαλύτερη η χωρητικότητα του συστήματος τόσο μικρότερη η πιθανότητα συμφόρησης.
- Σε επίπεδο ελέγχου στο WLR, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του χρήστη, τόσο αυξάνεται και το απαιτούμενο εύρος, ενώ για το επίπεδο χρήστη παρατηρείται ότι όσο πιο μικρό το απαιτούμενο εύρος ζώνης κάθε κατηγορίας, τόσο πιο μικρή η πιθανότητα συμφόρησης της.
- Στο μοντέλο απωλειών ομαδικών κλήσεων έχουμε δύο πιθανότητες συμφόρησης (συμφόρηση χρόνου, συμφόρηση κλήσεων) εν αντιθέση των προηγούμενων μοντέλων. Και σε αυτή τη περίπτωση, όσο αυξάνεται η χωρητικότητα της εκάστοτε κατηγορία κίνησης ή η ταχύτητα των χρηστών, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η πιθανότητα συμφόρησης του συστήματος. Επίσης για την καλύτερη διαστασιολόγηση ενός συστήματος θα πρέπει να λαμβάνουμε πάντα υπόψη τη χειρότερη πιθανότητα μεταξύ των πιθανοτήτων χρόνου και κλήσεων.



REFERENCES

- [1] Ντερέκης Γεώργιος, “Εξασφάλιση της ποιότητας εξυπηρέτησης στην διασύνδεση X2 δικτύου τεχνολογίας LTE που εξυπηρετεί πολυδιάστατη τυχαία κίνηση.”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σεπτέμβριος 2016.
- [2] Ισπανόπουλος Νικόλαος, “Μοντελοποίηση συστήματος απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης κλήσεων με χρήση των πολιτικών κατωφλίου και δέσμευσης εύρους ζώνης.”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σεπτέμβριος 2015.
- [3] Κωσταντινίδης Ηρακλής, “Υπολογισμός απωλειών ελαστικών κλήσεων πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης στην ανερχόμενη ζεύξη κυψέλης WCDMA”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σεπτέμβριος 2013.
- [4] Παναγούλιας Ι. Παναγιώτης “Υπολογισμός απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης ψευδοτυχαίας κίνησης στη διασύνδεση X2 δικτύου τεχνολογίας LTE”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Μάιος 2016.
- [5] Δημήτρης Π. Μπερτέκας, Γιάννης Ν. Τσιτσικλής, “Εισαγωγή στις πιθανότητες με στοιχεία στατιστικής”, Εκδόσεις Τζιόλα
- [6] Μ. Λογοθέτης, “Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως και Εφαρμογές”, β’ έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2012.
- [7] Markov Processes, <http://www.randomservices.org/random/markov/index.html>
- [8] Markov Chains explained visually, <http://setosa.io/ev/markov-chains/>
- [9] Wolfram Research, Inc, <http://mathworld.wolfram.com/MarkovProcess.html>
- [10] Χαραλαμπίκης Εμμανουήλ, “Βελτιστοποιημένος Αλγόριθμος Διαχείρισης Κλήσεων σε Ασύρματα Κυτταρικά Συστήματα Επικοινωνιών”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σεπτέμβριος 2013.
- [11] Αργυρόπουλος Κωνσταντίνος, “Ανάπτυξη Αλγορίθμου Διαχείρισης Κλήσεων σε Ασύρματα Κυτταρικά Συστήματα Επικοινωνιών με Προτεραιότητα σε Κλήσεις Μεταγωγής”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Ιούνιος 2011
- [12] Ανθάκη Ευδοξία, “Ανάπτυξη Αλγορίθμου Διαχείρισης κλήσεων σε ασύρματα Κυτταρικά Συστήματα Επικοινωνιών”, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Μάιος 2011
- [13] Χρήστου Βασίλης, “Τεχνοοικονομική ανάλυση 4G”, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Ιούνιος 2012
- [14] https://en.wikipedia.org/wiki/LTE_Advanced_Pro
- [15] Westbase.io, “What is LTE-Advanced Pro”, <https://www.westbase.io/what-is-lte-advanced-pro-mean-iot/>



[16] GPRS Network Architecture, SMNAWAZ, <https://smnawaz.blogspot.com/2012/11/gprs-network-architecture.html>

[17] 5G Architecture, VIAVI, <https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-architecture>

[18] <https://en.wikipedia.org/wiki/5G#Technology>

[19] G. A. Kallos, V. G. Vassilakis, I. D. Moscholios, and M. D. Logothetis, "Performance Modelling of W-CDMA Networks Supporting Elastic and Adaptive Traffic", in Proc. 4th International Working Conference on Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks (HET-NETs 2006), Ilkley, West Yorkshire, U.K., 11-13 September, 2006, pp. 09/1-09/10.

[20] J.S. Kaufman, "Blocking with retrials in a completely shared resource environment", North-Holland, Performance Evaluation, Vol. 15, Issue 2, pp. 99-113, June 1992.

[21] E. van Doorn and F. Panken, "Blocking Probabilities in a loss system with arrivals in geometrically distributed batches and heterogeneous service requirements", IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol 1, No 6, pp. 664-667, December 1993.

[22] Alexandre Blogowski, Oliver Klopfenstein, and Benjamin Renard, "Dimensioning X2 backhaul link in LTE networks". IEEE International Conference on Communications (ICC), June 2012.

[23] H. La Roche I. Widjaja. "Sizing X2 bandwidth for Inter-connected eNBs". Proc. IEEE VTC Fall, Anchorage, Alaska, USA, 2009.

Σχήματα

[S1] **Σχήμα 1-4 & 14 & 24** Ντερέκης Γεώργιος, "Εξασφάλιση της ποιότητας εξυπηρέτησης στην διασύνδεση X2 δικτύου τεχνολογίας LTE που εξυπηρετεί πολυδιάστατη τυχαία κίνηση.", Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σεπτέμβριος 2016.

[S2] **Σχήμα 16-17** Παναγούλιας Ι. Παναγιώτης "Υπολογισμός απωλειών κλήσεων πολυδιάστατης ψευδοτυχαίας κίνησης στη διασύνδεση X2 δικτύου τεχνολογίας LTE", Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Μάιος 2016.

[S3] **Σχήμα 7** <https://www.slideshare.net/hemangkothari/general-packet-radio-service-53137966>

[S4] **Σχήμα 8** <https://www.ques10.com/p/2963/umts-architecture-and-utra-fdd-and-tdd-modes-1/?>

[S5] **Σχήμα 9** <https://www.slideshare.net/HoseinYavari/lte-architecture-overview>

[S6] **Σχήμα 10** 5G Architecture, VIAVI, <https://www.viavisolutions.com/en-us/5g-architecture>



[S7] Σχήμα 13 https://www.tutorialspoint.com/lte/lte_network_architecture.htm

Παράρτημα Α

Υλοποίηση μοντέλων πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης σε γλώσσα C (3^ο Κεφάλαιο).

1. Υλοποίηση του μοντέλου Engset.

```
q[0]=1;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for(j=1;j<=C;j++){

    sum=0;
    for(i=0;i<K;i++){

        if(j-b[i]<0) sum+=0;
        else sum+=a[i]*b[i]*q[j-b[i]];
    }
    q[j]=(double)(sum/j);
    printf("\nq[%d]=%f",j,q[j]);
}

double G=0;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=C;j++) G=G+q[j];
printf("\nTotal G = %lf",G);
printf("\n");

double q_l[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=C;j++){
    q_l[j]=q[j]/G;
    printf("\nq' [%d]=%lf",j,q_l[j]);
}

printf("\n\n");
//μέση τιμή κλήσεων
for(i=0;i<K;i++){

    for(j=0;j<=C;j++){

        y[i][j]=(a[i]*q_l[j-b[i]])/q_l[j];
        printf("y[%d][%d]=%f\n",i,j,y[i][j]);
    }
    printf("\n");
}

for(i=0;i<K;i++) a[i]=l[i]/m[i]; //νέο φορτίο κίνησης
```



```
// εύρεση νέας πιθανότητας q(j)
for(j=1;j<=C;j++){

    sum=0;
    for(i=0;i<K;i++){

        if(j-b[i]<0) sum+=0;
        else sum+=(N[i]-y[i][j-b[i]])*a[i]*b[i]*q[j-b[i]];
    }
    q[j]=(double)(sum/j);
    printf("\nNeo q[%d]=%f",j,q[j]);
}

G=0;
// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=C;j++) G=G+q[j];
printf("\nNeo Total G=%f",G);

printf("\n-----\n");

double pb[K];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης για κάθε κατηγορία
for(i=0;i<K;i++){
    pb[i]=0;
    for(j=C-b[i]+1;j<=C;j++){
        pb[i]+=q[j]/G;
    }
    printf("Pb[%d]=%f\n",i,pb[i]);
}
```

2. Υλοποίηση του μοντέλου απλής επανάκλησης (Single Retry Model).

```
printf("\n-----\n");

float q[C+1];

q[0]=1;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for(j=1;j<=C;j++){

    sum=0;
    for(i=0;i<K;i++){

        if(j-b[i]<0) sum+=0;
        else sum+=a[i]*b[i]*q[j-b[i]];
    }
}
```



```
        if(j>C-b[i]+b_r[i]){

            if(j-b_r[i]<0 || b_r[i]==0) sum+=0;
            else sum+=a_r[i]*b_r[i]*q[j-b_r[i]];
        }

    }
    q[j]=(float) (sum/j);
    printf("q[%d]=%f\n",j,q[j]);
}

printf("\n-----\n");
double G=0;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=C;j++) G=G+q[j];
printf("\nTotal G = %lf",G);
printf("\n");

printf("\n-----\n");
double q_l[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=C;j++){
    q_l[j]=q[j]/G;
    printf("\nq' [%d]=%lf",j,q_l[j]);
}

printf("\n-----\n");
double pb[K],pb_r[K];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk_r
for(i=0;i<K;i++){
    pb_r[i]=0;
    for(j=C-b_r[i]+1;j<=C;j++){
        pb_r[i]+=q_l[j];
    }
    printf("Pb_r[%d]=%f\n",i,pb_r[i]);
}

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk
for(i=0;i<K;i++){
    pb[i]=0;
    for(j=C-b[i]+1;j<=C;j++){
        pb[i]+=q_l[j];
    }
    printf("Pb[%d]=%f\n",i,pb[i]);
}

/* εύρεση δεσμευμένης πιθανότητας bk_r δεδομένου ότι έχει απορριφθεί
με εύρος ζώνης bk */
for(i=0;i<K;i++) printf("Desmeumeni pithanotita Pb[%d]=%f\n",i,pb_r[i]/pb[i]);
```



3. Υλοποίηση του μοντέλου πολλαπλής επανάκλησης (Multi Retry Model).

```
#include <stdio.h>

#define K 2

main(int argc, char *argv[]){

    int C;

    int j,i,k;
    int retries;

    /*μέγιστα retries ανεξαρτήτου κατηγορίας
    - Κατηγορίες που δεν έχουν βάζουμε 0 στα δεδομένα τους. */
    printf("Retries for traffic: ");
    scanf("%d",&retries);

    float a_r[K][retries+1];
    int b_r[K][retries+1];

    printf("Capacity: ");
    scanf("%d",&C);

    for(i=0;i<K;i++){

        printf("b%d: ",i);
        scanf("%d",&b_r[i][0]);
        printf("a%d: ",i);
        scanf("%f",&a_r[i][0]);

        for(j=1;j<=retries;j++){

            printf("b%dr%d: ",i,j);
            scanf("%d",&b_r[i][j]);
            printf("a%dr%d: ",i,j);
            scanf("%f",&a_r[i][j]);
        }
    }

    float q[C+1];
    float sum;
    int y;

    q[0]=1;

    // εύρεση πιθανοτήτων q(j)
    for(j=1;j<=C;j++){

        printf("\n-----\nGia j=%d exw\n",j);
        sum=0;
```



```
for(k=0;k<K;k++){

    if(j-b_r[k][0]<0) sum+=0;
    else sum+=a_r[k][0]*b_r[k][0]*q[j-b_r[k][0]];
    for(i=1;i<=retries;i++){

        if(C-(b_r[k][i-1]-b_r[k][i])<j) y=1;
        else y=0;

        if(j-b_r[k][i]<0 || b_r[k][i]==0) sum+=0;
        else sum+=a_r[k][i]*b_r[k][i]*y*q[j-b_r[k][i]];
    }
    printf("sum:%f\n",sum);
    q[j]=(float)(sum)/j;
    printf("\nq[%d]=%f",j,q[j]);
}

printf("\n-----\n");
float G=0;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=C;j++) G=G+q[j];
printf("\nTotal G = %f",G);
printf("\n");

printf("\n-----\n");
float q_l[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=C;j++){
    q_l[j]=q[j]/G;
    printf("\nq' [%d]=%f",j,q_l[j]);
}

printf("\n-----\n");
float pb_r[K][retries+1];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk
for(i=0;i<K;i++){
    pb_r[i][0]=0;
    for(j=C-b_r[i][0]+1;j<=C;j++){
        pb_r[i][0]+=q_l[j];
    }
    printf("Pb[%d]=%f\n",i,pb_r[i][0]);
}
```



```
printf("\n-----\n");
// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk_r
for(k=0;k<K;k++){

    for(j=1;j<=retries;j++){
        pb_r[k][j]=0;
        for(i=C-b_r[k][j]+1;i<=C;i++){
            pb_r[k][j]+=q_l[i];
        }
        printf("Pb%d[%d]=%f\n",k,j,pb_r[k][j]);
    }
}

printf("\n-----\n");
/* εύρεση δεσμευμένης πιθανότητας bk_r δεδομένου ότι έχει απορριφθεί
με εύρος ζώνης bk_r-1 */
for(k=0;k<K;k++){
    for(j=1;j<=retries;j++){

        printf("Desmeuemenh pithanotita Pb%d[%d]=%f\n",k,j,pb_r[k][j]/pb_r[k][j-1]);
    }
}
```

4. Υλοποίηση του μοντέλου κατωφλιού (Single Threshold Model).

```
#include <stdio.h>

#define K 2

int main(int argc, char *argv[]){

    int C;

    float a[K],a_c[K];
    int b[K],b_c[K];
    int i,j,Jo;
    float delta,sum;

    printf("Capacity: ");
    scanf("%d",&C);
    printf("Threshold: ");
    scanf("%d",&Jo);

    for(i=0;i<K;i++){

        printf("b%d: ",i);
        scanf("%d",&b[i]);
        printf("a%d: ",i);
        scanf("%f",&a[i]);
        printf("b%dc: ",i);
        scanf("%d",&b_c[i]);
        printf("a%dc: ",i);
        scanf("%f",&a_c[i]);
    }
}
```



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

```
printf("\n-----\n");

float q[C+1];

q[0]=1;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for(j=1;j<=C;j++){

    printf("\n-----\nGia j=%d exw\n",j);
    sum=0;
    for(i=0;i<K;i++){

        if(j>=1 && j<=Jo+b[i] && b_c[i]>0) delta=1; //δ_k
        else delta=0;

        if(j-b[i]<0) sum+=0;
        else sum+=a[i]*b[i]*q[j-b[i]];

        if(j>Jo+b_c[i]) delta=1; //δ_k_c
        else delta=0;

        if(j-b_c[i]<0 || b_c[i]==0) sum+=0;
        else sum+=a_c[i]*b_c[i]*delta*q[j-b_c[i]];
    }
    q[j]=(float) (sum)/j;
    printf("\nq[%d]=%.4f",j,q[j]);
}

printf("\n-----\n");
double G=0;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=C;j++) G=G+q[j];
printf("\nTotal G = %lf",G);
printf("\n");

printf("\n-----\n");
double q_1[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=C;j++){
    q_1[j]=q[j]/G;
    printf("\nq'[%d]=%lf",j,q_1[j]);
}

printf("\n-----\n");
double pb[K],pb_c[K];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk
for(i=0;i<K;i++){
    pb[i]=0;
    for(j=C-b[i]+1;j<=C;j++){
        pb[i]+=q_1[j];
    }
    printf("Pb[%d]=%f\n",i,pb[i]);
}
```




```
// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk_r
for(i=0;i<K;i++){
    pb_c[i]=0;
    for(j=C-b_c[i]+1;j<=C;j++){
        pb_c[i]+=q_l[j];
    }
    printf("Pb_c[%d]=%f\n",i,pb_c[i]);
}

/* εύρεση δεσμευμένης πιθανότητας bk_r δεδομένου ότι έχει απορριφθεί
με εύρος ζώνης bk */
for(i=0;i<K;i++){
    pb[i]=0;
    for(j=Jc+1;j<=C;j++){
        pb[i]+=q_l[j];
    }
}

for(i=0;i<K;i++) printf("\nDesmeumeni pithanotita Pb[%d]=%f",i,pb_c[i]/pb[i]);

return 0;
}
```

5. Υλοποίηση του μοντέλου πολλαπλών κατωφλιών (Multi Threshold Model).

```
#include <stdio.h>

#define K 2

int main(int argc, char *argv[]){

    int j,i,k;
    int thresholds;
    int C;

    printf("Capacity: ");
    scanf("%d",&C);

    /*μέγισια threshold ανεξαρτήτου κατηγορίας
    - Κατηγορίες που δεν έχουν βάζουμε 0 στα δεδομένα τους. */
    printf("Choose number of thresholds: ");
    scanf("%d",&thresholds);

    float a_c[K][thresholds+1];
    int b_c[K][thresholds+1];
    int J[thresholds];

    for(i=0;i<K;i++){
```



```
printf("b%d: ", i);
scanf("%d", &b_c[i][0]);
printf("a%d: ", i);
scanf("%f", &a_c[i][0]);

for(j=1; j<=thresholds; j++) {

    printf("b%dc%d: ", i, j);
    scanf("%d", &b_c[i][j]);
    printf("a%dc%d: ", i, j);
    scanf("%f", &a_c[i][j]);
}
}

for(i=0; i<thresholds; i++) {
    printf("J%d: ", i);
    scanf("%d", &J[i]);
}

float q[C+1];
float sum;
int y, delta;

q[0]=1;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for(j=1; j<=C; j++) {
    printf("\n-----\nGia j=%d exw\n", j);
    sum=0;
    for(k=0; k<K; k++) {

        //δ_k
        if((1<=j && J[0]+b_c[k][0]>=j && b_c[k][1]>0) || (1<=j && C>=j && b_c[k][1]==0)) delta=1;

        if(j-b_c[k][0]<0) sum+=0;
        else sum+=a_c[k][0]*b_c[k][0]*delta*q[j-b_c[k][0]];

        for(i=1; i<=thresholds; i++) {

            if(J[i]+b_c[k][j]>=j && j>=J[i-1]+b_c[k][i]) delta=1; //δ_k_c(j)

            if(j-b_c[k][i]<0 || b_c[k][i]==0) sum+=0;
            else sum+=a_c[k][i]*b_c[k][i]*delta*q[j-b_c[k][i]];
        }
    }
    q[j]=(float) (sum)/j;
    printf("\nq[%d]=%.4f", j, q[j]);
}

printf("\n-----\n");
float G=0;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0; j<=C; j++) G=G+q[j];
printf("\nTotal G = %f", G);
printf("\n");
```



```
printf("\n-----\n");
float q_l[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=C;j++){
    q_l[j]=q[j]/G;
    printf("\nq'[%d]=%f",j,q_l[j]);
}

printf("\n-----\n");
double pb[K],pb_c[K][thresholds],pJ[thresholds];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk
for(i=0;i<K;i++){
    pb[i]=0;
    for(j=C-b_c[i][0]+1;j<=C;j++){
        pb[i]+=q_l[j];
    }
    printf("Pb[%d]=%f\n",i,pb[i]);
}

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης με εύρος ζώνης bk_r
for(k=0;k<K;k++){

    for(i=0;i<thresholds;i++){
        pb_c[k][i]=0;
        for(j=C-b_c[k][i+1]+1;j<=C;j++) pb_c[k][i]+=q_l[j];
        printf("Pb_&dc[%d]=%f\n",k,i,pb_c[k][i]);
    }
}

/* εύρεση δεσμευμένης πιθανότητας bk_c δεδομένου ότι έχει απορριφθεί
με εύρος ζώνης bk */

for(i=0;i<thresholds;i++){
    pJ[i]=0;
    for(j=J[i];j<=C;j++) pJ[i]+=q_l[j];
    printf("J[%d]=%f\n",i,pJ[i]);
}

for(k=0;k<K;k++){
    for(j=0;j<thresholds;j++){
        printf("Desmeumenh pithanotita Pb&d[%d]=%f\n",k,j,pb_c[k][j]/pJ[j]);
    }
}
return 0;
}
```



Παράρτημα Β

Υλοποίηση μοντέλων πολυδιάστατης τυχαίας κίνησης πάνω στη διασύνδεση X2 σε γλώσσα C (4^ο Κεφάλαιο).

1. Υπολογισμός αποτελεσμάτων WLR-BKR.

Η υλοποίηση γίνεται στο αρχείο BKR-WLR.c το οποίο περιλαμβάνει ένα αρχείο κεφαλίδας αρχείο BKR-WLR.h και ένα αρχείο με τις συναρτήσεις με ονομασία Function.c

Το αρχείο κεφαλίδας BKR-WLR.h

```
//δομή χρήστη συμφόρησης
typedef struct CongArray{
    int dx2;
    int i,j,m;
}CongArray;

//αρχικοποίηση συναρτήσεων
double handover_probability(float u,float D,float R);
void WLR_Prob(double *a,int *b,int C,double *P_exit);
void BKR_Prob(int *b,int C,double *user,double *P_exit,double *dur,double T);
double VectorProb_ki(struct CongArray C,double p, double *user);
double binomial(int n,int r,double p);
double factorial(int N,int r);
```

Το “main” αρχείο που καλούνται οι συναρτήσεις BKR-WLR.c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include "BKR-WLR.h"
#include "Functions.c"

#define K 3

int main(int argc,char *argv[]){

    int i;
    double k,l,m;
    double R,u,T,temp;
    int C_x2,N;
    int b[K];
    double users[K];
    double dur[K];
    double a[K];

    printf("EISAGWGH STOIXEIWN\n\n");
```



```
printf("Dwse aktina kipselis R (km): ");
scanf("%lf",&R);
printf("Dwse taxitita xristi u (km): ");
scanf("%lf",&u);
printf("Dwse diakopi epikoinwnias T (sec): ");
scanf("%lf",&T);
printf("Xwrhtikotita Sistimatos (Kbps): ");
scanf("%d",&C_x2);
printf("Xristes sto sistima: ");
scanf("%d",&N);

for(i=0;i<K;i++){

    printf("\nKATHGORIA KINHSHS %d\n\n",i);
    printf("Apaithsi kathgorias kinisis b%d: ",i);
    scanf("%d",&b[i]);
    printf("Katanomi xristwn %d kathgorias (dekadiki morfi): ",i);
    scanf("%lf",&temp);
    users[i]=temp*N;
    printf("Xroniki diarkeia klshs dur[%d]: ",i);
    scanf("%lf",&dur[i]);

    a[i]= (2*(u/3600)*T*users[i])/(M_PI*R); //φορτίο κίνησης
    printf("a[%d]=%.8f\n",i,a[i]);

    printf("\n-----\n");

double P_exit[K];

//Πιθανότητα εξόδου χρήστη απο τη κυψέλη
for(i=0;i<K;i++){
    P_exit[i]=handover_probability(u,dur[i],R);
    printf("P_exit[%d] = %f\n",i,P_exit[i]);
    printf("-----\n");
}

printf("\n-----W L R-----\n");
WLR_Prob(a,b,C_x2,P_exit);
printf("\n-----B K R-----\n");
BKR_Prob(b,C_x2,users,P_exit,dur,T);

return 0;
}
```



Το αρχείο Functions.c που καλούνται όλες οι συναρτήσεις για τον υπολογισμό μέσω μοντέλων BKR & WLR.

```
#include <math.h>
#define K 3

double handover_probability(float u, float D, float R) {
    double max_duration= (M_PI*R)/(2*(u/3600));
    printf("Max duration = %f\n",max_duration);

    double P_exit;

    if(max_duration<D){
        P_exit=1;
        return P_exit;
    }

    P_exit = (2*(u/3600)*D)/(M_PI*R);
    return P_exit;
}

/*-----*/

void WLR_Prob(double *a,int *b,int C,double *P_exit){

    int i,j;

    double q[C+1];
    double sum=0;

    q[0]=1;

    for(j=1;j<=C;j++){

        for(i=0;i<K;i++){

            if(j-b[i]<0) sum+=0;
            else sum+=(double)a[i]*b[i]*q[j-b[i]];
        }
        q[j]=(double)sum/j;
        sum=0;
    }

    double G;

    for(j=0;j<=C;j++) G=G+q[j];

    double q_1[C+1];

    for(j=0;j<=C;j++){
        q_1[j]=q[j]/G;
        //printf("\nq' [%d]=%f",j,q_1[j]);
    }

    double pb[K];
```



```
for(i=0;i<K;i++){
    for(j=C-b[i]+1;j<=C;j++){
        pb[i]+=q_1[j];
    }
}

printf("\nΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ SIMFORISIS KINISIS\t\tΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ SIMFORISIS KLHSHS\n\n");
for(i=0;i<K;i++){
    printf("Pb%d=%.20f\t\t",i,pb[i]);
    printf("Pcc,%d=%.20lf\n",i,P_exit[i]*pb[i]);
}
}

/*-----*/

void BKR_Prob(int *b,int C,double *user,double *P_exit,double *dur,double T){

    int i,j,m,k;
    int sum;
    int counter[K],round[K];

    //εύρεση χρηστών που προκαλούν συμφόρηση για κάθε κατηγορία
    for(k=0;k<K;k++){
        user[k]--;
        counter[k]=0;
        round[k]=0;

        for(i=0;i<=(int)user[0];i++){
            for(j=0;j<=(int)user[1];j++){
                for(m=0;m<=(int)user[2];m++){

                    sum=(i*b[0])+(j*b[1])+(m*b[2])+b[k];
                    if(sum>C) counter[k]++;

                    round[k]++;
                }
            }
        }

        user[k]++;
        printf("\n-----\n");
        printf("katanomi xristwn: %d\n",round[k]);
        printf("xristes pou prokaloun simforisi: %d\n",counter[k]);
    }

    //καταχώρηση χρηστών που προκαλούν συμφόρηση για κάθε κατηγορία
    for(k=0;k<K;k++){

        user[k]--;
        cout=0;
        struct CongArray Cong[counter[k]];

        for(i=0;i<=(int)user[0];i++){
            for(j=0;j<=(int)user[1];j++){
                for(m=0;m<=(int)user[2];m++){
```



```
sum=(i*b[0])+(j*b[1])+(m*b[2])+b[k];
if(sum>C){
    Cong[cout].dx2=sum;
    Cong[cout].i=i;
    Cong[cout].j=j;
    Cong[cout].m=m;
    cout++;
}
}
}
}

double prob=0;
double temp=0;

//πιθανότητα εξόδου χρήστη κατηγορίας k κατά τη διάρκεια κλήσης
double pp = (P_exit[k]*T)/(double)dur[k];

for(i=0;i<counter[k];i++){
    temp=VectorProb_ki(Cong[i],pp,user);
    prob+=temp;
}

printf("\nPb%d=%.20lf\t\tPcc,%d=%.10lf",k,prob,k,prob*P_exit[k]);
user[k]++;
}
}

/*-διωνυμικός συντελεστής-*/
double factorial(int N,int r){

    int i;
    double sum;

    for(i=1;i<=N;i++) sum+= log(i);

    for(i=1;i<=r;i++) sum-= log(i);

    for(i=1;i<=N-r;i++) sum-= log(i);

    sum = exp(sum);

    return sum;
}
```




```
/*--χρήση της συνάρτησης μάζας πιθανότητας διωνυμικής κατανομής--*/  
double binomial(int n,int r,double p){  
  
    double oros1,oros2,oros3;  
  
    oros1=factorial(n,r);  
  
    oros2=pow(p,(double)r);  
  
    oros3=pow(1-p,(double)n-r);  
  
    return oros1*oros2*oros3;  
}  
  
/*-- πιθανότητα εξόδου κατα τη διάρκεια χρονικού διαστήματος T ενός  
συνδυασμού χρήστη --*/  
double VectorProb_ki(struct CongArray C,double p,double *user){  
  
    double prob=1;  
    int i;  
    int k[3]={C.i,C.j,C.m};  
  
    for(i=0;i<3;i++){  
  
        prob*=binomial(user[i],k[i],p);  
    }  
  
    return prob;  
}
```

Σημειώνεται ότι ο παρόν κώδικας δίνει αποτελέσματα BKR μόνο για $K=3$. Για χρήση του μοντέλου για διαφορετικά K θα πρέπει να τροποποιηθεί από τη συνάρτηση *BKR_Prob* οι επαναλήψεις εύρεσης χρηστών που απαιτούν μεγαλύτερη χωρητικότητα από την υφιστάμενη του συστήματος και να αυξηθούν (ή να μειωθούν) οι παράμετροι στη δομή που αποθηκεύει τους χρήστες συμφοράρησης.



2. Υπολογισμός αποτελεσμάτων WLR με πολιτική πλήρους διάθεσης (CS-EMLM).

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας συμφόρησης των κατηγοριών κίνησης k , θα πρέπει να βρεθεί το φορτίο κίνησης της κάθε κατηγορίας $a(k)$. Αυτό το επιτυγχάνουμε μέσω του κώδικα Calculate_a[k].c

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#define K 3 //κατηγορίες κίνησης χρηστών

int main(int argc, char *argv[]){

    double p; //πυκνότητα χρηστών στο σύστημα μας
    double V; //μέση ταχύτητα χρηστών
    double L; //Περίμετρος κυψέλης
    double T; //χρονική διάρκεια διακοπής κλήσης

    double l[K]; //ρυθμός άφιξης κλήσεων ( $\lambda$ )
    double m[K]; //ρυθμός εξυπηρέτησης ( $1/\mu$ )

    double a[K]; //φορτίο κίνησης κατηγοριών
    double p_A[K]; //πιθανότητα χρήστη να βρίσκεται σε ενεργή σύνοδο
    double R;

    int i,j;

    printf("Piknotita xristwn p: ");
    scanf("%lf",&p);
    printf("Mesi taxitita xristwn V: ");
    scanf("%lf",&V);
    printf("Perimetros Kipselis L: ");
    scanf("%lf",&L);
    printf("Xroniki diarkeia diakopis T: ");
    scanf("%lf",&T);

    for(i=0;i<K;i++){

        printf("Rithmos afiksis klisewn l%d: ",i);
        scanf("%lf",&l[i]);
        printf("Rithmos eksipiretisis m%d: ",i);
        scanf("%lf",&m[i]);
        m[i]=1/m[i]; //μετατροπή ( $1/\mu$ ) ->  $\mu$ 
    }
}
```



```
// εύρεση φορτίου κίνησης για κάθε κατηγορία α(k)
for (i=0; i<K; i++) {

    p_A[i]=l[i]/(l[i]+m[i]);
    R=(p*(V/3600)*L)/M_PI;
    a[i]=p_A[i]*R*T;
    printf("\na[%d]=%.1f\n", i, a[i]);
}

return 0;
}
```

Υπολογισμός πιθανότητας συμφόρησης μέσω του κώδικα EMLM.c

```
q[0]=1;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for (j=1; j<=C; j++) {

    for (i=0; i<K; i++) {

        if (j-b[i]<0) sum+=0;
        else sum+=a[i]*b[i]*q[j-b[i]];
    }
    q[j]=(double) (sum/j);
    printf("\nq[%d]=%1f", j, q[j]);
    sum=0;
}

double G=0;

// υπολογισμός σταθεράς G
for (j=0; j<=C; j++) G=G+q[j];
printf("\nTotal G = %1f", G);
printf("\n");

double q_1[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for (j=0; j<=C; j++) {
    q_1[j]=q[j]/G;
    printf("\nq' [%d]=%1f", j, q_1[j]);
}

double pb[K];

double pb[K];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης για κάθε κατηγορία
for (i=0; i<K; i++) {
    pb[i]=0;
    for (j=C-b[i]+1; j<=C; j++) {
        pb[i]+=q_1[j];
    }
}
```



```
printf("\n-----\n");

printf("\nΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ ΑΡΩΛΕΙΑΣ ΚΛΗΣΕΩΝ\n\n");
for(i=0;i<K;i++){
    printf("Pb%d=%lf", i, pb[i]);
}
}
```

3. Υπολογισμός αποτελεσμάτων WLR με δέσμευσης εύρους ζώνης (BR-EMLM).

Επισημαίνεται ότι και στη προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η συνάρτηση για την εύρεση του φορτίου κίνησης $a(k)$.

```
double q[capacity+1];

q[0]=1;

double sum;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for(i=1;i<=capacity;i++){

    sum=0;
    for(j=0;j<K;j++){

        if(i-b[j]>=0 && i<=capacity-t[j]) sum+=a[j]*b[j]*q[i-b[j]];
        else sum+=0;

    }
    q[i]=(double) (sum/i);
    printf("q[%d]=%lf\n", i, q[i]);
}

printf("\n-----\n");

double G;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=capacity;j++) G+=q[j];
printf("\nTotal = %lf", G);
printf("\n");

printf("\n-----\n");

double q_1[capacity+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=capacity;j++){
    q_1[j]=q[j]/G;
    printf("\nq' [%d]=%lf", j, q_1[j]);
}

printf("\n-----\n");
```



```
double pb[K];

// εύρεση πιθανότητας απώλειας κλήσης για κάθε κατηγορία
for (i=0; i<K; i++) {
    pb[i]=0;
    for (j=capacity-b[i]-t[i]+1; j<=capacity; j++) {
        pb[i]+=q_l[j];
    }
    printf ("pb[%d]=%lf\n", i, pb[i]);
}

printf ("\n-----\n");

//μεση τιμή κατειλημμένων γραμμών
double E=0;

for (i=1; i<capacity; i++) {
    E+=i*q_l[i];
}

printf ("Mesi timi kateilimmenwn grammwn: %lf", E);
```

4. Υπολογισμός αποτελεσμάτων απωλειών ομαδικών κλήσεων (BP-EMLM).

Επισημαίνεται ότι και στη προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιείται η συνάρτηση για την εύρεση του φορτίου κίνησης $a(k)$.

```
double q[C+1];
double final=0, sum=0;

q[0]=1;

// εύρεση πιθανοτήτων q(j)
for (j=1; j<=C; j++) {

    for (k=0; k<K; k++) {

        if (floor((double)j/b[k])<=0) final+=0;

        else{

            for (i=1; i<=floor((double)j/b[k]); i++) {

                if (j-(i*b[k])<0) sum+=0;
                else sum+= pow(beta[k], (double)i-1)*q[j-(i*b[k])];
            }

            final+=a[k]*b[k]*sum;
        }
        sum=0;
    }
}
```



Δήμος Καρράς, Μελέτη της διασύνδεσης X2 των δικτύων LTE σε επίπεδο κλήσεων

```
q[j]=final/j;
printf("\nq[%d]=%lf\n",j,q[j]);
final=0;
}

printf("\n-----\n");

float G;

// υπολογισμός σταθεράς G
for(j=0;j<=C;j++) G+=q[j];
printf("\nTotal = %f",G);
printf("\n");

printf("\n-----\n");

float q_l[C+1];

// υπολογισμός κανονικοποιημένων πιθανοτήτων q'(j)
for(j=0;j<=C;j++){
    q_l[j]=q[j]/G;
    printf("\nq' [%d]=%f",j,q_l[j]);
}

printf("\n-----\n");

printf("\nΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ SIMFORISIS STO XRONO\n\n");

double Bpb[K];

// υπολογισμός πιθανότητας συμφόρησης στο χρόνο κάθε κατηγορίας
for(i=0;i<K;i++){
    Bpb[i]=0;
    for(j=C-b[i]+1;j<=C;j++){
        Bpb[i]+=q_l[j];
    }
    printf("Bpb[%d]=%lf\n",i,Bpb[i]);
}

printf("\n-----\n");

printf("\nΠΙΘΑΝΟΤΗΤΕΣ SIMFORISIS KLHSEWN\n\n");

double Cpb[K];

// υπολογισμός πιθανότητας συμφόρησης κλήσεων κάθε κατηγορίας
for(i=0;i<K;i++){
    Cpb[i]=0;
    for(j=0;j<=C;j++){
        Cpb[i]+=q_l[j]*pow(beta[i],floor((double)(C-j)/b[i]));
    }
    printf("Cpb[%d]=%lf\n",i,Cpb[i]);
}
```