



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Πολυτεχνική Σχολή**  
**Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

"Αποτίμηση της απόδοσης δικτύου ραδιοπρόσβασης νέφους (Cloud Radio Access Network - C-RAN) με κοινή εφαρμογή των τηλεπικοινωνιακών και υπολογιστικών πόρων του δικτύου"

**ΜΙΑΝΤΟΛΑ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΑ**

**A.M.1043**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ:**

**ΛΟΥΤΑΜΑΛΑΜΑΤΗ & ΒΑΡΔΑΚΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021**





**University of Western Macedonia**  
**Faculty of Engineering**  
**Dept. of Electrical and Computer Engineering**

**DIPLOMA THESIS**

“Performance evaluation of Cloud Radio Access Networks (C-RAN) by jointly considering communicational and computational network resources”

**BANTOLA AIKATERINA**

**SUPERVISORS**

**MALAMATI LOUTA & IOANNIS VARDAKAS**

**KOZANI, JULY 2021**



## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάλυση του δικτύου ραδιοπρόσβασης νέφους (Cloud-Radio Access Network – C-RAN), καθώς και η αποτίμηση της απόδοσής του με κοινή εφαρμογή των τηλεπικοινωνιακών και υπολογιστικών πόρων. Με την εισαγωγή της τεχνολογίας της 5<sup>ης</sup> γενιάς δικτύων (5G), ο τομέας των τηλεπικοινωνιών περνάει σε ένα στάδιο αξιοσημείωτων μεταβολών. Η ραγδαία αύξηση του τηλεπικοινωνιακού φόρτου σε συνδυασμό με την εμφάνιση νέων απαιτήσεων, οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης μιας αρχιτεκτονικής δικτύου ικανής να αντεπεξέλθει σε αυτές τις προκλήσεις, στηρίζοντας ένα δίκτυο υψηλής απόδοσης, βελτιωμένων ρυθμών μετάδοσης και χαμηλών καθυστερήσεων. Η αρχιτεκτονική δικτύου C-RAN στέκεται ικανή να αντιμετωπίσει όλες αυτές τις προκλήσεις, εστιάζοντας στην καινοτομία του διαχωρισμού των τηλεπικοινωνιακών και υπολογιστικών πόρων του συστήματος, RRH και BBU στο σταθμό βάσης (BS). Η επιτυχής εφαρμογή της είναι ικανή να επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα με κυρίαρχα αυτά της μείωσης του κόστους, την εξυπηρέτηση νέων απαιτήσεων και υπηρεσιών καθώς και την ενίσχυση της ευελιξίας του δικτύου.

Η ανάλυση αυτού του τύπου δικτύου θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική μέσω της εφαρμογής συγκεκριμένων μοντέλων τηλεπικοινωνιακής κίνησης, όπως της *Πολυδιάστατης Κίνησης* και των μοντέλων με *δυνατότητα Επανάκλησης*. Το μοντέλο Πολυδιάστατης Κίνησης αφορά συστήματα τα οποία εξυπηρετούν υπηρεσίες διαφορετικού τύπου, οι κλήσεις των οποίων γίνονται δεκτές στο σύστημα εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες μονάδες εξυπηρέτησης τουλάχιστον ίσες με τις απαιτήσεις της κάθε υπηρεσίας. Το μοντέλο με δυνατότητα Επανάκλησης δίνει την ευκαιρία στις απορριφθείσες κλήσεις να προσπαθήσουν ξανά τη σύνδεσή του στο σύστημα με μικρότερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, με συνέπεια την επίτευξη μικρότερου ποσοστού πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων. Έτσι, η εφαρμογή των προτεινόμενων μαθηματικών μοντέλων σε κάθε περίπτωση, θα μας οδηγήσει στην αποτελεσματικότερη αποτίμηση της απόδοσης του δικτύου.

Λέξεις κλειδιά: Πέμπτη Γενιά Δικτύων, Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης Νέφους, Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης, Πιθανότητα Απώλειας Κλήσης.

## Abstract

The purpose of this diploma thesis is the analysis of the Cloud Radio Access Network – C-RAN, as well as the evaluation of its performance with a joint application of its telecommunication and computational network resources. With the introduction of 5G technology, telecommunications systems enter a stage where remarkable changes occur. The rapid increase of traffic load combined with the emergence of new network requirements has led to the need of developing a network architecture capable of supporting a network of high efficiency, improved transmission rates and low latency. C-RAN architecture is able to meet all these challenges, while focuses on the innovation of a functional split in the Base Station (BS) where the Remote Radio Heads – RRH are separated from the Baseband Units – BBU. Its successful implementation is able to bring significant benefits where among them cost reduction, the entrance of new network requirements and services as well as enhanced network flexibility, are the ones that dominate.

In this diploma thesis is carried out the analysis of this type of network through the application of specific Teletraffic Models, the Multi-rate Loss Model and the Retry Models. The Multi-rate Loss Model refers to systems that serve different types of services, whose calls are accepted by the system if and only if there are service units available. The Retry Models allows rejected calls to retry their connection to the system with reduced requirements, offering a lower chance of losing calls. The application of the proposed mathematical models will lead us to a more efficient evaluation of the overall network performance.

Keywords: 5G, Cloud Radio Access Network, Teletraffic Models, Blocking Probability.

## Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο

“Αποτίμηση της απόδοσης δικτύου ραδιοπρόσβασης νέφους (Cloud Radio Access Network – C-RAN) με κοινή εφαρμογή των τηλεπικοινωνιακών και υπολογιστικών πόρων του δικτύου”

“Performance evaluation of Cloud Radio Access Networks (C-RAN) by jointly considering communicational and computational network resources”

καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Βαρδάκα Ιωάννη και της κα. Λούτας Μαλαματή

αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

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

Copyright (C) Μπαντόλα Αικατερίνα, Βαρδάκας Ιωάννης/Λούτα Μαλαματή, 2021, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:







## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους επιβλέποντες καθηγητές της παρούσας διπλωματικής, κύριο Ιωάννη Βαρδάκα και την κυρία Μαλαματή Λούτα, για την συνεργασία, την κατανόηση καθώς και την πολύτιμη βοήθειά τους για την ολοκλήρωσή της. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου και την αδερφή μου για την αμέριστη κατανόηση και ηθική τους στήριξη.



## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	i
Abstract .....	ii
Ευχαριστίες.....	v
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Σχημάτων.....	xi
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Κατάλογος Αρκτικόλεξων.....	xv
Κεφάλαιο 1. Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα 5ης Γενιάς.....	1
1.1 Εισαγωγή στα Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα.....	1
1.2 Εισαγωγή στα Δίκτυα 5ης Γενιάς .....	2
1.2.1 Προϋποθέσεις ανάπτυξης δικτύων 5 <sup>ης</sup> Γενιάς.....	4
1.3 Αρχιτεκτονική δικτύων 5 <sup>ης</sup> Γενιάς και ανάλυση τεχνολογικών τάσεων.....	5
1.3.1 Στοιχεία αρχιτεκτονικής δικτύων 5G.....	5
1.3.2 Τεχνολογικές τάσεις δικτύων 5G .....	6
1.4 Καινοτομίες και πλεονεκτήματα εφαρμογής δικτύων 5G.....	10
1.5 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής.....	11
Κεφάλαιο 2. Εφαρμογή Μοντέλων Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης 5 <sup>ης</sup> Γενιάς.....	13
2.1 Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	13
2.1.1 Βασικά στοιχεία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	13
2.1.2 Καθορισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	14
2.1.3 Συμφόρηση Τηλεπικοινωνιακής.....	14
2.1.4 Βαθμός εξυπηρέτησης.....	15
2.2 Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης.....	15
2.2.1 Ορισμός.....	15
2.2.2 Βασικές διαδικασίες τηλεπικοινωνιακών συστημάτων.....	15
2.2.3 Μοντέλο απωλειών Erlang .....	16
2.3 Μοντέλο απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης (Erlang Multi-rate Loss Model EMLM).....	17

2.3.1	Πολυδιάστατη Κίνηση.....	17
2.3.2	Περιγραφή μοντέλου απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης EMLM.....	17
2.3.3	Υπολογισμός πιθανότητας απώλειας κλήσης υπηρεσίας $k$ .....	19
2.3.4	Υπολογισμός Πιθανότητας απώλειας κλήσης με χρήση Αναδρομικού Τύπου 20	
2.3.5	Πολιτική Δέσμευσης Εύρους Ζώνης.....	23
2.4	Μοντέλα απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης με δυνατότητα Επανάκλησης... ..	24
2.4.1	Εισαγωγή στα μοντέλα Επανάκλησης.....	24
2.4.2	Μοντέλο απλής Επανάκλησης – SingleRetryModel.....	25
2.4.3	Μοντέλο πολλαπλών επανακλήσεων – MultiRetryModel.....	25
2.4.4	Αναδρομικός τύπος Kaufman στα μοντέλα Επανάκλησης.....	26
Κεφάλαιο 3. Εφαρμογή του Μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης στην Αρχιτεκτονική C-RAN Δικτύων 5 <sup>ης</sup> Γενιάς.....		
3.1	Εισαγωγή.....	34
3.2	C-RAN σε δίκτυα 5 <sup>ης</sup> Γενιάς.....	35
3.2.1	Παραδοσιακές αρχιτεκτονικές.....	35
3.2.2	Εισαγωγή στο C-RAN.....	36
3.2.3	Αρχιτεκτονική της C-RAN .....	37
3.2.4	Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα της C-RAN .....	38
3.3	Εφαρμογή του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης σε δίκτυο C-RAN .....	39
3.3.1	Περιγραφή και σκοπός του μοντέλου EMLM.....	39
3.3.2	Μαθηματική ανάλυση του μοντέλου EMLM σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN .....	41
3.4	Εφαρμογή μοντέλων Επανάκλησης και Πολλαπλών Επανακλήσεων σε δίκτυο C-RAN.....	42
3.4.1	Μοντέλο SRM σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN.....	42
3.4.2	Μοντέλο MRM σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN.....	43
Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα Προσομοίωσης .....		
4.1	Περιγραφή Δικτύου.....	46
4.2	Αριθμητικό σενάριο προσομοίωσης του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης 46	
4.3	Αριθμητικό σενάριο προσομοίωσης του μοντέλου Επανάκλησης και Πολλαπλής Επανάκλησης .....	50

4.3.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης Επανάκλησης των συστημάτων RRH και BBU	51
4.3.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης Επανάκλησης του συστήματος RRH	.52
4.3.3	Αποτελέσματα προσομοίωσης Επανάκλησης του συστήματος BBU	.53
4.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων	.....53
Κεφάλαιο 5.	Συμπεράσματα	.....58
Βιβλιογραφία	.....	60
Παράρτημα	.....	62



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Συνολική κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας.....	3
Σχήμα 1.2: Σύγκριση απορρόφησης συνδρομών κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των τεχνολογιών 4G και 5G.....	3
Σχήμα 1.3: Προτεινόμενη ετερογενής αρχιτεκτονική ασύρματου κυψελοειδούς δικτύου 5G.....	8
Σχήμα 1.4 Επικοινωνία αναμετάδοσης συσκευής με ελεγχόμενο σταθμό βάσης.....	9
Σχήμα 1.5 Απευθείας επικοινωνία συσκευής με άλλη συσκευή.....	9
Σχήμα 1.6 Δίκτυο αρχιτεκτονικής C-RAN.....	10
Σχήμα 2.1: Σύστημα Απωλειών Κλήσεων .....	23
Σχήμα 2.2: Σύστημα Αναμονής Κλήσεων .....	15
Σχήμα 2.3: Σύστημα Απωλειών M/M/s(0) .....	16
Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Μεταπτώσεων Καταστάσεων M/M/s(0) .....	17
Σχήμα 2.5: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης K υπηρεσιών.....	18
Σχήμα 2.6: Σύνολο καταστάσεων μοντέλου πολυδιάστατης κίνησης 2 υπηρεσιών με πολιτική πλήρους διάθεσης. ....	19
Σχήμα 2.7: Σύνολα $\Omega$ και $\Omega_2$ για το σύστημα του παραδείγματος 2.1 .....	20
Σχήμα 2.8: Σύνολα $\Omega_j$ και $\Omega_c$ σε σύστημα πλήρους διάθεσης.....	21
Σχήμα 2.9: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης σε σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης.....	23
Σχήμα 2.10: Απεικόνιση εξυπηρέτησης κλήσης στο μοντέλο απλής επανάκλησης ...	25
Σχήμα 2.11: Απεικόνιση εξυπηρέτησης κλήσης στο μοντέλο πολλαπλών επανακλήσεων.....	26
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση της αύξησης του αριθμού των χρηστών Διαδικτύου έως το 2023.....	35
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση παραδοσιακής αρχιτεκτονικής RAN.....	36
Σχήμα 3.3: Απεικόνιση αρχιτεκτονικής C-RAN.....	37
Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση δικτύου.....	40
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης A .....	47
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας $C_{RRH}$ .....	48
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας $C_{RRH}$ .....	50
Σχήμα 4.4: Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων.....	52
Σχήμα 4.5: Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών πόρων.....	52

Σχήμα 4.6: Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης IT πόρων.....	53
---	----



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Αντιστοιχία απαιτήσεων και χαρακτηριστικών του 5G με τις προτεινόμενες τεχνολογικές τάσεις.....	5
Πίνακας 4.1: Πιθανότητες απώλειας κλήσης για τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης $A$ .....	47
Πίνακας 4.2: Πιθανότητες απώλειας κλήσης για τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας $C_{RRH}$ .....	48
Πίνακας 4.3: Πιθανότητες απώλειας κλήσης για τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας $C_{BBU}$ .....	49
Πίνακας 4.4: Σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 1 <sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης.....	54
Πίνακας 4.5: Σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 2 <sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης.....	54
Πίνακας 4.6: Σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 3 <sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης.....	55



## Κατάλογος Αρκτικόλεξων

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
AP	Access Point
ARPU	Average Revenue Per User
BBU	Baseband Unit
BS	Base Station
CAPEX	Capital expenditure
CBP	Call Blocking Probability
CN	Core Network
CPRI	Common public radio interface
C-RAN	Cloud Radio Access Network
D2D	Device to Device
DVB	Digital Video Broadcasting
EMLM	Erlang Multirate Loss Model
FD	Full Duplex
FH	Fronthaul
GoS	Grade of Service
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
LTE	Long-Term Evolution
M2M	Machine to Machine

MIMO	Massive Input-Multiple Output
mmWave	Milimeter Wave
MRM	Multi Retry Model
NFV	Network Function Virtualization
OPEX	Operating expenditure
P2P	Peer to Peer
QoS	Quality of Service
QoE	Quality of Experience
RAN	Radio Access Network
RF	Radio Frequency
RRH	Remote Radio Head
RRU	Remote Radio Unit
SDN	Software Defined Network
SMS	Short Message Service
SRM	Single Retry Model
V-BBU	Virtualized BBU
VR	Virtual Reality
UE	User Equipment

# Κεφάλαιο 1. Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα 5ης Γενιάς

## 1.1 Εισαγωγή στα Τηλεπικοινωνιακά Δίκτυα

Η ανάγκη για άμεση και αξιόπιστη λήψη και διανομή πληροφοριών διαφορετικής μορφής έχει οδηγήσει στην συνεχή μελέτη των τηλεπικοινωνιακών δικτύων με σκοπό τη σχεδίαση νέων και αποτελεσματικότερων συστημάτων για την εξασφάλιση της βέλτιστης ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) των χρηστών δικτύων. Από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης της δεκαετία του 1970, οι κινητές ασύρματες επικοινωνίες έχουν περάσει από το στάδιο των αναλογικών κλήσεων φωνής (voice-calls) φτάνοντας στις σύγχρονες τεχνολογίες που είναι πλέον ικανές να παρέχουν υπηρεσίες κινητού ευρυζωνικού επιπέδου υψηλής ποιότητας, με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, δεκάδων megabits σε ευρείς περιοχές που φτάνουν μέχρι και τα εκατοντάδες megabits ανά δευτερόλεπτο τοπικά. Οι εκτενείς βελτιώσεις που πραγματοποιήθηκαν τόσο σε επίπεδο νέων και αναβαθμισμένων δυνατοτήτων των κινητών επικοινωνιών, όσο και εισαγωγή νέων τύπων συσκευών όπως τα smartphones και τα tablets, έχουν οδηγήσει σε μια έκρηξη εμφάνισης νέων εφαρμογών οι οποίες και συνεπάγονται με την εκθετική αύξηση της κίνησης του δικτύου [1].

Η εισαγωγή των κυψελοειδών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων στα ασύρματα δίκτυα, η λειτουργία των οποίων βασίζεται στην λειτουργία ενός σταθμού βάσης – Base Station (BS) σε κάθε κυψέλη, διευκόλυνε την αξιοποίηση του συνολικού φάσματος συχνοτήτων και παράλληλα την ποιοτική επικοινωνία χρηστών μεταξύ μεγάλων γεωγραφικών αποστάσεων, λόγω της δομής τους αυτής. Έπειτα, ακολούθησε η ανάπτυξη πολλών διαφορετικών προτύπων δικτύων, φτάνοντας μέχρι σήμερα τις 5 γενιές συστημάτων.

Η 1η γενιά των τηλεπικοινωνιακών δικτύων εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις αρχές του 1980 με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που έφτανε τα 2.4kbps. Σοβαρά μειονεκτήματα όμως, που αφορούσαν την χωρητικότητα αλλά και την έλλειψη ασφάλειας του δικτύου λόγω εφαρμογής αναλογικού συστήματος, οδήγησαν στην ανάπτυξη της 2ης γενιάς. Στην περίπτωση αυτή μιλάμε πλέον για ψηφιακές τεχνολογίες με ρυθμούς μετάδοσης έως 64kbps. Οι παροχές, εκτός τις υπηρεσίες φωνής, περιλαμβάνουν πλέον υπηρεσίες μηνυμάτων – Short Message Service (SMS) και e-mail. Με τις αναβαθμίσεις της γενιάς 2.5G, οδηγούμαστε στη χρήση μεταγωγής κυκλώματος και πακέτων και οι προδιαγραφές για το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων να φτάνουν τα 144kbps.

Η εισαγωγή της 3ης γενιάς (3G) έγινε στα τέλη του 2000. Μεταδίδοντας με ρυθμό έως 2Mbps παρέχουν πρόσβαση υψηλών ταχυτήτων σε υπηρεσίες που βασίζονται

στο πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol – IP). Με τη δυνατότητα μετάδοσης μεγάλης ποσότητας δεδομένων σε υψηλότερες ταχύτητες το 3G έδωσε τη δυνατότητα στους χρήστες να πραγματοποιούν βιντεοκλήσεις (video calls), να περιηγούνται στο Διαδίκτυο, να παίζουν διαδικτυακά παιχνίδια, ακόμα και να παρακολουθούν τηλεόραση διαδικτυακά. Η βελτίωση αυτή του ρυθμού μετάδοσης συνοδεύτηκε από τη διατήρηση και αναβάθμιση του QoS. Έτσι, προσθήκες όπως η παγκόσμια περιαγωγή και η βελτίωση ποιότητας φωνής καθιστούν το 3G ως αξιοσημείωτη γενιά στην ανάπτυξη των ασύρματων δικτύων [1]. Παρόλα αυτά, οι μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις αλλά και το υψηλό κόστος υποστήριξής τους κατέστησαν την 3η γενιά ως το εφιαλτήριο της πραγματικής βελτίωσης που ήρθε με την ανάπτυξη των δικτύων 4ης γενιάς.

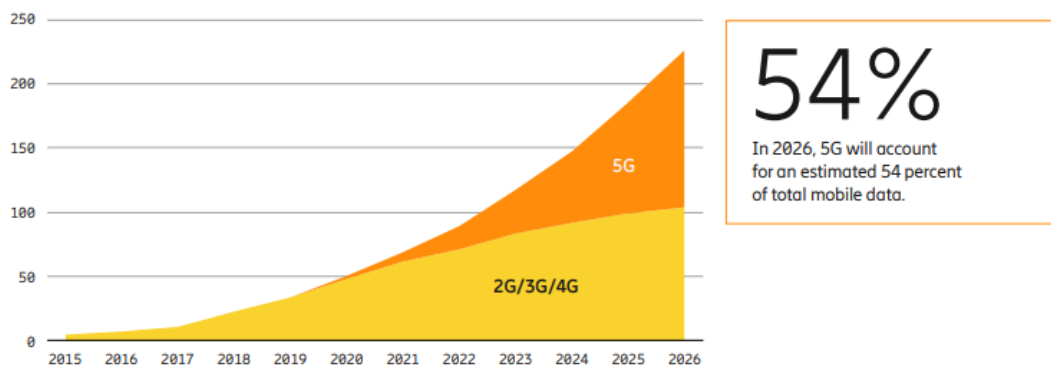
Το 4G που θεωρείται απόγονος των 3G και 2G, αποτελεί την πρώτη γενιά που χρησιμοποίησε την τεχνολογία Long-Term Evolution (LTE) προσφέροντας στους χρήστες ταχύτητες μεταξύ 10Mbps και 1Gbps. Έτσι επιτεύχθηκε μείωση των καθυστερήσεων, βελτιωμένη ποιότητα φωνής, υπηρεσίες ανταλλαγής μηνυμάτων, ποιοτική ροή και γρηγορότερες ταχύτητες λήψης. Η 4η γενιά προσέφερε μια ολοκληρωμένη και αξιόπιστη λύση για την κάλυψη των απαιτήσεων QoS και ρυθμού εφαρμογών ασύρματης ευρυζωνικής πρόσβασης, υπηρεσίας μηνυμάτων πολυμέσων (Multimedia Messaging Service – MMS), συνομιλία μέσω βίντεο, mobile TV, ψηφιακή μετάδοση βίντεο (Digital Video Broadcasting – DVB).

## 1.2 Εισαγωγή στα Δίκτυα 5ης Γενιάς

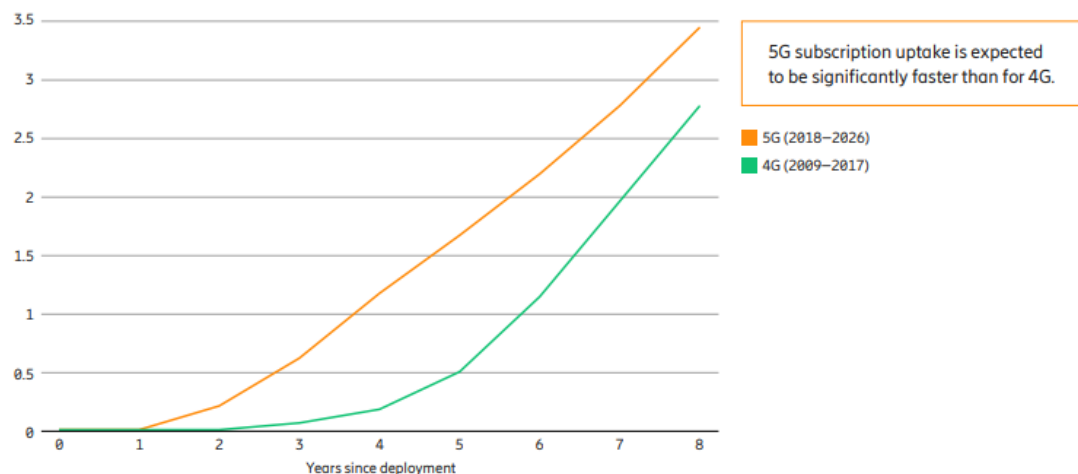
Τα ασύρματα δίκτυα 4<sup>ης</sup> γενιάς κατάφεραν να εκπληρώσουν μια πληθώρα απαιτήσεων με κυριότερες την βελτιωμένη συνδεσιμότητα και διασφάλιση υψηλού QoS, τους υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, τη συνεχή σύνδεση και κάλυψη ποικίλων υπηρεσιών ευρείας περιοχής. Η ραγδαία αύξηση όμως τόσο των νέων υπηρεσιών που προσφέρονται πλέον όσο και του αριθμού των χρηστών και οι απαιτήσεις τους, οδήγησε στην επιτακτική ανάγκη ανάπτυξης μιας νέας τεχνολογίας ικανής να καλύψει τις προκλήσεις που δημιουργήθηκαν. Η νέα γενιά τηλεπικοινωνιακών δικτύων λοιπόν, γνωστή ως 5G, συστήθηκε για πρώτη φορά στην αγορά το 2018 και έως σήμερα έχει επεκταθεί αποτελεσματικά παγκοσμίως. Πέρα από τις αναβαθμίσεις και βελτιώσεις σε ότι αφορά την ταχύτητα, η τεχνολογία αυτή αναμένεται να ενισχύσει το ‘οικοσύστημα’ του Internet of Things (IoT) εξυπηρετώντας ανάγκες επικοινωνίας δισεκατομμυρίων συνδεδεμένων συσκευών με τις κατάλληλες προϋποθέσεις ταχύτητας, καθυστερήσεων και κόστους. Μερικοί από τους στόχους της τεχνολογίας 5G περιλαμβάνουν την παροχή υπηρεσιών δικτύων με τουλάχιστον 1000 φορές υψηλότερη φασματική απόδοση από τα τρέχοντα δίκτυα, 10 φορές χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας ανά υπηρεσία και τη δημιουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου Διαδικτύου με μηδενικό χρόνο διακοπής για παροχή υπηρεσιών. Πολύ σημαντική θεωρείται και η επίτευξη ανάπτυξης ενός πυκνότερου

ασύρματου δικτύου που συνδέει μεγάλο πλήθος από ασύρματες συσκευές παρέχοντας στους χρήστες ποιοτικές υπηρεσίες με ελεγχόμενη προστασία [2].

Σύμφωνα με την πηγή [3], υπολογίζεται ότι η συνολική κίνηση δεδομένων (mobile data traffic) θα φτάσει τα 225EB (exabytes) το μήνα το 2026, έχοντας αυξητικό συντελεστή της τάξεως του 4,5. Ο αριθμός αυτός αντιπροσωπεύει τα δεδομένα κινητής τηλεφωνίας που καταναλώνονται από τους χρήστες για χρήση smartphones, φορητών υπολογιστών και πλήθος άλλων νέων συσκευών. Όπως φαίνεται και στην Σχήμα 1.1, αναμένεται ότι μέχρι το 2026 το 54% των συνολικών δεδομένων κινητής τηλεφωνίας θα προέρχεται από δίκτυα 5G.



Σχήμα 1.1: Συνολική κίνηση δεδομένων κινητής τηλεφωνίας [3]



Σχήμα 1.2: Σύγκριση απορρόφησης συνδρομών κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των τεχνολογιών 4G και 5G [3]

Έχει προβλεφθεί ότι η ενσωμάτωση των δικτύων 5G και η απόκτηση συνδρομητών αναμένεται να γίνει με αξιοσημείωτα ταχύτερους ρυθμούς συγκριτικά με εκείνη του 4G (LTE), μετά την κυκλοφορία του το 2009. Επιπλέον, προβλέπεται ότι μέχρι το

τέλος του 2026 οι συνδρομές 5G θα φτάσουν τα 3,5 δισεκατομμύρια παγκοσμίως, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 40% των συνολικών συνδρομών. Η τεχνολογία 4ης γενιάς βέβαια, αναμένεται να κυριαρχήσει και το 2021 φτάνοντας ακόμα και τα 4,5 δισεκατομμύρια συνδρομών, μέχρι όμως το τέλος του 2026 όπου προβλέπεται μείωση στα 3,9 δισεκατομμύρια λόγω της κυριαρχίας της τεχνολογίας 5G [3]. Το Σχήμα 1.2 αναπαριστά ξεκάθαρα την επικράτηση του 5G έναντι του 4G από τα πρώτα χρόνια ανάπτυξής του.

### 1.2.1 Προϋποθέσεις ανάπτυξης δικτύων 5<sup>ης</sup> Γενιάς

Η τεχνολογία 5G έχει χαρακτηριστεί ως το *όραμα υπερσύνδεσης* – hyperconnected vision, αλλά και ως η τεχνολογία ραδιοπρόσβασης νέας γενιάς. Περιγράφεται ως η νέα τεχνολογία όπου όλα τα χρήσιμα στοιχεία των ήδη υπαρχόντων τεχνολογιών, 2G, 3G και 4G, ενσωματώνονται με σκοπό τη δημιουργία ενός βελτιωμένου συστήματος, ικανού να παρέχει στους χρήστες ευρύτερες επιλογές υπηρεσιών στην βέλτιστη ποιότητα. Η αύξηση του αριθμού των συσκευών, η πληθώρα των νέων υπηρεσιών σε συνδυασμό με τους λειτουργικούς περιορισμούς, τα κεφαλαιουχικά κόστη αλλά και η ανάγκη υψηλής ενεργειακής απόδοσης, έθεσαν αυστηρά όρια στις απαιτήσεις σχετικά με το σχεδιασμό της μελλοντικής αυτής γενιάς. Έτσι, προκειμένου να μιλάμε για επιτυχή εκπλήρωση των παραπάνω στόχων και να χαρακτηριστεί ένα σύστημα ότι ανήκει στην τεχνολογία πέμπτης γενιάς, θα πρέπει να πληροί ορισμένα βασικά πρότυπα [4]:

- Ρυθμό μετάδοσης δεδομένων που φτάνει έως και τα 10Gbps, παρουσιάζοντας 10 έως 100 φορές βελτίωση ταχύτητας συγκριτικά με τα δίκτυα 4G
- Καθυστέρηση 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου από άκρο σε άκρο
- 1000x εύρος ζώνης ανά μονάδα περιοχής
- 10 έως 100 φορές περισσότερες συνδεδεμένες συσκευές στο δίκτυο
- 99,999% διαθεσιμότητα
- 99,999% κάλυψη
- Μείωση στην κατανάλωση ενέργειας της τάξεως του 90%
- Διάρκεια ζωής μπαταρίας έως τα δέκα έτη για συσκευές IoT χαμηλής ισχύος.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις δεν είναι εύκολο να ικανοποιηθούν. Τα δίκτυα 5G καλούνται να υποστηρίξουν όλες αυτές τις απαιτήσεις διατηρώντας παράλληλα χαμηλό κόστος και υψηλή ενεργειακή απόδοση. Οι προκλήσεις αυτές, όμως αναμένεται να αντιμετωπιστούν όπως θα δούμε αναλυτικά παρακάτω.



### 1.3 Αρχιτεκτονική δικτύων 5<sup>ης</sup> Γενιάς και ανάλυση τεχνολογικών τάσεων

#### 1.3.1 Στοιχεία αρχιτεκτονικής δικτύων 5G

Τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, από την αρχή της ανάπτυξής τους ακολούθησαν δομική ιδέα κατά την οποία το δίκτυο αποτελείται από κόμβους/κελιά ετερογενών χαρακτηριστικών και χωρητικότητας, όπως macrocells, smallcells, femtocells, και picocells, και εξοπλισμό χρήστη (User Equipment – UE), με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας αρχιτεκτονικής πολλαπλών επιπέδων. Μια τέτοια αρχιτεκτονική, εκτός από τα πολλά πλεονεκτήματα που προσφέρει, οδηγεί παράλληλα και στην αύξηση της πολυπλοκότητας διαχείρισης του δικτύου αλλά και του συντονισμού των πολλαπλών αυτών επιπέδων. Έτσι, αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν μηχανισμοί δυνατότητας *αυτό-οργάνωσης* (self-organization), όπως η προσαρμογή ισχύος, η αυτόνομη εξισορρόπηση φορτίου και η αποτελεσματική κατανομή φάσματος. Παράλληλα, δόθηκε η δυνατότητα ταυτόχρονων συνδέσεων των UEs σε περισσότερους του ενός σταθμού βάσης (BS) ή σημείου πρόσβασης (Access Point – AP), ακόμα και όταν γίνεται χρήση διαφορετικών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης. Η εισαγωγή της υπολογιστικής νέφους (Cloud Computing) επιτρέπει την ενσωμάτωση των ετερογενών κόμβων σε ένα κοινό νέφος (cloud), με σκοπό την απεριόριστη και βελτιωμένη συνδεσιμότητα. Ο αριθμός των απομακρυσμένων μονάδων ραδιοπρόσβασης αυξάνεται σημαντικά και συνδέεται με τους κεντρικούς κόμβους επεξεργασίας του cloud μέσω συνδέσεων υψηλών ταχυτήτων [5].

Λόγω όλων αυτών των πρωτοποριακών στοιχείων και των νέων αναδυόμενων τάσεων, η αρχιτεκτονική δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα συγκριτικά με αυτή του 4G. Το στοιχείο αυτό, σε συνδυασμό με τις απαιτήσεις-πρότυπα που αναφέρθηκαν παραπάνω, οδηγεί στην ανάγκη εφαρμογής ορισμένων τεχνολογικών τάσεων στην αρχιτεκτονική του 5G, όπως αναφέρονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Αντιστοιχία απαιτήσεων και χαρακτηριστικών του 5G με τις προτεινόμενες τεχνολογικές τάσεις [5]

Απαιτήσεις και χαρακτηριστικά του 5G	Τεχνολογικές τάσεις και προτάσεις
Βελτίωση χωρητικότητας και εύρους ζώνης, υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης	Heterogeneous and multi-tier network, D2D Communication, massive MIMO, C-RAN
Μειωμένες καθυστερήσεις	Full Duplex και D2D Communication, C-RAN
Αύξηση πυκνότητας δικτύου	Heterogeneous and multi-tier network
Βελτιωμένη διάθεση ισχύος	Wireless charging, energy harvesting
Αναβαθμισμένες υπηρεσίες και εφαρμογές (π.χ. smartcities)	C-RAN, network virtualization, M2M Communication
Αυτόνομες εφαρμογές, διαχείριση δικτύου, Internet of Things	M2M Communication, self-organizing network

### 1.3.2 Τεχνολογικές τάσεις δικτύων 5G

Ορισμένες τεχνολογικές τάσεις που προσαρτήθηκαν στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς έχουν καταφέρει να διευκολύνουν σε μεγάλο βαθμό στην επίτευξη των πολλά υποσχόμενων στόχων του 5G. Ορισμένες από τις τεχνολογίες αυτές αναγράφονται παρακάτω:

- Massive MIMO
- Millimeter Waves
- Full Duplex Communication
- Heterogeneous and multi-tier network
- Device to Device Communication
- NFV, SDN
- C-RAN

#### 1.3.2.1 Μαζικά συστήματα πολλαπλής εισόδου – πολλαπλής εξόδου (MassiveMIMO)

Η τεχνολογία πολλαπλών κεραιοστοιχείων μεγάλης κλίμακας (massive Multiple Input Multiple Output – massiveMIMO) αποτελεί βασικό θεμέλιο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας 5<sup>ης</sup> γενιάς. Αποτελεί αναβάθμιση του κλασικού προτύπου MIMO το οποίο βρίσκει εφαρμογή στις παραδοσιακές τεχνολογίες. Ενώ οι σταθμοί βάσης του κλασικού MIMO χρησιμοποιούν περίπου 2 έως 12 κεραιές, η massiveMIMO χρησιμοποιεί συστοιχίες κεραιών όπου η κάθε μια περιλαμβάνει μερικές δεκάδες ή ακόμη και εκατοντάδες κεραιές, όχι μόνο μέσα στο σταθμό βάσης αλλά και διασκορπισμένο σε όλο το κελί. Βασικός στόχος της τεχνολογίας αυτής είναι η εξαγωγή όλων των πλεονεκτημάτων της MIMO αλλά σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα. Η εκθετική αυτή αύξηση των κεραιών που επιφέρει σέκεται ικανή να συμβάλλει στην υποστήριξη πληθώρας συσκευών συγκεντρωμένων σε μια περιοχή [4].

Η τεχνολογία massiveMIMO λοιπόν χρειάζεται έξυπνα τερματικά ικανά να μετριάσουν τις παρεμβολές και να προσφέρουν απευθείας επικοινωνία με άλλες συσκευές χωρίς τη βοήθεια δικτύου, ενώ παράλληλα υποστηρίζει επικοινωνίες μηχανής-προς-μηχανή (Machine-to-Machine - M2M) αποτελεσματικά. Οι συστοιχίες πολλαπλών κεραιών τοποθετούνται σε ειδικά σχεδιασμένες τοποθεσίες ώστε να εξυπηρετήσουν το σκοπό τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να κατευθύνουν τις ακτίνες σήματος προς συγκεκριμένη συσκευή, μειώνοντας έτσι την απαιτούμενη για επικοινωνία ισχύ, ενώ παράλληλα το σήμα που παράγεται είναι χαμηλής παρεμβολής. Τελικά, η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής σε δίκτυα 5G συμβάλλει στην βελτίωση της αποδοτικότητας του καναλιού, αυξάνοντας το ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και μειώνοντας τις καθυστερήσεις αλλά και την κατανάλωση ενέργειας, πράγμα που επιτυγχάνεται από τα σήματα χαμηλότερης ισχύος [6].

### 1.3.2.2 Milimeter Waves

Η ανάγκη πρόσβασης στο διαδίκτυο δισεκατομμυρίων χρηστών και συσκευών οδήγησε στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών για την αντιμετώπιση των νέων αυτών απαιτήσεων. Πριν την εμφάνιση της 5G, τα επίπεδα συχνοτήτων των ασύρματων δικτύων κυμαίνονταν έως 6GHz. Ωστόσο, η χρήση του φάσματος mmWave συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων, όπου το φάσμα συχνοτήτων που κυμαίνεται από 30GHz έως 300GHz. Για την εφαρμογή αυτών των συχνοτήτων, χρησιμοποιούνται κατευθυντικές κεραιές ώστε να ξεπεραστεί η απώλεια διάδοσης, διείσδυσης και η εξασθένιση λόγω καιρικών συνθηκών. Με την αύξηση του εύρους ζώνης που επιτυγχάνεται, αυξάνεται η χωρητικότητα και με τη συμβολή της MassiveMIMO οι συχνότητες mmWave γίνονται πρακτικά χρήσιμες και οδηγούμαστε σε βελτιωμένη πρόσβαση στο δίκτυο και σε εφαρμογές [7].

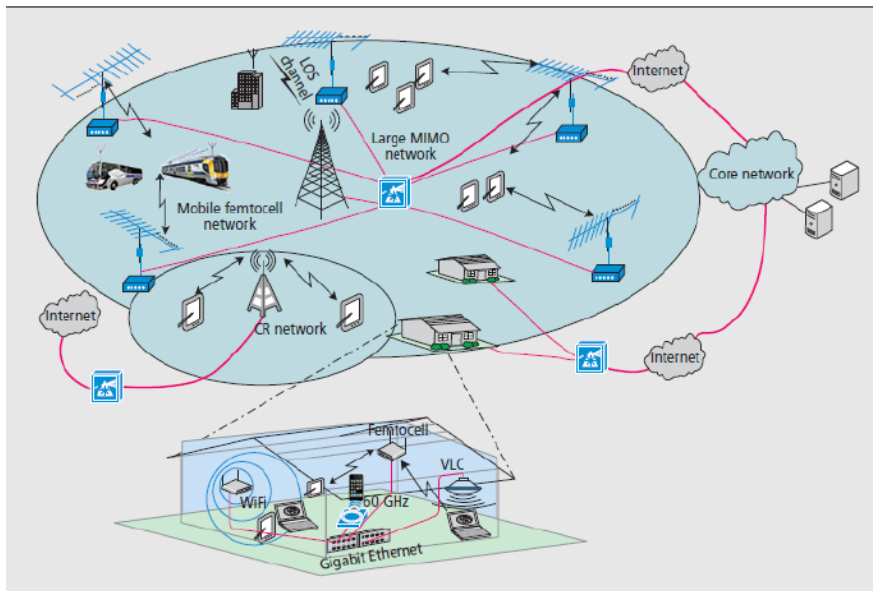
### 1.3.2.3 Full Duplex

Είναι γενικά γνωστό ότι οι ασύρματοι κόμβοι (BSs, UEs κλπ) αδυνατούν να αποκωδικοποιήσουν ένα λαμβανόμενο σήμα ενώ ταυτόχρονα μεταδίδουν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων λόγω εσωτερικής παρεμβολής μεταξύ των κυκλωμάτων πομπού και δέκτη. Αυτό σημαίνει ότι ο πομπός πρέπει να περιμένει έως ότου το σήμα παραληφθεί από το δέκτη προτού στείλει το επόμενο σύνολο σημάτων. Σε άλλη περίπτωση γίνεται χρήση διαφορετικής συχνότητας, τεχνική που έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλη ενεργειακή κατανάλωση. Η τεχνολογία της αμφίδρομης (FullDuplex – FD) επικοινωνίας παρέχει σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων συγκριτικά με τα συμβατικά συστήματα, διπλασιάζοντας, έτσι, την απόδοση του φάσματος. Ένας πομποδέκτης FD είναι ικανός να μεταδίδει και να λαμβάνει με την ίδια συχνότητα ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας δηλαδή κοινή ζώνη συχνοτήτων για την ανοδική (uplink) και την καθοδική (downlink) κατεύθυνση, βασιζόμενη στην ακύρωση παρεμβολών στον πομποδέκτη. Έτσι, η τεχνολογία FD μπορεί να επιλύσει σημαντικά προβλήματα των ασύρματων δικτύων προηγούμενης γενιάς, όπως η απώλεια απόδοσης λόγω συμφόρησης και οι μεγάλες καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο [5].

### 1.3.2.4 Heterogeneous and multi-tier network

Τα συμβατά δίκτυα προηγούμενης γενιάς παρουσιάζουν μια ομοιογένεια ως προς την αρχιτεκτονική τους. Όλα τα κελιά τα οποία απαρτίζουν το δίκτυο επικοινωνούν με όλες τις συσκευές με ακριβώς τον ίδιο τρόπο, ακόμα και αν αυτά παρουσιάζουν διαφορές ως προς το μέγεθος. Λαμβάνοντας όμως υπόψη τις εξαιρετικά υψηλές συχνότητες στο φάσμα του mmWave που αναμενόταν να χρησιμοποιηθούν, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γεννήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης ενός ετερογενούς δικτύου πολλαπλών επιπέδων για το 5G, γνωστό ως Ετερογενούς δικτύου πολλαπλών επιπέδων (Heterogeneous and multi-tier network). Ένα τέτοιο δίκτυο αποτελείται από μεγάλο αριθμό κόμβων χαμηλής ισχύος, όπως APs και Remote Radio Heads (RRHs) και προσφέρει ποικίλες λειτουργίες και πολλαπλούς τύπους επικοινωνίας όπως Peer-to-Peer (P2P), Device-to-Device (D2D) και Machine-to-Machine (M2M), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3. Η ετερογένεια των διαφορετικών κατηγοριών σταθμών

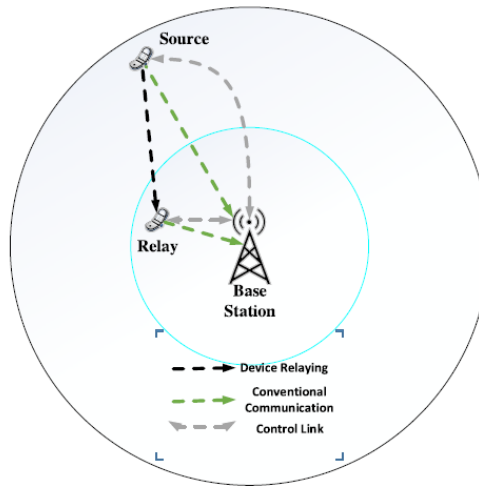
βάσης αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά τη φασματική απόδοση. Μειώνοντας το μέγεθος του κελιού, το φάσμα και η αποδοτικότητα αυξάνεται λόγω της υψηλότερης επαναχρησιμοποίησης του φάσματος. Παράλληλα, η ασύρματη επικοινωνία P2P (D2D/M2M) που υποστηρίζει την κυψελοειδή αυτή αρχιτεκτονική, μπορεί να αυξήσει σημαντικά το συνολικό φάσμα και την ενεργειακή απόδοση. Η δομή, λοιπόν, της αρχιτεκτονικής αυτής περιλαμβάνει μεγάλα κελιά, τα macrocells, τα οποία συνήθως περιλαμβάνουν πολλά μικρότερα αλλά και κεραιές οι οποίες κατανέμονται σε ολόκληρο το κελί και επικοινωνούν με τους σταθμούς βάσης μέσω οπτικών ινών. Δεδομένου ότι υπάρχει καλή διαχείριση των παρεμβολών που αναπτύσσονται μεταξύ των επιπέδων inter-tier και intra-tier, η υιοθέτηση πολλαπλών επιπέδων στην αρχιτεκτονική δικτύου είναι ικανή να προσφέρει καλύτερες επιδόσεις από άποψη κάλυψης, φασματικής απόδοσης, χωρητικότητας, αλλά και κατανάλωσης ισχύος [5].



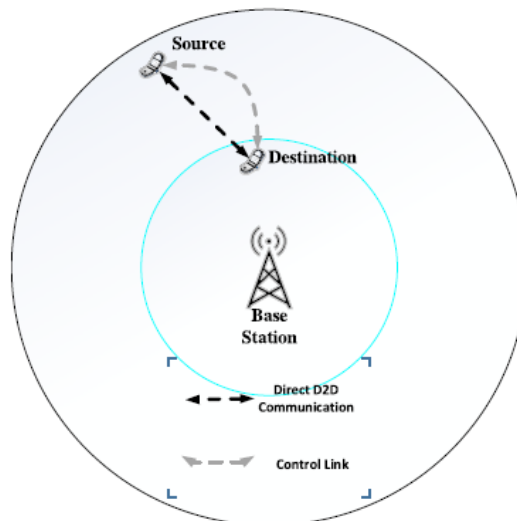
Σχήμα 1.3: Ετερογενής αρχιτεκτονική ασύρματου κυψελοειδούς δικτύου 5G [8].

#### 1.3.2.5 Επικοινωνία Device to Device (D2D)

Όπως ήδη αναλύσαμε προηγουμένως, η επικοινωνία D2D αποτελεί τη μέθοδο των συσκευών με την οποία μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα μεταξύ τους σε επίπεδο χρήστη χωρίς την ανάγκη χρήσης πόρων του δικτύου. Στις συμβατικές επικοινωνίες όλες οι συσκευές επικοινωνούν απευθείας και αποκλειστικά με το BS όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα. Το D2D όμως επιτρέπει την εφαρμογή πολλών σεναρίων στα οποία οι συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα την μείωση της απαιτούμενης ενέργειας για επικοινωνία εξαιτίας των μικρότερων αποστάσεων που επιτυγχάνεται με την αποφυγή της μεταφοράς δεδομένων πρώτα μέσω του BS [1].



Σχήμα 1.4 Επικοινωνία αναμετάδοσης συσκευής με ελεγχόμενο σταθμό βάσης [1]



Σχήμα 1.5 Απευθείας επικοινωνία συσκευής με άλλη συσκευή [1]

#### 1.3.2.6 SDN και NFV

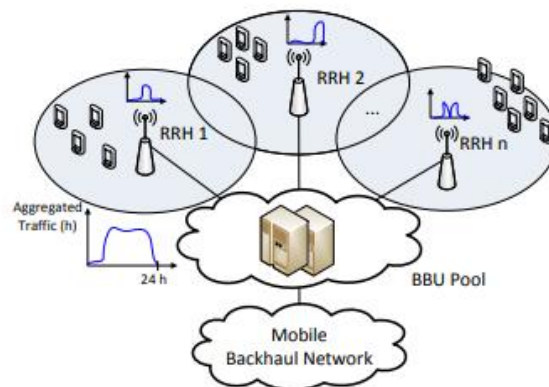
Οι τεχνολογίες δικτύων οριζόμενων από λογισμικό (Software Defined Networking–SDN) και ιδεατοποίησης λειτουργιών δικτύου (Network Function Virtualization–NFV) αποτελούν δύο σημαντικές καινοτομίες που αναμένεται να αντιμετωπίσουν σημαντικές προκλήσεις όπως η μεγάλη ποικιλία και δυναμική εφαρμογών του δικτύου καθώς και οι αναδυόμενες εφαρμογές οι οποίες δημιουργούν νέες προκλήσεις για την παροχή υπηρεσιών δικτύου. Το SDN επιτρέπει το διαχωρισμό των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων καθώς και στον προγραμματισμό δικτύων χρησιμοποιώντας ανοιχτές διεπαφές. Το NFV από την άλλη, αφαιρώντας πολλές από τις λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης από τους BSs, και εικονικοποιώντας τους σε ένα cloud, επιτρέπει την πραγματοποίηση αναβαθμίσεων των λειτουργιών του δικτύου, σε πολύ μικρότερο κόστος. Παράλληλα, οι δυο αυτές τεχνολογίες προσφέρουν σημαντική μείωση στις καθυστερήσεις από άκρο σε άκρο, μεταφέροντας τμήματα του δικτύου πιο κοντά στους χρήστες. Το SDN και NFV λοιπόν, με το

συνδυασμό της υπολογιστικής νέφους – cloudcomputing και της εικονικοποίησης δικτύου – networkvirtualization, διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς ενισχύοντας στην ευελιξία και επεκτασιμότητα του δικτύου, με την εξασφάλιση πλήρους ασφάλειας και χαμηλού κόστους [7].

### 1.3.2.7 C-RAN

Το C-RAN αποτελεί μια αρχιτεκτονική δικτύου που διαδραματίζει βασικό ρόλο στην ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς. Σε αντίθεση με τις αρχιτεκτονικές που εφαρμόστηκαν στις προηγούμενες γενιές, όπου η λειτουργίες επεξεργασίας ραδιοσημάτων και baseband εκτελούνται μαζί στο σταθμό βάσης, η C-RAN προτείνει το διαχωρισμό των λειτουργιών αυτών. Έτσι, οι μονάδες επεξεργασίας baseband, χαρακτηριζόμενες ως Baseband Units – BBUs, των συμβατικών θέσεων κυψέλης διαχωρίζονται από τις αναλογικές μονάδες ραδιοπρόσβασης, Remote Radio Heads – RRHs, και μετακινούνται σε ένα cloud για μια συγκεντρωτική επεξεργασία και διαχείριση. Ο μηχανισμός αυτός διασφαλίζει μειώσεις των καθυστερήσεων κατά τη διάρκεια μετάδοσης εντός του BBU-pool σε συμβατικούς BSs. Παράλληλα, η χρήση περισσότερων σε αριθμό και φθηνότερων RRHs βελτιώνει τη χωρητικότητα του δικτύου, μειώνει τα βασικά κόστη λειτουργίας και την κατανάλωση ισχύος [9].

Οι προκλήσεις στην ανάπτυξη μιας τέτοιας αρχιτεκτονικής είναι πολλές και ακόμα περισσότερα τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν με την εφαρμογή της στα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς, λεπτομέρειες για τα οποία θα μελετήσουμε εκτενώς στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.



Σχήμα 1.6 Δίκτυο αρχιτεκτονικής C-RAN

## 1.4 Καινοτομίες και πλεονεκτήματα εφαρμογής δικτύων 5G

Τα δίκτυα 5ης γενιάς και οι δυνατότητές τους τόσο σε θέμα ταχυτήτων, καθυστερήσεων και απόδοσης, όσο και σε ότι αφορά την απόδοση, την ενεργειακή κατανάλωση αλλά και την πληθώρα νέων υπηρεσιών που προσφέρει, κατάφεραν να αποτελέσουν το απόλυτο καινοτόμο τεχνολογικό φαινόμενο των τελευταίων ετών. Οι

υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με την εξασφάλιση χαμηλών καθυστερήσεων δίνουν τη δυνατότητα ταχύτερης και ευκολότερης μεταφοράς αρχείων των συσκευών, καθώς και τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη – Quality of Experience (QoE) σε πολλές εφαρμογές και υπηρεσίες, που περιλαμβάνουν το gaming και τη διεξαγωγή βιντεοκλήσεων. Η βελτίωση αυτή του QoE με τη χρήση του 5G, συναντάται σε πολλές ακόμα ψυχαγωγικές εφαρμογές που συμπεριλαμβάνουν τεχνολογίες όπως αυτές του 4k/8k Streaming και VR Streaming. Οι δυνατότητες ταυτόχρονης σύνδεσης πλήθους συσκευών διαφορετικού τύπου που προσφέρει το 5G, σε συνδυασμό με την χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση που απαιτεί, άνοιξε τον δρόμο για την ανάπτυξη του IoT. Το IoT αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα συσκευών που περιλαμβάνει από smartwatches, μέχρι αυτοκίνητα και ολόκληρα σπίτια εξοπλισμένα με ειδικούς αισθητήρες. Τέλος, το 5G αναμένεται να φέρει μεγάλες αλλαγές και στην ιατρική. Οι υψηλές ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων και η αξιοπιστία σύνδεσης θα διευκολύνει τη διάγνωση σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας ακόμα και τη δυνατότητα να δούμε στο μέλλον εφαρμογές απομακρυσμένων επεμβάσεων.

### 1.5 Συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καλούμαστε να εξετάσουμε την απόδοση της αρχιτεκτονικής C-RAN σε δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς. Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή στα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα αλλά και στην πορεία ανάπτυξής τους τα τελευταία χρόνια. Επιπλέον, αναλύθηκαν οι προϋποθέσεις ανάπτυξης και τα πλεονεκτήματα των δικτύων 5G και παράλληλα ορισμένες τεχνολογικές προτάσεις οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή στα δίκτυα αυτά με σκοπό την διαχείριση των λειτουργιών του και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ποιότητας χρήσης. Τέλος, είδαμε μερικές από τις εφαρμογές ανάπτυξης των δικτύων 5<sup>ης</sup> γενιάς ικανές να εκπληρώσουν τις προσδοκίες των χρηστών ακόμα και στην καθημερινότητά τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται βασικές έννοιες της θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης για την μαθηματική μελέτη των συστημάτων απωλειών. Ακόμη, εξετάζονται μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης και συγκεκριμένα αυτό των απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης γνωστό ως Erlang Multirate Loss Model (EMLM). Αφού κατανοηθεί πλήρως η έννοια της Πολυδιάστατης Κίνησης, ακολουθεί η περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου EMLM καθώς και ο υπολογισμός πιθανότητας απώλειας κλήσεων σε σύστημα που εφαρμόζεται το μοντέλο αυτό, ο οποίος συνοδεύεται και από αντίστοιχη μαθηματική ανάλυση. Έπειτα, γίνεται ανάλυση των μοντέλων απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης με δυνατότητα Επανάκλησης, το μοντέλο απλής επανάκλησης (Single Retry Model – SRM) και πολλαπλής επανάκλησης (MultiRetry Model – MRM), που θεωρούνται ικανά να βελτιώσουν σημαντικά τις απώλειες σε ένα σύστημα.

Το τρίτο κεφάλαιο εστιάζει στην εφαρμογή των μοντέλων πολυδιάστατης κίνησης, σε δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς αρχιτεκτονικής C-RAN. Αρχικά, εξηγείται η λειτουργία παραδοσιακών αρχιτεκτονικών και παράλληλα η ανάγκη εφαρμογής της πολλά υποσχόμενης C-RAN. Παράλληλα αναλύεται εκτενώς η καινοτόμα ιδέα διαχωρισμού του σταθμού βάσης από τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας στην οποία και στηρίζεται το C-RAN και το καθιστά ικανό να αντιμετωπίσει σημαντικές προκλήσεις

των δικτύων 5G. Ακολουθεί η εφαρμογή του μοντέλου EMLM σε αυτή και η μαθηματική του ανάλυση, καθώς επίσης και των SRM και MRM.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περνάμε στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, τα οποία αναφέρονται στην πιθανότητα απώλειας κλήσεων σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN που εφαρμόζει τα μοντέλα EMLM, και τα μοντέλα επανακλήσεων, εστιάζοντας στη σημασία του διαχωρισμού των μονάδων τηλεπικοινωνιακής και υπολογιστικής χωρητικότητας. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων συνοδεύεται από την τελική τους σύγκριση και από συμπεράσματα που εξήχθησαν μέσω της μελέτης τους.



## Κεφάλαιο 2. Εφαρμογή Μοντέλων Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης σε Δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς

### 2.1 Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Η Θεωρία της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης αποτελεί το βασικό συστατικό για το σχεδιασμό των κλασικών τηλεπικοινωνιακών δικτύων αλλά και τη βάση για την εξέλιξη της διάστασης και των επιδόσεών τους. Ο δανός μαθηματικός AgnerKragupErlang (1878-1929) ανέπτυξε τη θεωρία αυτή παράλληλα με τις εξελίξεις των τηλεφωνικών δικτύων στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Με το πέρασμα των δεκαετιών αναπτύσσεται παράλληλα με τις τεράστιες εξελίξεις της τεχνολογίας μεταγωγής και δικτύων επιτυγχάνοντας έτσι και τη δική της συνεχή εξέλιξη με την ενσωμάτωση των αλλαγών αυτών.[10]

Η Θεωρία της Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης ασχολείται με την εφαρμογή της μαθηματικής μοντελοποίησης της τηλεπικοινωνιακής κίνησης, της χωρητικότητας του δικτύου και των σχέσεων απόδοσής του. Σκοπός της είναι η αξιολόγηση της λειτουργίας του δικτύου καθώς και η εξασφάλιση του βέλτιστου και οικονομικότερου σχεδιασμού των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ώστε να ικανοποιούνται οι προδιαγραφές της ποιότητας εξυπηρέτησης - QoS των χρηστών του δικτύου.[10] Μερικές εφαρμογές της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης συναντώνται στον υπολογισμό διαστάσεων μιας ζεύξης, στο σχεδιασμό εναλλακτικής δρομολόγησης λόγω συμφόρησης, στην αξιοποίηση υποσυστημάτων χρονομερισμού (timesharing), στην βέλτιστη διαστασιολόγηση δικτύου, καθώς και στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης του δικτύου, όπως ήδη αναφέρθηκε.

#### 2.1.1 Βασικά στοιχεία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Πρωταρχικό στοιχείο της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αποτελεί η κλήση (call) η απαίτηση δηλαδή για σύνδεση σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα που πραγματοποιείται από έναν χρήστη. Ρυθμός άφιξης (arrival rate) κλήσεων σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα ορίζεται ως ο αριθμός των κλήσεων που καταφθάνουν στο σύστημα αυτό στη μονάδα του χρόνου και συμβολίζεται με  $\lambda$ . Ο χρόνος εξυπηρέτησης (service time) μια κλήσης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που απαιτείται ώστε να εξυπηρετηθεί μια κλήση στο σύστημα. Έτσι, ο ρυθμός εξυπηρέτησης (service rate) κλήσεων προσδιορίζει τον αριθμό των εισερχόμενων κλήσεων του συστήματος που εξυπηρετούνται στη μονάδα του χρόνου:  $\mu = \frac{1}{h}$ , όπου  $h$  η διάρκεια της κλήσης (holding time). Τέλος, το φορτίο κίνησης  $a$  (traffic load) ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος ορίζεται ως η συνολική διάρκεια όλων των κλήσεων

ανά μονάδα χρόνου και υπολογίζεται ως εξής  $a = ch[erl]$ , όπου  $c$  ο αριθμός των κλήσεων που φθάνουν στο σύστημα.

### 2.1.2 Καθορισμός Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Η λήψη, επεξεργασία και αξιοποίηση που προκύπτει από τις μετρήσεις της τηλεπικοινωνιακής κίνησης αποτελούν πολύτιμο στοιχείο για δραστηριότητες όπως ο σχεδιασμός του δικτύου και η παρακολούθηση της παρεχόμενης ποιότητας επικοινωνίας στους συνδρομητές. Έτσι, προκειμένου να αξιολογηθεί ένα σύστημα δικτύου στα πλαίσια της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης, καθίσταται αναγκαίος ο ποσοτικός καθορισμός της διεκπεραιωτικής του ικανότητας, της ποσότητας δηλαδή η οποία μπορεί να εξυπηρετήσει μια κλήση που εισέρχεται στο εκάστοτε σύστημα. Η ποσότητα αυτή αντιπροσωπεύεται από τον αριθμό των κυκλωμάτων ή trunks του τηλεπικοινωνιακού συστήματος και αποτελεί την χωρητικότητα  $C$  αυτού. Ο αριθμός των trunks που είναι απαραίτητο να διαθέτει ένα σύστημα εξαρτάται από την κίνηση που πρέπει να διεκπεραιωθεί καθώς επίσης και από την κίνηση κατά την ώρα μέγιστης αιχμής (busy-hour traffic) [11].

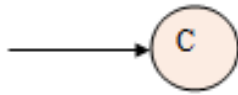
### 2.1.3 Συμφόρηση Τηλεπικοινωνιακής

#### 2.1.3.1 Συστήματα απωλειών

Η περίπτωση κατά την οποία όλες οι γραμμές (trunks) που καλούνται να εξυπηρετήσουν την τηλεπικοινωνιακή κίνηση είναι κατειλημμένες και συνεπώς το σύστημα δεν είναι δυνατό να δεχθεί άλλες κλήσεις, ονομάζεται συμφόρηση (congestion). Κατά τη διάρκεια της κατάστασης αυτής παρατηρούνται απώλειες κλήσεων είτε καθυστερήσεις και ισχύει ότι:

$$\text{Διεκπεραιούμενη κίνηση} = \text{Προσφερομένη κίνηση} - \text{Απώλειες}$$

Έτσι προκύπτουν οι περιπτώσεις δυο συστημάτων, αυτό του συστήματος απωλειών (loss or non-delay system) και αυτό του συστήματος αναμονής (waiting or delay system), όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 2.1, και Σχήμα 2.2, αντίστοιχα. Ένα σύστημα απωλειών αποτελείται από τις κλήσεις (calls) και τους εξυπηρετητές (servers) οι οποίοι ορίζουν και τη χωρητικότητα σε μονάδες εύρους ζώνης του συστήματος. Κριτήριο της απόδοσης του συστήματος αποτελεί η πιθανότητα απώλειας κλήσης (Call Blocking Probability - CBP). Στην περίπτωση των συστημάτων αναμονής η εισερχόμενη κλήσεις περιμένουν σε ουρά μέχρι να εξυπηρετηθούν. Σε αυτά τα συστήματα το κριτήριο απόδοσής τους είναι η πιθανότητα αναμονής ή ο μέσος χρόνος αναμονής της κλήσης στο σύστημα έως την εξυπηρέτησή της [13].



Σχήμα 2.1: Σύστημα Απωλειών Κλήσεων



Σχήμα 2.2: Σύστημα Αναμονής Κλήσεων

#### 2.1.4 Βαθμός εξυπηρέτησης

Ο βαθμός εξυπηρέτησης (Grade of Service-GOS) αποτελεί τον δείκτη της ποιότητας εξυπηρέτησης που παρέχει το τηλεπικοινωνιακό σύστημα και ορίζεται ως το ποσοστό των κλήσεων που χάνονται είτε καθυστερούν να διεκπεραιωθούν λόγω συμφόρησης. Από τα παραπάνω ισχύει:

$$B = \frac{\text{Συνολικός αριθμός χαμένων κλήσεων}}{\text{Συνολικός αριθμός προσφερθεισών κλήσεων}}$$

## 2.2 Μοντέλα Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

### 2.2.1 Ορισμός

Με τον όρο μοντέλο τηλεπικοινωνιακής κίνησης εννοούμε την μαθηματική περιγραφή ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος η οποία καθορίζει ποσοτικά τις προαναφερθείσες σχέσεις μεταξύ του προσφερόμενου φορτίου  $a$ , του GOS, και της χωρητικότητας  $C$ . Τα μοντέλα αυτά δημιουργούνται βασιζόμενα σε υποθέσεις με τις οποίες προσπαθούμε να περιγράψουμε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα. Η σημασία της ανάπτυξης τέτοιων μοντέλων είναι μεγάλη καθώς συμβάλλουν στο σχεδιασμό ενός συστήματος, στην αξιολόγηση των μετρήσεων απόδοσης, ακόμα και στην πρόβλεψη ορισμένων ενεργειών που πιθανόν να προκύψουν υπό ορισμένες συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται άμεσα η μελέτη του εκάστοτε συστήματος καθώς και η διαμόρφωση ορθών συμπερασμάτων[14].

### 2.2.2 Βασικές διαδικασίες τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

Η διαδικασία γεννήσεως μιας κλήσης καθώς και η διαδικασία άφιξης της στο σύστημα αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Στην παρούσα διπλωματική όπου εξετάζεται το μοντέλο EMLM και το μοντέλο απλής και πολλαπλής επανάκλησης συναντάται η περίπτωση όπου οι συνδρομητές του δικτύου δενακολουθούν κάποια συγκεκριμένη στρατηγική σχετικά με το πότε θα αιτηθούν εξυπηρέτηση, επομένως θεωρούμε τον τυχαίο τρόπο γεννήσεως μια κλήσης. Σχετικά με την άφιξη των κλήσεων στο σύστημα, προκειμένου να θεωρηθεί τυχαία είναι αναγκαίο να ικανοποιούνται οι εξής προϋποθέσεις:

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

1. Η πιθανότητα ότι μια κλήση θα γεννηθεί σε χρονικό διάστημα  $(t, t + \Delta t)$  τείνει στο  $\lambda \Delta t$ , ανεξαρτήτως του χρόνου  $t$ , όπου  $\lambda$  σταθερό.
2. Η πιθανότητα δύο ή περισσότερες κλήσεις να γεννηθούν σε διάστημα  $(t, t + \Delta t]$  τείνει στο μηδέν.
3. Οι κλήσεις γεννώνται ανεξάρτητα η μια από την άλλη.

Η τυχαία αυτή διαδικασία άφιξης που προκύπτει όταν ισχύει ότι η πιθανότητα άφιξης κατά το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  είναι  $\lambda \Delta t$  ανεξάρτητη από οποιαδήποτε γνώση του παρελθόντος, καλείται Poisson. Η κατανομή Poisson περιγράφεται από την παρακάτω σχέση [11]:

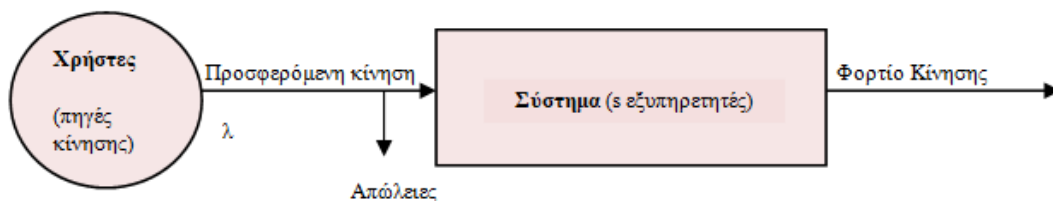
$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \text{ όπου } \lambda \text{ ρυθμός άφιξης.} \quad (2.1)$$

### 2.2.3 Μοντέλο απωλειών Erlang

Το μοντέλο απωλειών Erlang αποτελείται από ένα σύστημα χωρητικότητας  $C$  μονάδων εύρους ζώνης ικανό να εξυπηρετήσει μόνο μια κατηγορία τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Η άφιξη των κλήσεων ακολουθεί την κατανομή Poisson με ρυθμό  $\lambda$ , ενώ ο χρόνος εξυπηρέτησης είναι εκθετικά κατανομημένος και ίσος με  $\frac{1}{\mu}$ . Κάθε εισερχόμενη κλήση εξυπηρετείται από έναν εξυπηρετητή (server) καταλαμβάνοντας μια μονάδα εύρους ζώνης. Στην περίπτωση όπου όλοι οι servers του συστήματος είναι απασχολημένοι οι κλήσεις που προσπαθούν να εισέλθουν στο σύστημα φράσσονται και χάνονται.

Ένα αντίστοιχο σύστημα απωλειών με πεπερασμένο αριθμό εξυπηρετητών ( $s$ ) και τυχαίες διαδικασίες άφιξης και εξυπηρέτησης κλήσεων συμβολίζεται ως  $M/M/s(0)$ , σύμφωνα με τον Kendall, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3. Οι όροι  $M$  (Markov) συμβολίζουν την εκθετική κατανομή πιθανότητας των χρονικών διαστημάτων μεταξύ των διαδοχικών αφίξεων και την εκθετική κατανομή εξυπηρέτησης των κλήσεων αντίστοιχα. Το  $s(0)$  υποδεικνύει ότι στο σύστημα δεν υπάρχει ουρά [12].

Ένα τέτοιο σύστημα απεικονίζεται όπως το παρακάτω σχήμα:

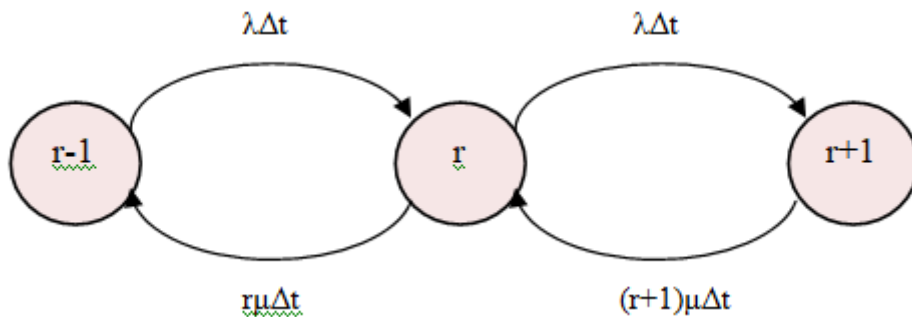


Σχήμα 2.3: Σύστημα Απωλειών  $M/M/s(0)$

Σύμφωνα με το [11], η πιθανότητα να βρίσκονται ταυτόχρονα όλοι οι εξυπηρετητές (s) κατειλημμένοι σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, δηλαδή η πιθανότητα απώλειας των κλήσεων, γνωστή ως ErlangB formula, υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_r = \frac{\frac{a^r}{r!}}{\sum_{i=0}^s \frac{a^i}{i!}}, \quad r = 0, 1 \dots s \quad (2.2)$$

Η μετάβαση του συστήματος από μία κατάσταση σε μία άλλη, μπορεί να παρασταθεί σχηματικά με τη βοήθεια ενός διαγράμματος μεταπτώσεων όπως το διάγραμμα του Σχήματος 2.4:



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα Μεταπτώσεων Καταστάσεων M/M/s(0)

### 2.3 Μοντέλο απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης (Erlang Multi-rate Loss Model EMLM)

#### 2.3.1 Πολυδιάστατη Κίνηση

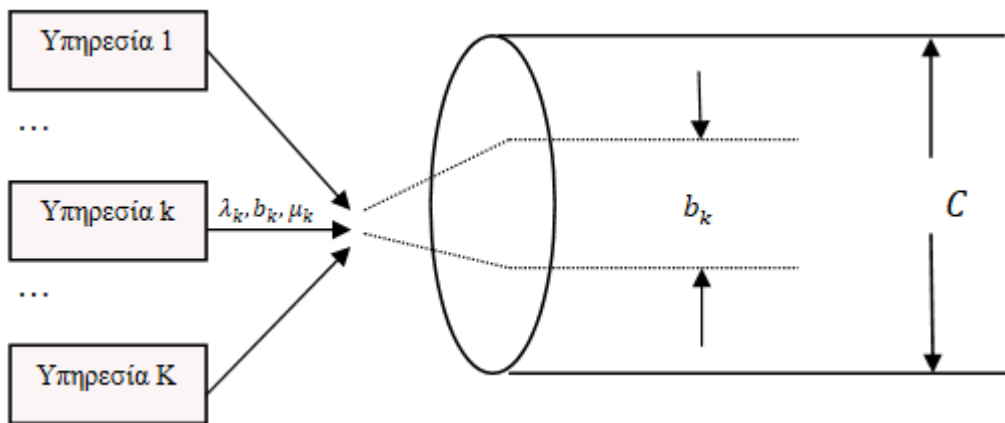
Η πολυδιάστατη κίνηση αφορά τη σύγχρονη λειτουργία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων τα οποία εξυπηρετούν κλήσεις με διαφορετικά χαρακτηριστικά και επομένως ανήκουν σε διαφορετικές υπηρεσίες κίνησης. Οι υπηρεσίες αυτές έχουν συνήθως διαφορετικές ανάγκες σε εύρος ζώνης δηλαδή απαιτήσεις σε πόρους και η δέσμευση τους αφορά διαφορετικές χρονικές στιγμές [12].

Η μεικτή κίνηση φωνής και δεδομένων που μοιράζονται μια ομάδα καναλιών μετάδοσης με διαφορετική ταχύτητα μετάδοσης αποτελεί παράδειγμα πολυδιάστατης κίνησης [11].

#### 2.3.2 Περιγραφή μοντέλου απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης EMLM

Το Erlang Multirate Loss Model το οποίο και εξετάζουμε, θεωρείται γενίκευση του μοντέλου απωλειών Erlang που είδαμε παραπάνω και αποτελεί ένα μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης. Έτσι, στο μοντέλο αυτό η προσφερόμενη κίνηση προέρχεται από περισσότερες της μιας κατηγορίες υπηρεσίας, οι οποίες έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά κίνησης.

Για την ανάλυση του μοντέλου της πολυδιάστατης κίνησης, θεωρούμε  $K$  τις κατηγορίες κίνησης που εξυπηρετούνται σε σύστημα χωρητικότητας  $C$  μονάδων εύρους ζώνης. Οι κλήσεις που παράγονται από τις  $K$  κατηγορίες ακολουθούν διαδικασία Poisson, φτάνουν στο σύστημα με ένα ρυθμό  $\lambda_k$  και εξυπηρετούνται με ρυθμό  $\mu_k$ , όπου  $k = 1, 2, \dots, K$ . Κάθε εισερχόμενη κλήση κατηγορίας  $k$  απαιτεί  $b_k$  μονάδες εύρους ζώνης για να εξυπηρετηθεί. Στην περίπτωση όπου οι μονάδες αυτές δεν είναι διαθέσιμες στο σύστημα η κλήση απορρίπτεται και χάνεται. Εάν όμως το απαιτούμενο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο κατά την άφιξη της κλήσης, τότε εισέρχεται κανονικά στο σύστημα και παραμένει για διάρκεια ίση με τον χρόνο εξυπηρέτησης της. Μετά την πάροδο αυτού του χρόνου οιαντίστοιχες  $b_k$  μονάδες αποδεσμεύονται. Η σχηματική απεικόνιση του EMLM δίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης  $K$  υπηρεσιών

Στο σύστημα απωλειών EMLM πραγματοποιείται εφαρμογή πολιτικής πλήρους διάθεσης (complete sharing policy) των πόρων του συστήματος. Σύμφωνα με την πηγή [11], στην πολιτική αυτή μια εισερχόμενη κλήση η οποία χρειάζεται  $b$  μονάδες εύρους ζώνης για να διεκπεραιωθεί φράσσεται αν και μόνο αν λιγότερες από  $b$  μονάδες εύρους ζώνης από τις  $C$  είναι διαθέσιμες. Συνεπώς, μια κλήση που φθάνει στο σύστημα γίνεται δεκτή οποτεδήποτε είναι ελεύθερο το απαιτούμενο εύρος ζώνης. Έτσι, για σύστημα πλήρους διάθεσης το σύνολο δυνατών καταστάσεων του συστήματος  $\Omega$  περιγράφεται από τη σχέση:

$$\Omega = \{n: 0 \leq nb \leq C\}, \quad nb = \sum_{k=1}^K n_k b_k \quad (2.3)$$

όπου  $n_k$  ο αριθμός των κλήσεων υπηρεσίας  $k$  και  $\vec{n} = (n_1, n_2, \dots, n_K)$  το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης.

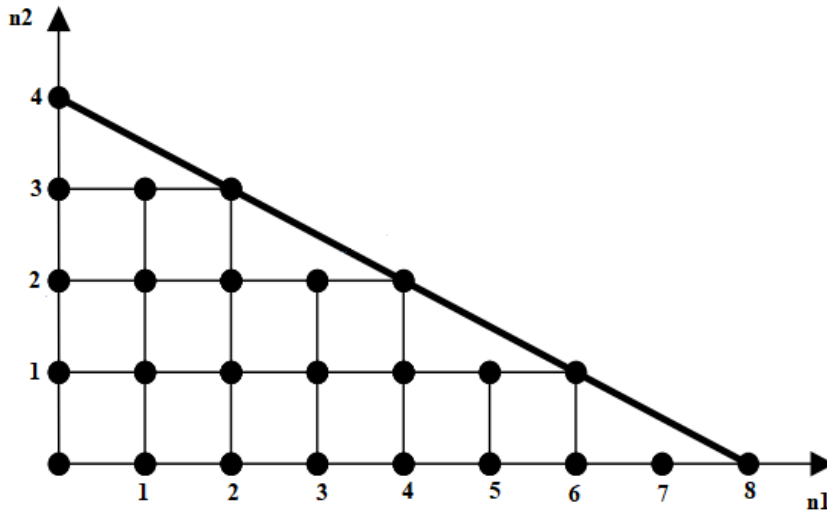
#### Παράδειγμα 2.1

Για την καλύτερη κατανόηση της παραπάνω ανάλυσης, θεωρούμε σύστημα χωρητικότητας  $C = 8$  μονάδες εύρους ζώνης και δύο υπηρεσίες οι κλήσεων. Οι

κλήσεις αυτές  $n_1$  και  $n_2$  απαιτούν αντίστοιχα  $b_1$  και  $b_2$  μονάδες εύρους ζώνης. Το σύνολο  $\Omega$  των δυνατών καταστάσεων που προκύπτει από την (2.3) είναι:

$$\Omega = \{n: 0 \leq n_1 + 2n_2 \leq 8\}$$

Η σχέση αυτή απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.6 στο οποίο τα σημεία 8 και 4 των αξόνων  $n_1$  και  $n_2$  αντίστοιχα προκύπτουν από τις εκφράσεις  $\frac{c}{b_1}$  και  $\frac{c}{b_2}$  [11]:



Σχήμα 2.6: Σύνολο καταστάσεων μοντέλου πολυδιάστατης κίνησης 2 υπηρεσιών με πολιτική πλήρους διάθεσης.

### 2.3.3 Υπολογισμός πιθανότητας απώλειας κλήσης υπηρεσίας $k$

Για να υπολογίσουμε την πιθανότητα απώλειας κλήσης υπηρεσίας  $k$ ,  $P_{b_k}$ , η οποία απαιτεί  $b_k$  μονάδες εύρους ζώνης κατά την είσοδό της στο σύστημα, ορίζουμε αρχικά ως  $P(n)$  την πιθανότητα μόνιμης κατάστασης. Τότε έχουμε:

$$P_{b_k} = \sum_{n \in B_k^+} P(n) \quad (2.4)$$

όπου  $B_k^+ = \{n \in \Omega: n_k^+ \in \Omega\}$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει και η παραδοχή ότι η άφιξη μιας κλήσης τύπου  $k$  οδηγεί το σύστημα σε μια κατάσταση η οποία δεν ανήκει στο σύνολο  $\Omega$ , όπου αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κλήση αυτή να φράσσεται [11].

Η πιθανότητα μόνιμης κατάστασης  $P(n)$  για αυθαίρετο τρόπο διάθεσης των πόρων του συστήματος δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

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

Όπου  $G \equiv G(\Omega) = \sum_{n \in \Omega} \left( \prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} \right)$  η σταθερά κανονικοποίησης του συστήματος και  $a_k$  το προσφερόμενο φορτίο κίνησης των κλήσεων υπηρεσίας  $k$ .

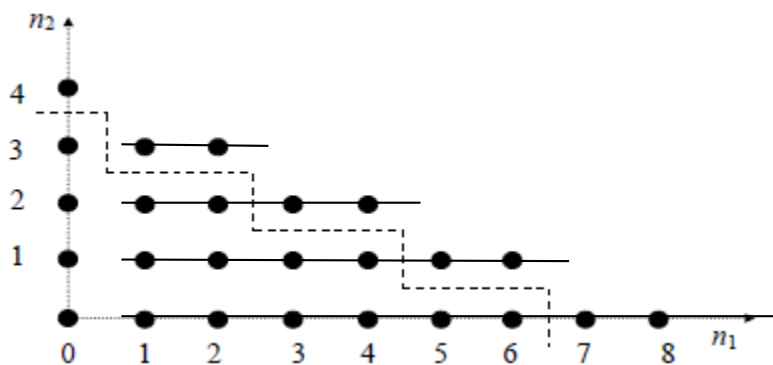
### 2.3.4 Υπολογισμός Πιθανότητας απώλειας κλήσης με χρήση Αναδρομικού Τύπου

Η ανάγκη υπολογισμού πιθανοτήτων απώλειας κλήσεων σε συστήματα απωλειών τα οποία εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό υπηρεσιών κλήσεων, οδήγησε στην εύρεση ενός απλού μονοδιάστατου τύπου [12].

Σε σύστημα πλήρους διάθεσης πόρων, η  $G(\Omega)$  ορίζεται και ως  $G(C, K)$ . Για να προκύψει ο υπολογισμός της πιθανότητας κλήσης υπηρεσίας  $k$ ,  $P_{b_k}$ , θεωρούμε το υποσύνολο του  $\Omega$ , το οποίο ορίζεται ως  $\Omega_k = \{n \in \Omega : nb \leq C - b_k\}$ . Μια κλήση της υπηρεσίας  $k$  που εισέρχεται στο σύστημα θα εξυπηρετηθεί εφόσον βρίσκεται σε κάποια κατάσταση του  $\Omega_k$ . Έτσι, εφόσον η πιθανότητα να συμβεί κάτι τέτοιο είναι  $\sum_{n \in \Omega_k} P(n)$ , η πιθανότητα απώλειας κλήσης της υπηρεσίας κίνησης  $k$  θα είναι:

$$P_{b_k} = 1 - \sum_{n \in \Omega} P(n) \quad (2.6)$$

Ανατρέχοντας στο παράδειγμα 2.1, προκύπτει το Σχήμα 2.7, το οποίο απεικονίζει τα δύο σύνολα  $\Omega$  και  $\Omega_2$  στο σύστημα το οποίο μελετήθηκε [11]:



Σχήμα 2.7: Σύνολα  $\Omega$  και  $\Omega_2$  για το σύστημα του παραδείγματος 2.1

Παρατηρούμε ότι το σύνολο  $\Omega$  περιλαμβάνει όλες τις μαύρες βούλες, δηλαδή όλες τις δυνατές καταστάσεις, ενώ το υποσύνολο  $\Omega_2$  αποτελείται από τις βούλες κάτω της διακεκομμένης γραμμής.

Λόγω της (2.5) προκύπτει:

$$P_{b_k} = 1 - \frac{\sum_{n \in \Omega_k} \prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!}}{\sum_{n \in \Omega} \prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!}} \Rightarrow P_{b_k} = 1 - \frac{G(C - b_k, K)}{G(C, K)} \quad (2.7)$$

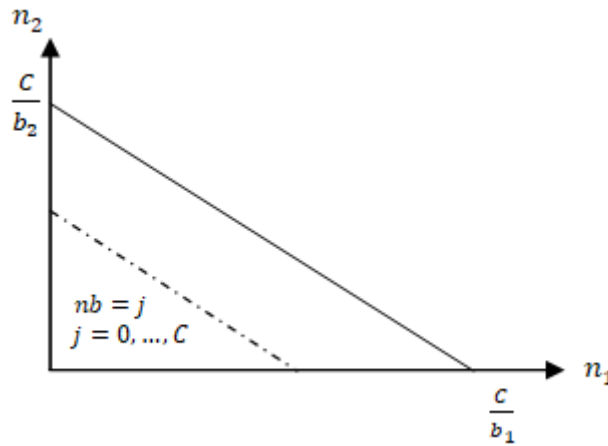


Το  $G(C, K)$  υπολογίζεται από τον εξής αναδρομικό τύπο:

$$G(j, k) = \sum_{l=0}^{\lfloor j/b_k \rfloor} \frac{a_k^l}{l!} G(j - lb_k, k - 1) \quad k = 2, \dots, K \quad j = 0, 1, \dots, C \quad (2.8\alpha)$$

$$G(j, 1) = \sum_{l=0}^{\lfloor j/b_1 \rfloor} \frac{a_1^l}{l!} \quad j = 0, 1, \dots, C \quad (2.8\beta)$$

Από τον αναδρομικό τύπο αυτό επιτυγχάνεται ο υπολογισμός στοιχείων πίνακα διαστάσεων  $[C \times K]$ . Στις περιπτώσεις όμως όπου οι τιμές των  $C$  και  $K$  είναι μεγάλες ο υπολογισμός αυτός καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολος. Έτσι, σύμφωνα με την [11] παρουσιάζεται ένας απλούστερος τρόπος υπολογισμού της πιθανότητας απώλειας μέσω ενός μονοδιάστατου αναδρομικού τύπου. Αρχικά θεωρούμε ένα σύνολο καταστάσεων  $\Omega_j = \{n \in \Omega : nb = j\}$ , στο οποίο υπάρχουν ακριβώς  $j$  κατειλημμένες μονάδες εύρους ζώνης. Οι δυνατές καταστάσεις του συνόλου είναι αυτές που βρίσκονται πάνω στη διαγώνιο  $nb = j$  του Σχήματος 2.8:



Σχήμα 2.8: Σύνολα  $\Omega_j$  και  $\Omega_c$  σε σύστημα πλήρους διάθεσης

Η πιθανότητα να υπάρχουν  $j$  κατειλημμένες γραμμές στην κατάσταση ισορροπίας είναι:

$$q(j) = \sum_{n \in \Omega_j} P(n) = \sum_{n \in \Omega_j} \prod_{k=1}^K \frac{a_k^{n_k}}{n_k!} G^{-1}(C, K) \quad (2.9)$$

Και η πιθανότητα απώλειας κλήσης  $P_{b_k}$  εκφράζεται και ως:

$$P_{b_k} = \sum_{\{n: nb > C - b_k\}} P(n) \quad (2.10)$$

Όταν οι κατειλημμένες γραμμές του συστήματος είναι  $j = nb > C - b_k$ , τότε παρατηρείται απώλεια των κλήσεων της υπηρεσίας  $k$ . Έτσι προκύπτει η πιθανότητα  $P_{b_k}$  ως το άθροισμα των πιθανοτήτων  $q(j)$  όπου  $j > C - b_k$ :

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

Για να υπολογίσουμε την  $P_{b_k}$  καθίσταται αναγκαία η εύρεση ενός μονοδιάστατου αναδρομικού τύπου για τον υπολογισμό των  $q(j)$ .

Αρχικά θεωρούμε ότι η  $P_{b_k}$  μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$P_{b_k} = \frac{\alpha_k - \alpha_k^*}{\alpha_k} \quad (2.12)$$

όπου  $\alpha_k$  είναι το προσφερόμενο φορτίο των κλήσεων υπηρεσίας  $k$  και  $\alpha_k^*$ : το φορτίο κίνησης που διεκπεραιώνεται από το σύστημα.

Βάση των ιδιοτήτων του φορτίου κίνησης [11], το φορτίο  $\alpha_k^*$  είναι η μέση τιμή του αριθμού των κλήσεων υπηρεσίας  $k$ ,  $n_k$ . Επομένως:

$$E[n_k] = \alpha_k (1 - P_{b_k}) = \alpha_k^* \quad (2.13)$$

Έπειτα, πολλαπλασιάζοντας το αριστερό μέλος της προηγούμενης σχέσης με  $b_k$  παίρνουμε το άθροισμα για  $k = 1, 2, \dots, K$  και προκύπτει η μέση τιμή των κατειλημμένων γραμμών του συστήματος  $E(j)$ .

$$E(j) = \sum_{k=1}^K b_k E(n_k) \quad (2.14)$$

Από τον ορισμό της μέσης τιμής προκύπτει:

$$E(j) = \sum_{j=0}^C j q(j) \quad (2.15)$$

Παράλληλα ισχύει:

$$E(n_k) = \alpha_k (1 - P_{b_k}) = \alpha_k \sum_{n \in \Omega_k} P(n) = \alpha_k \sum_{j=0}^{C-b_k} q(j) \quad (2.16)$$

Πολλαπλασιάζοντας το αριστερό και το δεξί μέλος της (2.16) με  $b_k$  και παίρνοντας το άθροισμα για  $k = 1, 2, \dots, K$  παίρνουμε:

$$\sum_{k=1}^K b_k E(n_k) = \sum_{k=1}^K \alpha_k b_k \sum_{j=0}^{C-b_k} q(j) = \sum_{j=0}^C \sum_{k=1}^K \alpha_k b_k q(j - b_k) \quad (2.17)$$

Λόγω της (2.14) και μέσω των (2.15) και (2.17) προκύπτει:

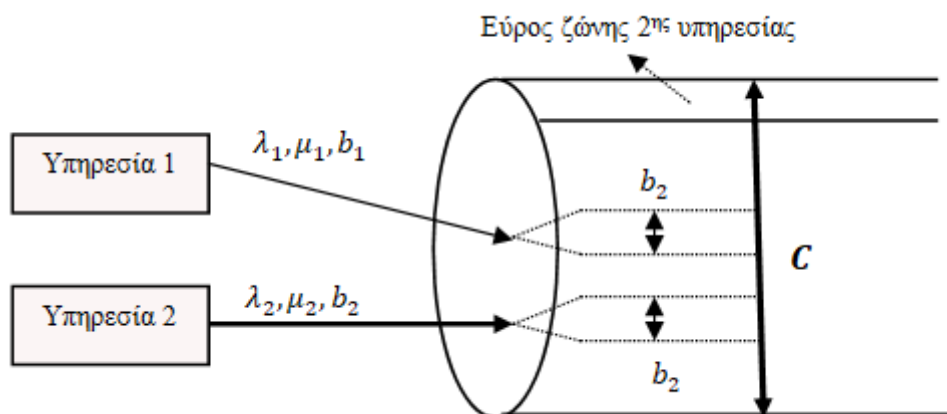
$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K \alpha_k b_k q(j - b_k) & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.18)$$

Όπου η  $q(j)$  είναι μη κανονικοποιημένη πιθανότητα να υπάρχουν  $j$  κατειλημμένες γραμμές στο σύστημα. Διαιρώντας με  $\sum_{j=0}^C q(j)$  προκύπτει  $\sum_{j=0}^C q(j) = 1$ .

Ο τύπος αυτός που προέκυψε είναι γνωστός ως αναδρομικός τύπος των Kaufman και Roberts. [15]

### 2.3.5 Πολιτική Δέσμευσης Εύρους Ζώνης

Σε συστήματα εξυπηρέτησης πολυδιάστατης κίνησης όπου εισέρχονται κλήσεις διαφορετικών υπηρεσιών και απαιτήσεων σε πόρους οι οποίοι είναι κοινί προς διάθεση για καθεμία από τις κλήσεις αυτές, είναι πιθανό να υπάρχουν ανισότητες ως προς την εξυπηρέτησή τους και παράλληλα στις απώλειες. Έτσι, η πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης (trunk reservation policy) είναι απαραίτητη ώστε να εξισορροπηθούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσης των διαφορετικών υπηρεσιών, όταν από κοινού μοιράζονται τους πόρους ενός συστήματος εξυπηρέτησης [11].



Σχήμα 2.9: Μοντέλο πολυδιάστατης κίνησης σε σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης

Η πολιτική δέσμευσης εύρους ζώνης ορίζει ότι μια κλήση τύπου  $k$  θα γίνει δεκτή στο σύστημα εφόσον μετά την αποδοχή της σε αυτό θα διαθέτει το λιγότερο  $t_k$  μονάδες εύρους ζώνης για την εξυπηρέτηση των κλήσεων υψηλής ταχύτητας (Σχήμα 2.9). Προκειμένου να υπολογισθεί το εύρος ζώνης το οποίο θα πρέπει να δεσμευθεί από κάθε υπηρεσία ώστε να εξισορροπηθούν οι πιθανότητες απώλειας κλήσεις μεταξύ των υπηρεσιών, πρέπει για κάθε υπηρεσία να προστεθούν οι μονάδες εύρους ζώνης ανά κλήση με το εύρος ζώνης που δεσμεύεται από αυτή. Το αποτέλεσμα του αθροίσματος αυτού θα πρέπει να είναι το ίδιο για κάθε υπηρεσία. Πρέπει δηλαδή να ισχύει:

$$b_1 + t_1 = b_2 + t_2 = \dots = b_n + t_n$$

### 2.3.5.1 Υπολογισμός πιθανότητας απώλειας κλήσης συστήματος Δέσμευσης Εύρους Ζώνης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε ένα σύστημα Δέσμευσης Εύρους Ζώνης οι κλήσεις υπηρεσίας  $k$  δεν θα γίνονται δεκτές για εξυπηρέτηση εφόσον υπάρχουν λιγότερες από  $t_k$  διαθέσιμες μονάδες εύρους ζώνης. Επιλέγοντας όμως κατάλληλα το  $t$  υπάρχει η δυνατότητα εξισορρόπησης των απωλειών των διαφορετικών υπηρεσιών, βελτιώνοντας την πιθανότητα απώλειας κλήσης των υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας σε βάρος αυτών χαμηλής ταχύτητας.

Έχοντας, λοιπόν, ένα σύστημα με  $K$  διαφορετικές υπηρεσίες κλήσης και κατηγορία υπηρεσίας  $k$ , χωρητικότητα εύρους ζώνης  $C$ , απαιτούμενο εύρος ζώνης  $b_k$  και προσφερόμενο φορτίο κίνησης  $a_k$  υπολογίζουμε προσεγγιστικά τις πιθανότητες απώλειας κλήσης για σύστημα δέσμευσης εύρους ζώνης με την παρακάτω σχέση:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{k=1}^K a_k D_k(j - b_k) q(j - b_k) & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (2.19)$$

όπου το

$$D_k(j - b_k) = \begin{cases} b_k & \text{για } j \leq C - t(k) \\ 0 & \text{για } j > C - t(k) \end{cases} \quad (2.19\alpha)$$

$$P_{b_k} = \sum_{j=0}^{b_k+t(k)-1} G^{-1} q(C - j) \quad (2.20)$$

όπου  $G = \sum_{j=0}^C q(j)$ .

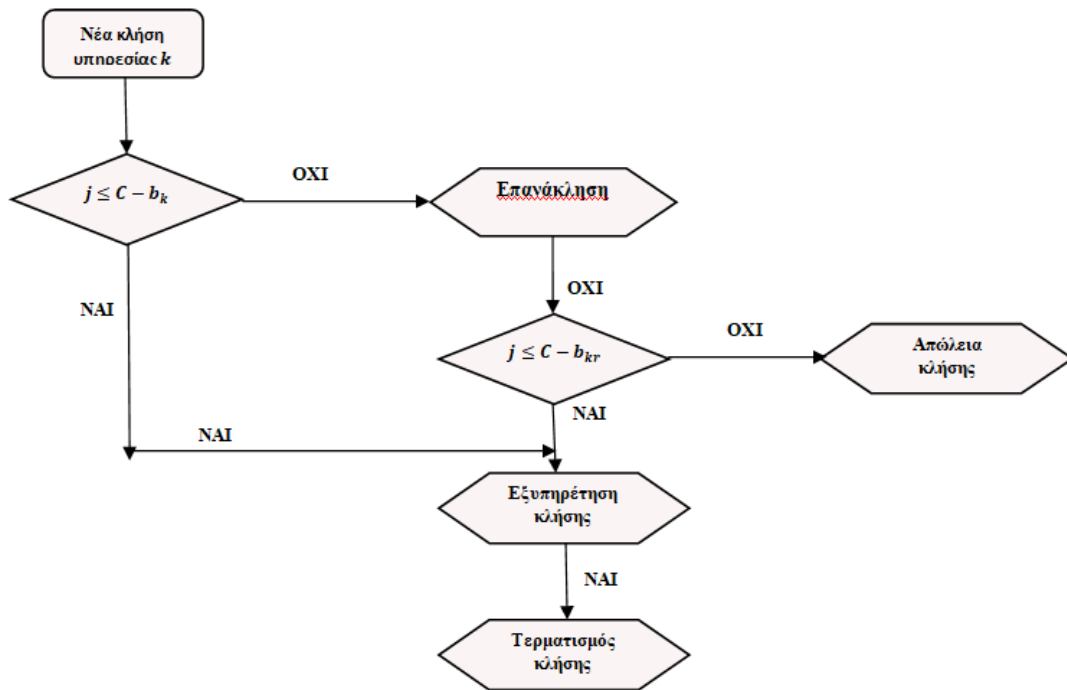
## 2.4 Μοντέλα απωλειών Πολυδιάστατης Κίνησης με δυνατότητα Επανάκλησης

### 2.4.1 Εισαγωγή στα μοντέλα Επανάκλησης

Στο μοντέλο απωλειών πολυδιάστατης κίνησης EMLM, όπως ήδη αναλύθηκε, ισχύει ότι μια κλήση υπηρεσίας  $k$  θα γίνει δεκτή στο σύστημα και θα εξυπηρετηθεί αν και μόνο αν υπάρχουν διαθέσιμοι πόροι για την εξυπηρέτησή της, όταν δηλαδή  $j \leq C - b_k$  ενώ θα απορριφθεί όταν  $j > C - b_k$ . Με σκοπό την μείωση των απωλειών σε ένα σύστημα, εφαρμόζονται επεκτάσεις του EMLM μοντέλου γνωστά ως μοντέλα επανάκλησης (retry models) στα οποία οι απορριφθείσες κλήσεις έχουν τη δυνατότητα να προσπαθήσουν ξανά να συνδεθούν αυτή τη φορά με λιγότερες απαιτήσεις και ταυτόχρονα μεγαλύτερο χρόνο εξυπηρέτησης. Συναντώνται δύο τύποι μοντέλων επανάκλησης, αυτό της Απλής Επανάκλησης (SingleRetrylossModel-SRM) και αυτό των Πολλαπλών Επανακλήσεων (MultiRetrylossModel) [16].

### 2.4.2 Μοντέλο απλής Επανάκλησης – Single Retry Model

Η χρήση του μοντέλου SRM επιτρέπει σε κλήση υπηρεσίας  $k$  να προσπαθήσει ξανά σύνδεση με το σύστημα, μόνο που αυτή τη φορά θα ζητήσει μικρότερο εύρος ζώνης,  $b_{kr} < b_k$  και νέο ρυθμό εξυπηρέτησης, ώστε για τη μέση τιμή του χρόνου εξυπηρέτησης να ισχύει  $\mu_{kr}^{-1} > \mu_k^{-1}$ . Στο σημείο αυτό, εξετάζεται εκ νέου η τιμή του  $j$  προκειμένου να ικανοποιείται η σχέση  $j \leq C - b_{kr}$ , ενώ στην αντίθετη περίπτωση απορρίπτεται. Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται περιγραφικά ο τρόπος λειτουργίας του SRM:



Σχήμα 2.10: Απεικόνιση εξυπηρέτησης κλήσης στο μοντέλο απλής επανάκλησης

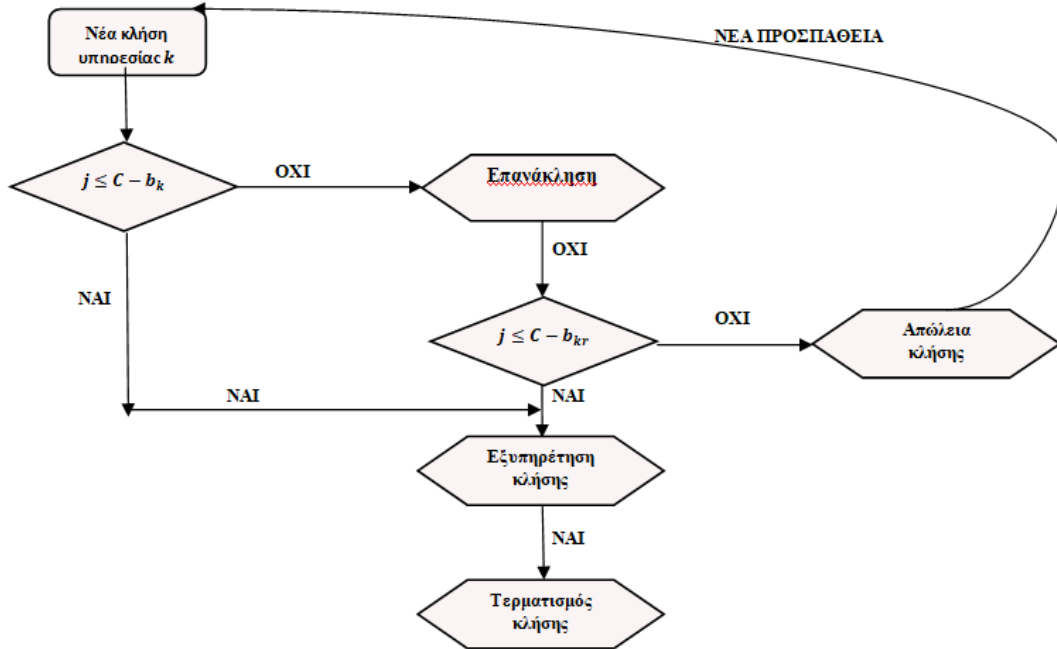
Γνωρίζοντας, λοιπόν, ότι  $j$  ο συνολικός αριθμός των κατειλημμένων γραμμών τότε η προσπάθεια που θα κάνει η κλήση υπηρεσίας  $k$  έχοντας μειώσει το εύρος ζώνης της θα είναι πετυχημένη όταν  $C - b_{kr} \geq j > C - b_k$ , όπου  $j = \sum_{k=1}^K (n_k b_k + n_{kr} b_{kr})$ . Τα  $n_k$  και  $n_{kr}$  είναι το πλήθος των κλήσεων της κατηγορίας  $k$  και  $k - retry$  με εύρος ζώνης  $b_k$  και  $b_{kr}$  αντίστοιχα [13].

Όπως και στο EMLM οι χρόνοι εξυπηρέτησης των κλήσεων είναι εκθετικά κατανομημένοι ενώ το διάνυσμα των καταστάσεων θα είναι πλέον:  $\vec{n} = (n_1, n_{1r}, n_2, n_{2r}, \dots, n_K, n_{Kr})$ . Στην κατάσταση ισορροπίας δηλαδή θα υπάρχουν πλέον κλήσεις τόσο τύπου  $k$  όσο και τύπου  $k - retry$ .

### 2.4.3 Μοντέλο πολλαπλών επανακλήσεων – Multi Retry Model

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, στο μοντέλο απλής επανάκλησης δίνεται η δυνατότητα γενίκευσης εφόσον αποκλειστεί η πρώτη κλήση επανάκλησης, με την

πραγματοποίηση περισσότερων επανακλήσεων. Σε πολλές περιπτώσεις η ανάγκη για περισσότερες της μιας προσπάθειας επανάκλησης κρίνεται απαραίτητη επομένως το μοντέλο MRM δίνει αυτή την ευκαιρία.



Σχήμα 2.11: Απεικόνιση εξυπηρέτησης κλήσης στο μοντέλο πολλαπλών επανακλήσεων

Το Σχήμα 2.11 απεικονίζει περιγραφικά τη διαδικασία επαναλήψεων επανάκλησης σε ένα σύστημα. Εάν η πρώτη κλήση επανάκλησης απορριφθεί μπορεί να ζητηθεί και δεύτερη επανάκληση με ακόμη μικρότερο αριθμό απαιτήσεων εύρους ζώνης. Εφόσον υπάρξει και άλλη απόρριψη η διαδικασία αυτή μπορεί να συνεχιστεί έως ότου η κλήση γίνει δεκτή για εξυπηρέτηση, με τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης να μειώνονται με κάθε νέα επανάκληση. Έτσι εάν  $S(k)$  ο αριθμός των επανακλήσεων υπηρεσίας  $k$  και  $b_k > b_{kr1} > \dots > b_{krs} > \dots > b_{krs(k)}$  οι μονάδες εύρους ζώνης που αιτούνται για κάθε επανάληψη  $s$ , μια κλήση υπηρεσίας  $k$  θα γίνει δεκτή όταν ισχύει:

$$C - b_{krs-1} < j < C - b_{krs}$$

#### 2.4.4 Αναδρομικός τύπος Kaufman στα μοντέλα Επανάκλησης

##### 2.4.4.1 Τύπος Kaufman στο μοντέλο SRM

Θεωρούμε σύστημα πολυδιάστατης κίνησης χωρητικότητας  $C$  μονάδων εύρους ζώνης το οποίο δέχεται κλήσεις 2 υπηρεσιών κίνησης με απαιτήσεις σε μονάδες εύρους ζώνης  $b_1$  και  $b_2$ , ρυθμό άφιξης  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  και μέσους χρόνους εξυπηρέτησης  $\mu_1^{-1}$  και  $\mu_2^{-1}$  αντίστοιχα. Έστω ότι οι κλήσεις της 1ης κατηγορίας δεν έχουν

παραμέτρους επανάκλησης  $b_{1r} = 0$ , ενώ για αυτές της 2<sup>ης</sup> κατηγορίας έχουμε  $b_{2r}$  και  $\mu_{2r}^{-1}$ .

Έχουμε την αναδρομική σχέση [13]:

$$a_k q(j - b_k) = y_k(j) q(j) \quad \text{για } j = 1, \dots, C \text{ και } k = 1, 2 \quad (2.21)$$

όπου  $q(j)$  η πιθανότητα  $j$  γραμμές να είναι κατειλημμένες,  $a_k$  το προσφερόμενο φορτίο κίνησης υπηρεσίας  $k$  στο σύστημα και  $y_k$  το μέσο πλήθος των κλήσεων υπηρεσίας  $k$ .

Εάν για τις γραμμές  $j$  του συστήματος ισχύει  $j \leq C - b_2$  η κλήση της υπηρεσίας 2 θα γίνει δεκτή, στην περίπτωση όμως που ισχύει  $j > C - b_2$  η κλήση θα απορριφθεί και πραγματοποιεί επανάκληση με νέες απαιτήσεις  $b_{2r}$  ώστε τώρα να ισχύει  $j \leq C - b_{2r}$ . Λόγω του ότι  $a_k = \lambda_k / \mu_k$  η (2.21) γίνεται:

$$\lambda_2 q(j - b_{2r}) = y_{2r}(j) \mu_{2r} q(j) \quad (2.22)$$

με  $j - b_{2r} > C - b_2$ .

Έπειτα διαιρούμε με  $\mu_{2r}$  και πολλαπλασιάζουμε με  $b_{2r}$ :

$$a_{2r} q(j - b_{2r}) = y_{2r}(j) b_{2r} q(j) \quad (2.23)$$

με  $C \geq j \geq C - (b_2 - b_{2r})$  και  $a_{2r} = \lambda_2 / \mu_{2r}$  το προσφερόμενο φορτίο κίνησης της 2<sup>ης</sup> υπηρεσίας.

Πολλαπλασιάζοντας την (2.21) με  $b_k$  θα πάρουμε:

$$a_k b_k q(j - b_k) = y_k(j) q(j) b_k$$

Για 2 υπηρεσίες κίνησης θα έχουμε:

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) = y_1(j) q(j) b_1 + y_2(j) q(j) b_2 \quad \text{για } j = 1, 2, \dots, C \quad (2.24)$$

Αν προσθέσω τις δυο τελευταίες σχέσεις:

$$\begin{aligned} a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) + a_{2r} b_{2r} q(j - b_{2r}) \\ = y_1(j) q(j) b_1 + y_2(j) q(j) b_2 + y_{2r}(j) q(j) b_{2r} \end{aligned}$$

και λόγω της  $y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2 + y_{2r}(j) b_{2r} = j$  τελικά προκύπτει:

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) + a_{2r} b_{2r} q(j - b_{2r}) = j q(j) \quad (2.25)$$

όπου  $C \geq j \geq C - (b_2 - b_{2r})$

$$\text{Επιπλέον έχουμε } y_1(j) b_1 + y_2(j) b_2 = 1 \text{ όταν } j = 1, 2, \dots, C - (b_2 - b_{2r}) \quad (2.26)$$

Το κατειλημμένο εύρος ζώνης  $y_{2r}$  από τις επαναλαμβανόμενες κλήσεις είναι αμελητέο συγκριτικά με την  $y_1(j)b_1 + y_2(j)b_2$  στο διάστημα  $1 \leq j \leq C - (b_2 - b_{2r})$ , όταν δηλαδή η πληρότητα είναι μικρότερη ή ίση με το όριο επανάληψης. Σύμφωνα με [16], στην περίπτωση αυτή κάνουμε λόγω για την Προσέγγιση Μετανάστευσης (Migration Approximation) και η (2.24) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$a_1 b_1 q(j - b_1) + a_2 b_2 q(j - b_2) = j q(j) \quad (2.27)$$

Βασιζόμενοι στις παραπάνω προσεγγίσεις οδηγούμαστε στον παρακάτω απλό αναδρομικό τύπο:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} [\sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K a_{kr} b_{kr} \gamma_k(j) q(j - b_{kr})] & \\ 0 & \text{άλλο} \end{cases} \quad (2.28)$$

με  $a_{kr} = \lambda_k \mu_{kr}^{-1}$  και  $\gamma_k(j) = 1$  όταν  $j > C - (b_k - b_{kr})$  διαφορετικά  $\gamma_k(j) = 0$ .

Επίσης οι  $q(j)$  αποτελούν μη κανονικοποιημένες πιθανότητες και  $q(j) = 1$  όταν  $j = 0$ . Για να κανονικοποιήσω διαιρώ κάθε  $q(j)$  με  $\sum_{j=0}^C q(j)$ , και η πιθανότητα απώλειας κλήσεων υπηρεσίας  $k$  και εύρος ζώνης  $b_k$  υπολογίζεται από:

$$P'_{b_k} = \frac{q(j)}{\sum_{j=C-b_k+1}^C q(j)} \quad (2.29)$$

Ενώ η πιθανότητα απώλειας κλήσεων υπηρεσίας  $k$  και εύρος ζώνης  $b_{kr}$ :

$$P_{b_k} = \frac{q(j)}{\sum_{j=C-b_{kr}+1}^C q(j)} \quad (2.30)$$

Η δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης εύρους ζώνης  $b_{kr}$  η οποία έχει αρχικά απορριφθεί με εύρος ζώνης  $b_k$  είναι:

$$P_{b_{kr}} = \frac{P_{b_k}}{P'_{b_k}} \quad (2.31)$$

#### 2.4.4.2 Εφαρμογή της πολιτικής Εύρους Ζώνης στο μοντέλο SRM με τον Αναδρομικό Τύπο του Kaufman

##### Παράδειγμα 2.2

Σε σύστημα SRM χωρητικότητας  $C = 6$ , 2 κατηγορίες κίνησης απαιτούν εξυπηρέτηση με εύρος ζώνης  $b_1 = 1$  και  $b_2 = 4$  αντίστοιχα. Για την 2<sup>η</sup> υπηρεσία ισχύει ότι εάν δεν καταφέρει να εξυπηρετηθεί ζητά να ξαναπροσπαθήσει με μικρότερο εύρος ζώνης αυτή τη φορά  $b_2 = 3$ . Για τους ρυθμούς άφιξης ισχύει  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$  και για τους ρυθμούς εξυπηρέτησης  $\mu_1 = \mu_2 = 1$ , ενώ οι χρόνοι εξυπηρέτησης των κλήσεων της 2<sup>ης</sup> υπηρεσίας είναι  $\mu_1^{-1}, \mu_2^{-1}$  αντίστοιχα ώστε να ισχύει:



$$b_2\mu_2^{-1} = b_{2r}\mu_{2r}^{-1} = \text{const}, \mu_{2r}^{-1} = \frac{b_2}{b_{2r}}\mu_2^{-1} = 4/3 \text{ άρα } \mu_{2r} = 3/4.$$

Εφαρμόζοντας τον τύπο του Kaufman οι πιθανότητες των κατελιγμένων γραμμών  $q(j)$  καθώς και οι κανονικοποιημένες πιθανότητες  $q'(j)$  είναι:

$$q(0) = 1$$

$$1 * q(1) = a_1 b_1 q(1 - b_1) + a_2 b_2 q(1 - b_2) = 1 * q(0) + 0 \Rightarrow q(1) = 1$$

$$2 * q(2) = a_1 b_1 q(2 - b_1) + a_2 b_2 q(2 - b_2) = 1 * q(1) + 0 \Rightarrow q(2) = 1/2 = 0,5$$

$$3 * q(3) = a_1 b_1 q(3 - b_1) + a_2 b_2 q(3 - b_2) = 1 * q(2) + 0 \Rightarrow q(3) = 0,5/3 \\ = 0,1666$$

$$4 * q(4) = a_1 b_1 q(4 - b_1) + a_2 b_2 q(4 - b_2) = 1 * q(3) + 4 * q(0) \Rightarrow q(4) \\ = 4,1666/4 = 1,04165$$

$$5 * q(5) = a_1 b_1 q(5 - b_1) + a_2 b_2 q(5 - b_2) = 1 * q(4) + 4 * q(1) \Rightarrow q(5) \\ = 5,04165/5 = 1,00833$$

$$6 * q(6) = a_1 b_1 q(6 - b_1) + a_2 b_2 q(6 - b_2) + a_{2r} b_{2r} q(6 - b_{2r}) \\ = 1 * q(5) + 4 * q(2) + 3 * q(3) \Rightarrow q(6) = 3,50813/6 = 0,5846$$

Για την εύρεση των  $q'(j)$  κανονικοποιούμε τις πιθανότητες διαιρώντας με το  $G$  που προκύπτει ως εξής:

$$G = \sum_{j=0}^6 q(j) = 1 + 1 + 0,5 + 0,1666 + 1,04165 + 1,00833 + 0,5846 = 5,301$$

Οι πιθανότητες απώλειας κλήσης  $P_{b_1}, P_{b_2}, P_{b_{2r}}$  είναι:

$$j > C - b_1 \Rightarrow j > 5 \Rightarrow P_{b_1} = q(6)/G = 0,5846/5,301 = 0,1102$$

$$j > C - b_2 \Rightarrow j > 2 \Rightarrow P_{b_2} = (q(3) + q(4) + q(5) + q(6))/G = 2,8011/5,301 \\ = 0,5284$$

$$j > C - b_{2r} \Rightarrow j > 3 \Rightarrow P_{b_{2r}} = (q(4) + q(5) + q(6))/G = 2,63458/5,301 \\ = 0,49699$$

#### 2.4.4.3 Τύπος Kaufman στο μοντέλο MRM

Στο κεφάλαιο 2.4.2 αναλύθηκε περιγραφικά ο μηχανισμός του μοντέλου Πολλαπλών Επανακλήσεων MRM. Έχοντας λοιπόν στο σύστημα  $S(k)$  επανακλήσεις υπηρεσίας  $k$

και  $b_k > b_{kr1} > \dots > b_{krs} > \dots > b_{krs(k)}$  με  $b_{krs}$  οι απαιτήσεις σε μονάδες χωρητικότητας της σεπανάληψης, η κλήση θα γίνει δεκτή στο σύστημα εάν ισχύει:  $C - b_{krs-1} < j < C - b_{krs}$ . Βασίζομενοι στην ανάλυση που προηγήθηκε για το μοντέλο Απλής Επανάκλησης SRM, οαναδρομικός προσεγγιστικός τύπος για το MRM θα είναι ο εξής:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \left[ \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S(k)} a_{krs} b_{krs} \gamma_{ks}(j) q(j - b_{krs}) \right] & \\ 0, & \text{άλλο} \end{cases} \quad (2.32)$$

με  $a_{krs} = \lambda_k \mu_{krs}^{-1}$ ,  $\gamma_{ks}(j) = 1$  για  $j > C - (b_{krs-1} - b_{krs})$  αλλιώς  $\gamma_{ks}(j) = 0$ .

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι  $q(j)$  αποτελούν μη κανονικοποιημένες πιθανότητες, όπου θέτοντας  $G = \sum_{j=0}^C q(j)$  εύκολα υπολογίζονται οι κανονικοποιημένες πιθανότητες  $q'(j): q'(j) = \frac{q(j)}{G}$ .

Επομένως, η πιθανότητα απώλειας κλήσης υπηρεσίας  $k$  με τελικές απαιτήσεις σε μονάδες χωρητικότητας  $b_{krs(k)}$  είναι:

$$P_{b_k} = \sum_{j=C-b_{krs(k)+1}}^C G^{-1} q(j) \quad (2.33)$$

Η δεσμευμένη πιθανότητα απώλειας κλήσης εύρους ζώνης  $b_{krs}$  η οποία έχει αρχικά απορριφθεί με εύρος ζώνης  $b_{krs-1}$  είναι:

$$P_{b_{krs}} = \frac{\sum_{j=C-b_{krs+1}}^C q(j)}{\sum_{j=C-b_{krs-1}+1}^C q(j)} \quad (2.34)$$

#### 2.4.4.4 Εφαρμογή της πολιτικής Εύρους Ζώνης στο μοντέλο MRM με τον Αναδρομικό τύπο του Kaufman

##### Παράδειγμα 2.3

Σε σύστημα SRM χωρητικότητας  $C = 4$ , 2 κατηγορίες κίνησης απαιτούν εξυπηρέτηση με εύρος ζώνης  $b_1 = 1$  και  $b_2 = 3$  αντίστοιχα, με την 2<sup>η</sup> υπηρεσία να έχει τη δυνατότητα επαναπροσπάθειας με νέες απαιτήσεις  $b_{2r1} = 2$  και εφόσον δεν εξυπηρετηθεί ξανά να προσπαθήσει με ακόμα μικρότερες μονάδες απαιτήσεων  $b_{2r1} = 1$ . Για τους ρυθμούς άφιξης ισχύει  $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$  και για τους ρυθμούς εξυπηρέτησης  $\mu_1 = \mu_2 = 1, \mu_{2r1} = 0.5, \mu_{2r2} = 1$  και  $a_{2r1} = 2, a_{2r2} = 4$  [4].

Εφαρμόζοντας τον αναδρομικό τύπο (2.32) παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα για τις πιθανότητες  $q(j)$  των κατελιημένων γραμμών του συστήματος:

$$q(j) = \frac{1}{j} \left[ \sum_{k=1}^K a_k b_k q(j - b_k) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S(k)} a_{krs} b_{krs} \gamma_{ks}(j) q(j - b_{krs}) \right]$$

όπου  $a_{krs} = \lambda \mu_{krs}^{-1}$ ,  $\gamma_{ks}(j) = 1$  για  $j > C - (b_{kr_{s-1}} - b_{krs})$  αλλιώς  $\gamma_{ks}(j) = 0$ .

Επομένως,  $\gamma_{21}(j) = 1$  για  $j > 4 - 3 + 2 \Rightarrow j > 3$  και  $\gamma_{22}(j) = 1$  για  $j > 4 - 2 + 1 \Rightarrow j > 3$ . Και προκύπτει:

$$q(0) = 1$$

$$1 * q(1) = a_1 b_1 q(1 - b_1) + a_2 b_2 q(1 - b_2) = 1 * 1 * q(0) + 1 * 3 * q(-2) \Rightarrow q(1) = 1$$

$$2 * q(2) = a_1 b_1 q(2 - b_1) + a_2 b_2 q(2 - b_2) = 1 * q(1) + 1 * 3 * q(-1) \Rightarrow q(2) = \frac{1}{2} = 0,5$$

$$3 * q(3) = a_1 b_1 q(3 - b_1) + a_2 b_2 q(3 - b_2) = 1 * 1 * q(2) + 1 * 3 * q(0) \Rightarrow q(3) = \frac{3,5}{3} = 1,16667$$

$$\begin{aligned} 4 * q(4) &= a_1 b_1 q(4 - b_1) + a_2 b_2 q(4 - b_2) + a_{2r1} b_{2r1} q(4 - b_{2r1}) \\ &\quad + a_{2r2} b_{2r2} q(4 - b_{2r2}) \\ &= 1 * 1 * q(3) + 1 * 3 * q(1) + 2 * 2 * q(2) + 4 * 1 * q(3) \Rightarrow q(4) \\ &= \frac{10,83335}{4} = 2,7083375 \end{aligned}$$

Έπειτα υπολογίζουμε το άθροισμα με:

$$G = \sum_{j=0}^C q(j) = 1 + 1 + 0,5 + 1,16667 + 2,7083375 = 6,3750075.$$

Με την κανονικοποίηση των πιθανοτήτων  $q(j)$  έχουμε:

$$q(0) = \frac{q(0)}{G} = \frac{1}{6,3750075} = 0,15686256$$

$$q(1) = \frac{q(1)}{G} = \frac{1}{6,3750075} = 0,15686256$$

$$q(2) = \frac{q(2)}{G} = \frac{0,5}{6,3750075} = 0,07843128$$

$$q(3) = \frac{q(3)}{G} = \frac{1,16667}{6,3750075} = 0,183006843$$

$$q(4) = \frac{q(4)}{G} = \frac{2,7083375}{6,3750075} = 0,424836755$$

Έτσι προκύπτουν οι παρακάτω πιθανότητες απώλειας κλήσης:

$$P_{b_1} = \sum_{j=C-b_1+1}^C q'(j) = \sum_{j=4}^4 q'(j) = 0,424836755$$

$$P_{b_2} = \sum_{j=C-b_2+1}^C q'(j) = \sum_{j=2}^4 q'(j) = q'(2) + q'(3) + q'(4)$$

$$= 0,07843128 + 0,183006843 + 0,424836755 = 0,683274878$$

$$P_{b_{2r1}} = \sum_{j=C-b_{2r1}+1}^C q'(j) = \sum_{j=3}^4 q'(j) = q'(3) + q'(4) = 0,183006843 + 0,424836755$$

$$= 0,607843598$$

$$P_{b_{2r2}} = \sum_{j=C-b_{2r2}+1}^C q'(j) = \sum_{j=4}^4 q'(j) = q'(4) = 0,424836755$$



## Κεφάλαιο 3. Εφαρμογή του Μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης στην Αρχιτεκτονική C-RAN 5<sup>ης</sup> Γενιάς

### 3.1 Εισαγωγή

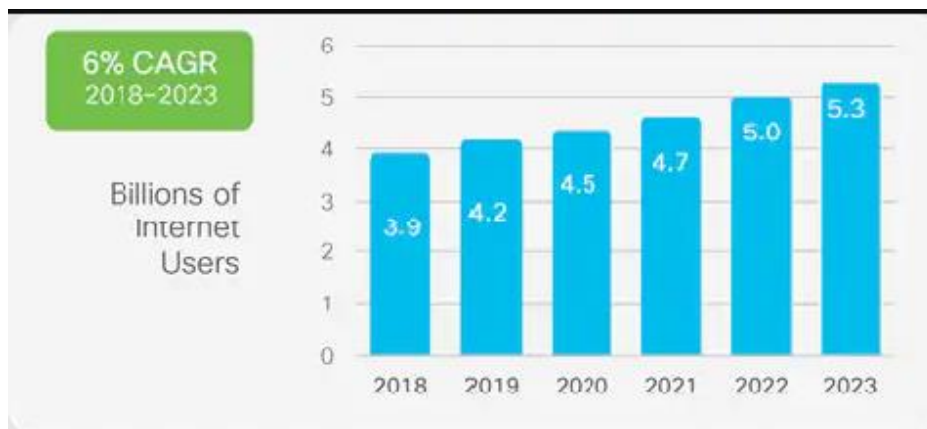
Η βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών τα τελευταία χρόνια έχει έρθει αντιμέτωπη με μια ραγδαία αύξηση της τηλεπικοινωνιακής κίνησης η οποία αναμένεται να πολλαπλασιαστεί με ακόμα υψηλότερους ρυθμούς και τα επόμενα χρόνια. Η πρόοδος της τεχνολογίας IoT έχει δημιουργήσει την ανάγκη για ένα δίκτυο ικανό να διασυνδέσει ποικίλα είδη συσκευών που μπορούν να επικοινωνούν μέσω Διαδικτύου για διάφορες υπηρεσίες, ή με σκοπό την ανταλλαγή πληροφοριών με άλλες συσκευές. Έτσι, η τεχνολογία του IoT παράλληλα με τις ολοένα και αυξανόμενες σε αριθμό και απαιτήσεις έξυπνες συσκευές (smart devices), έχουν δημιουργήσει μεγάλο όγκο δεδομένων επιβαρύνοντας, έτσι, τα ήδη υπάρχοντα ασύρματα δίκτυα [17]. Ασύρματες εφαρμογές του διαδικτύου όπως τηλεδιασκέψεις, videostreaming και διαδικτυακά παιχνίδια διεκδικούν μεγάλο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης του δικτύου, δημιουργώντας έτσι πολλά προβλήματα στις επικοινωνίες κινητής τηλεφωνίας σε ότι αφορά το κομμάτι των απαιτήσεων.

Σύμφωνα με τη CISCO ο συνολικός αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας, σε παγκόσμιο επίπεδο, πρόκειται να αυξηθεί από 5,3 δισεκατομμύρια το 2020 έως 5,7 δισεκατομμύρια το 2023, αντιπροσωπεύοντας το 71% του συνολικού πληθυσμού (Σχήμα 3.1). Παράλληλα, η μέση τιμή της τηλεπικοινωνιακής κίνησης που παράγεται από τα smartphones αναμένεται να φτάσει τα 11 GB ανά μήνα, σχεδόν τέσσερις φορές μεγαλύτερη αύξηση συγκριτικά με την τιμή του 2017 [18].

Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές δικτύων κινητής τηλεφωνίας όμως, δεν είναι ικανές να διαχειριστούν αυτές τις εξαιρετικά μεγάλες τιμές της τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Αντιθέτως, ο μόνος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό σε τέτοιου είδους αρχιτεκτονικές είναι η επένδυση των φορέων κινητών επικοινωνιών στις μονάδες υποδομής, αυξάνοντας δηλαδή τον αριθμό των σταθμών βάσεων του δικτύου, δημιουργώντας όμως πιο περίπλοκη δομή στα δίκτυα. Προκειμένου να γίνει αυτό, οι διαχειριστές δικτύων κινητής τηλεφωνίας αιτούνται να επιφέρουν εξαιρετικά υψηλές λειτουργικές δαπάνες (OPEX) για την διασφάλιση τοποθεσίας εγκατάστασης, σχεδιασμού και λειτουργίας των σταθμών βάσης καθώς και κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) για την συντήρηση και παροχή ενέργειας των νέων αλλά και ήδη υπαρχόντων σταθμών [17]. Επιπλέον, λόγω της δυναμικότητας του φορτίου κίνησης των χρηστών καθώς και της αρχιτεκτονικής των παραδοσιακών RAN δικτύων παρατηρείται υπερφόρτωση ορισμένων σταθμών βάσης, άσκοπη λειτουργία τους κατά τη διάρκεια ωρών χαμηλής κινητικότητας, ενώ άλλοι δεν χρησιμοποιούνται καθόλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα

την απρόσκοπτη και κακή διαχείριση των σταθμών βάσης που οδηγεί τις εταιρίες κινητής τηλεφωνίας σε οικονομικά αδιέξοδα. Παράλληλα, όσο τα μέσα έσοδα ανά χρήστη (Average revenue per user – ARPU), τα οποία ορίζονται ως τα συνολικά έσοδα κατανάλωσης διαιρούμενα με τον αριθμό των συνδρομητών, παραμένουν σταθερά ή μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, οι ανάγκες των χρηστών σε δεδομένα αυξάνονται ενώ οι ίδιοι αναμένουν την μείωση του κόστους για τη χρήση των δεδομένων αυτών [9].

Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι τα παραδοσιακά δίκτυα RAN, ακολουθώντας τέτοια πορεία πρόκειται να γίνουν ιδιαίτερα δαπανηρά, χάνοντας τη δυνατότητα να διατηρήσουν την ανταγωνιστικότητά τους μελλοντικά. Έτσι, οι φορείς κινητών επικοινωνιών ήρθαν αντιμέτωποι με μια πρόκληση σχεδιασμού νέας αρχιτεκτονικής, η οποία όχι μόνο να αποτρέπει όλα τα παραπάνω αλλά και να δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας καινοτόμων εφαρμογών και υπηρεσιών των δικτύων οι οποίες θα βελτιώσουν την ποιότητα εξυπηρέτησης των χρηστών (QoS) και ταυτόχρονα θα επιφέρουν νέα έσοδα.



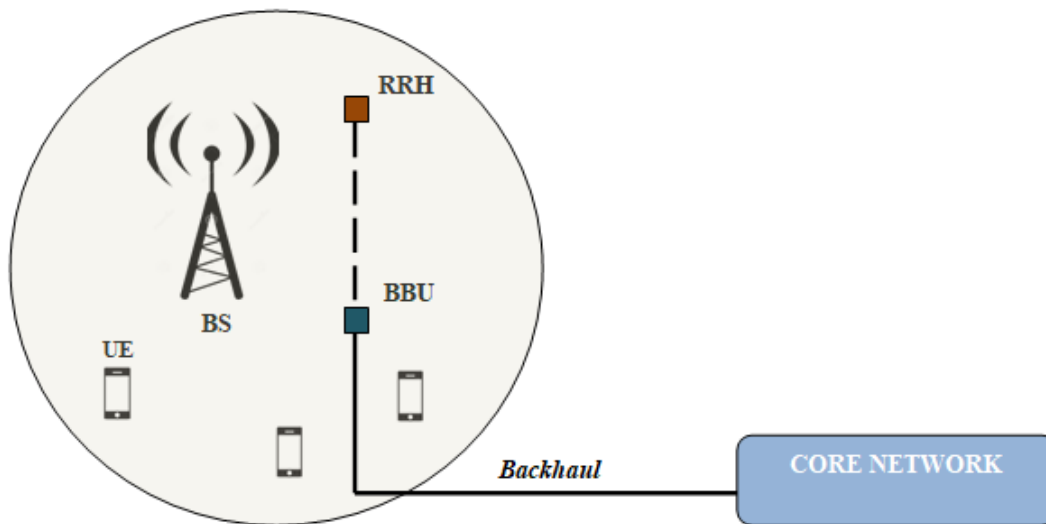
Σχήμα 3.1: Απεικόνιση της αύξησης του αριθμού των χρηστών Διαδικτύου έως το 2023[2]

## 3.2 C-RAN σε δίκτυα 5<sup>ης</sup> Γενιάς

### 3.2.1 Παραδοσιακές αρχιτεκτονικές

Στις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές οι λειτουργίες ραδιοσυχνότητας και επεξεργασίας baseband ενσωματώνονται σε ένα κοινό σταθμό βάσης με το RemoteRadio Head (RRH) ή Remote Radio Unit (RRU) και το Baseband Unit (BBU) αντίστοιχα (Σχήμα 3.2). Κάθε cell tower site απαιτεί το δικό της αποκλειστικό BBU και RRH μαζί με την αντίστοιχη λειτουργικότητα ψύξης και δρομολόγησης. Τα RRU τοποθετούνται στην κορυφή του tower ενώ τα BBU σε τοποθεσία πολύ κοντά στην κεραία. Έτσι, τα δίκτυα RAN αποτελούνται από πολλούς αυτόνομους σταθμούς βάσης όπου ο καθένας καλύπτει μια μικρή περιοχή. Η δομή αυτή των παραδοσιακών δικτύων καθιστά

αδύνατη τη φιλοξενία τόσο διαφορετικών υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και μοτίβων κυκλοφορίας των υψηλών σε συχνότητα σταθμών βάσης της τεχνολογίας του 5G. Το C-RAN όμως, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία υπολογιστικής νέφους, cloud computing, θεωρείται ως πολλά υποσχόμενη αρχιτεκτονική για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, αφού καθίσταται ικανή να αποδώσει στο δίκτυο την απαραίτητη ευελιξία και να κυριαρχήσει στην νέα γενιά του 5G.



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση παραδοσιακής αρχιτεκτονικής RAN

### 3.2.2 Εισαγωγή στο C-RAN

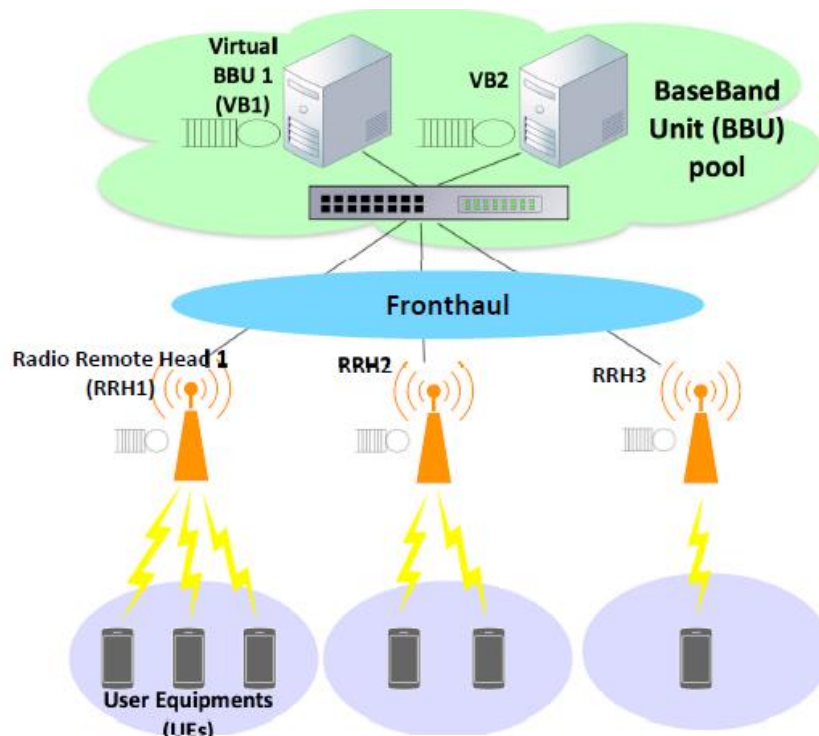
Έννοιες όπως η υπολογιστική νέφος (cloud computing) και η εικονικοποίηση (virtualization) θεωρούνται ύψιστης σημασίας για τη διαμόρφωση των νέων τεχνολογιών του RAN. Το cloud computing επιτρέπει την άμεση πρόσβαση, έπειτα από απαίτηση, σε κοινόχρηστο σύνολο υπολογιστικών πόρων, ενώ η εικονικοποίηση πραγματοποιείται μέσω δύο συμπληρωματικών τεχνολογιών, του SDN και του NFV. Το SDN ενεργοποιεί τον διαχωρισμό χρήστη / ελέγχου, ενώ το NFV την εικονικοποίηση των λειτουργιών BS και την συνύπαρξη καθεστώτων πρόσβασης πολλαπλών καναλιών.

Το C-RAN αποτελεί μια καινοτόμα τεχνολογία του RAN οι οποία βασίζεται στις έννοιες του SDN και NFV. Η βασική ιδέα της αρχιτεκτονικής αυτής είναι η συγκέντρωση διαφορετικών πόρων επεξεργασίας σε ένα κοινό cloud ώστε οι πόροι αυτοί να κατανέμονται και να διαχειρίζονται δυναμικά κατά απαίτηση του διαχειριστή. Η λειτουργία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του κόστους ανάπτυξης και διαχείρισης, την ορθή εκμετάλλευση των πόρων, την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας καθώς και τη μείωση των παρεμβολών στο δίκτυο [19].



### 3.2.3 Αρχιτεκτονική της C-RAN

Η ιδέα της αρχιτεκτονικής C-RAN παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από το China Mobile Research Institute τον Απρίλιο του 2010. Η εφαρμογή της βασίζεται σε τεχνολογίες συγκεντρωτισμού (centralization) και εικονικοποίησης (virtualization), με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής λειτουργίας του δικτύου. Η αρχιτεκτονική C-RAN, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.3, αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: τα RRHs, τα BBUs και το σύνδεσμο fronthaul (FH). Τα RRHsτα οποία περιλαμβάνουν όλα τα εργαλεία ραδιοσυχνότητας (radiofrequency components) και τις κεραίες του συστήματος, πραγματοποιούν όλες τις απαραίτητες λειτουργίες ραδιοσυχνότητας (RF), την επεξεργασία και διαμόρφωση σήματος, τις μετατροπές του σε ψηφιακό (A/D) και αναλογικό (D/A) αντίστοιχα καθώς και την ενίσχυση ισχύος. Από την άλλη, τα BBUs αποτελούνται από πόρους επεξεργασίας υψηλής απόδοσης παρέχοντας λειτουργικότητα και επικοινωνία με το δίκτυο πυρήνα – Core Network (CN).



Σχήμα 3.3: Απεικόνιση αρχιτεκτονικής C-RAN [20]

Η καινοτομία όμως της C-RAN έγκειται στην εισαγωγή των παραδοσιακών RAN στην ιδέα ενός λειτουργικού διαχωρισμού των RRHs από τα BBUs. Έτσι, τα BBUs συγκεντρώνονται σε μια οντότητα που ονομάζεται BBU pool η οποία τοποθετείται σε ένα κέντρο δεδομένων (Data Center), ενώ τα RRHs κατανομούνται σε απομακρυσμένες περιοχές παρέχοντας κάλυψη και αλληλεπιδρώντας με user equipment (UEs). Προκειμένου να επωφεληθεί από την τεχνολογία NFV που αναφέρθηκε προηγουμένως, η C-RAN ουσιαστικά εικονικοποιεί τη λειτουργία και τις

υπηρεσίες του BBUpool θεωρώντας το Virtualized-BBU (VBBU) pool. Ένα V-BBU pool εξυπηρετεί είτε ένα RRH είτε μια συστάδα από RRHs. Μια τέτοια λειτουργική διάσπαση απαιτεί αυτά τα δύο στοιχεία να συνδεθούν μέσω ενός δικτύου υψηλής ταχύτητας χαμηλού λανθάνοντος χρόνου και ακριβούς συγχρονισμού, του λεγόμενου fronthaul. Το fronthaul αποτελεί ουσιαστικά ένα οπτικό δίκτυο που μεταφέρει το μη επεξεργασμένο σήμα από τις κεραίες και τα RRHs στο BBUpool μέσω της διεπαφής Common Public Radio Interface (CPRI). Η πλειοψηφία των λειτουργιών επεξεργασίας εκτελούνται στο BBUpool, επομένως η δομή και λειτουργία των RRHs θεωρείται σχετικά απλή με αποτέλεσμα η ανάπτυξη και συντήρησή τους να είναι επιτεύξιμη με έναν ιδιαίτερα οικονομικά αποδοτικό τρόπο.

### 3.2.4 Χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα της C-RAN

Το Cloud Radio Access Network λοιπόν, έχει συστηθεί ως μια αποτελεσματική αρχιτεκτονική για την ικανοποίηση των απαιτήσεων της ταχέως αναπτυσσόμενης τηλεπικοινωνιακής κίνησης. Τα πλεονεκτήματά της είναι πολλά και σίγουρα προσοδοφόρα, αφού σύμφωνα με την [21] φαίνεται να αποφέρει σημαντικές μειώσεις τόσο σε OPEX όσο και σε CAPEX εξαιτίας της μείωσης στο κόστος αναβάθμισης και συντήρησης. Τα πλεονεκτήματα αυτά εντοπίζονται κυρίως στην προσαρμοστικότητα και ευελιξία του δικτύου στις διάφορες μορφές κίνησης, την εξοικονόμηση ενέργειας και δαπανών, την αύξηση της απόδοσης σε συνδυασμό με την μείωση των καθυστερήσεων και τέλος την διευκόλυνση συντήρησης και αναβάθμισης του δικτύου.

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί η διευκόλυνση εφαρμογής προηγμένων τεχνολογιών μέσω της αρχιτεκτονικής C-RAN, που οδηγεί στη βελτίωση των επιδόσεων του συστήματος. Η ορθή λειτουργία της κοινής τοποθεσίας cloud του BBU-pool, προαπαιτεί ένα δίκτυο διασύνδεσης υψηλού εύρους ζώνης και χαμηλών καθυστερήσεων. Ο μηχανισμός αυτός δικτύου πραγματοποιεί διασυνδέσεις διαφορετικών υπολογιστικών κόμβων και διευκολύνει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, τεχνολογίες που δύσκολα μπορούν να εφαρμοστούν στις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές, καθίστανται βιώσιμες σε C-RAN περιβάλλοντα.

Οι παραδοσιακές αρχιτεκτονικές είναι σχεδιασμένες ώστε να εξυπηρετούν κατά τη διάρκεια της μέγιστης κίνησης (peak traffic), δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στον ρυθμό χρησιμοποίησης (utilization rate). Στο BBU-pool του C-RAN όμως, η συγκέντρωση των πόρων μέσω του cloudification επιτρέπει στο BBU cloud να προσαρμόζεται δυναμικά ανάλογα την κίνηση που έχει να διαχειριστεί που έχει ως συνέπεια την αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων και την αύξηση της αποτελεσματικότητας του δικτύου [19]. Παράλληλα, η εξισορρόπηση του φορτίου κίνησης καθορίζεται από την ανάθεσή του στις κατάλληλες μονάδες πόρων του BBU-pool καθώς και από τη δυνατότητα εναλλαγής των χρηστών χωρίς περιορισμούς εφόσον το BBU-pool έχει την ικανότητα υποστήριξής τους.

Σύμφωνα με την [9], το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας των δικτύων καταναλώνεται από ενισχυτές ισχύος που τροφοδοτούν τα RRHs και BBUs με ενέργεια και

κλιματισμό, αντιστοιχίζοντας τις δαπάνες σε ηλεκτρικό ρεύμα στο 41% του OPEX. Η χρήση της αρχιτεκτονικής C-RAN όμως, επιφέρει σημαντική μείωση στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και κατά συνέπεια στις συνολικές δαπάνες καθώς ο αριθμός των BBUs σε ένα τέτοιο δίκτυο είναι φανερά μειωμένος συγκριτικά με ένα παραδοσιακό RAN. Αυτό φυσικά επιτυγχάνεται λόγω της εφαρμογής του cloud computing και του virtualization. Έτσι, κατά τη διάρκεια χαμηλής κινητικότητας στο δίκτυο ορισμένα BBUs του cloud λειτουργώντας ως εικονικά BBUs (VBBUs) μπορούν να απενεργοποιηθούν χωρίς αυτό να επηρεάσει τη συνολική κάλυψη του δικτύου. Αυτό έχει ως συνέπεια και την μείωση των πόρων ψύξης, που καταλαμβάνει το σημαντικό ποσοστό του 46% της ενεργειακής κατανάλωσης. Αντίστοιχη μείωση στην κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με την υποδομή της ψύξης οφείλεται και στην κοινή χρήση των υπολογιστικών πόρων των BBUs, λόγω της τεχνολογίας του cloud computing. Επιπλέον, στη C-RAN γίνεται χρήση φθηνότερων υλικών συγκριτικά με αυτά των παραδοσιακών συμβατικών σταθμών βάσης, γεγονός που οδηγεί και σε ευκολότερη συντήρηση του δικτύου.

Ένα δίκτυο C-RAN έχει τη δυνατότητα μεγαλύτερης κάλυψης και εξυπηρετεί περισσότερους χρήστες συγκριτικά με δίκτυα που διαθέτουν τους παραδοσιακούς BSs. Τα BBUs μπορούν εύκολα να αναβαθμιστούν αλλά και να προστεθούν νέα, βελτιώνοντας έτσι την επεκτασιμότητα του δικτύου. Αυτό δίνει την ευκαιρία μετακίνησης υπηρεσιών ή ακόμα και ανάπτυξης νέων στο δίκτυο με συνέπεια την βελτίωση του QoS.

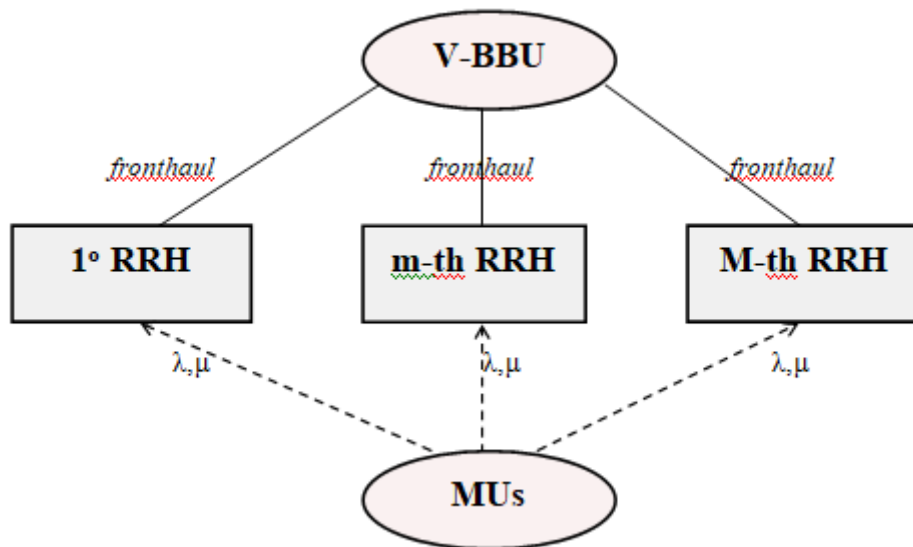
### 3.3 Εφαρμογή του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης σε δίκτυο C-RAN

#### 3.3.1 Περιγραφή και σκοπός του μοντέλου EMLM

Στο σημείο αυτό πρόκειται να αναλύσουμε την εφαρμογή του μοντέλου πολυδιάστατης κίνησης, το οποίο και είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε δίκτυο αρχιτεκτονικής C-RAN. Αρχικά, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 3.4, θεωρούμε δίκτυο C-RAN όπου τα RRHs βρίσκονται χωριστά από τους εξυπηρετητές επεξεργασίας σήματος Baseband Units (BBUs), οι οποίοι σχηματίζουν ένα κεντρικό cloud, το BBU-pool. Το BBU-pool που ουσιαστικά θεωρούμε ότι απαρτίζεται από εικονικοποιημένους virtualized πόρους (V-BBU), συνδέεται με τα RRHs μέσω του fronthaul. Ο συνολικός αριθμός των RRHs είναι  $M$  όπου κάθε RRH διαθέτει  $C$  μονάδες τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας οι οποίες δεσμεύονται από τις κλήσεις που γίνονται αποδεκτές από το σύστημα. Το V-BBU αποτελείται από  $T$  μονάδες υπολογιστικής χωρητικότητας.

Το σύστημά μας υποστηρίζει κλήσεις  $K$  κατηγοριών υπηρεσίας οι οποίες φθάνουν σύμφωνα με τη διαδικασία Poisson, με ρυθμό  $\lambda_k$ . Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούμε πολιτική πλήρους διάθεσης σύμφωνα με την οποία, όπως ήδη έχει αναλυθεί, μια κλήση κατηγορίας  $k$  που εισέρχεται στο σύστημα θα εξυπηρετηθεί εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες μονάδες χωρητικότητας τουλάχιστον ίσες με τις απαιτήσεις της, αλλιώς μπλοκάρεται και χάνεται. Στην προκειμένη περίπτωση της

αρχιτεκτονικής C-RAN, ο διαχωρισμός των RRHs από τα BBUs οδηγεί στην ανάγκη ύπαρξης διαθέσιμων μονάδων τόσο τηλεπικοινωνιακής  $b_{km}$  όσο και υπολογιστικής χωρητικότητας  $d_{km}$ . Επομένως, κατά την εγκαθίδρυση μίας κλήσης, απαιτείται να υπάρχουν διαθέσιμοι τηλεπικοινωνιακοί πόροι στην RRH, και ταυτόχρονα διαθέσιμοι υπολογιστικοί πόροι στο BBU. Έτσι, εφόσον οι απαιτούμενοι πόροι είναι διαθέσιμοι και η κλήση κατηγορίας  $k$  γίνει δεκτή η μέση τιμή του χρόνου εξυπηρέτησής της είναι  $\mu_k^{-1}$  (εκθετικά καταναμημένος).



Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση δικτύου της προτεινόμενης μελέτης.

Για την βέλτιστη αξιολόγηση της αρχιτεκτονικής C-RAN καθώς και της εφαρμογής του μοντέλου πολυδιάστατης κίνησης, επανάκλησης και πολλαπλών επανακλήσεων που αναλύσαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο σε αυτή, θα χρησιμοποιήσουμε την τον υπολογισμό της πιθανότητας αποκλεισμού – Call Blocking Probability (CBP) ως μηχανισμό μέτρησης απόδοσης και QoS. Έτσι λοιπόν, στόχος μας είναι ο υπολογισμός της πιθανότητας αποκλεισμού μιας κλήσης υπηρεσίας  $k$ , τιμή της οποίας εξαρτάται τόσο από τη διαθεσιμότητα πόρων των RRHs όσο και του V-BBU. Γνωρίζοντας ότι στο V-BBU φθάνουν αιτήσεις κλήσεων από όλες τις κεραίες τις οποίες πρέπει να αθροίσουμε, αρχικά πρέπει να υπολογίσουμε τις πιθανότητες αποκλεισμού λόγω μη διαθεσιμότητας τηλεπικοινωνιακών και παράλληλα υπολογιστικών πόρων. Έπειτα, το γινόμενο των δυο αυτών πιθανοτήτων θα μας δώσει την συνολική πιθανότητα απώλειας κλήσης. Εξετάζουμε τις περιπτώσεις για κάθε υπηρεσία κλήσης άλλα και για κάθε κεραία.

### 3.3.2 Μαθηματική ανάλυση του μοντέλου EMLM σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN

Αφού ορίσουμε τον αριθμό των κλήσεων υπηρεσίας  $k$  κεραίας  $m$  ως  $n_{km}$ , έχουμε  $\vec{n} = (n_{11}, n_{21}, \dots, n_{12}, n_{KM})$  το διάνυσμα μόνιμης κατάστασης. Το σύστημά μας είναι πλήρους διάθεσης πόρων και το ορίζουμε ως  $\Omega$ . Μία νέα αίτηση σύνδεσης της υπηρεσίας  $k$  γίνεται δεκτή μόνο όταν υπάρχουν διαθέσιμες  $b_{km}$  μονάδες τηλεπικοινωνιακών πόρων στην κεραία, στο πεδίο κάλυψης της οποίας βρίσκεται ο χρήστης, και  $d_{km}$  μονάδες υπολογιστικών πόρων στο BBU, διαφορετικά η αίτηση αυτή φράσσεται και χάνεται. Έτσι προκύπτουν οι εξής περιορισμοί για τις καταστάσεις αποκλεισμού:  $\Omega_{km} = \{n \in \Omega: nb \leq C - b_{km}, nd \leq T - d_{km}\}$ . Η πιθανότητα απώλειας κλήσης υπηρεσίας κίνησης  $k$  κεραίας  $m$  για το σύστημα των RRH σύμφωνα με την (2.6) θα είναι:

$$P_b^{RRH} = 1 - \sum_{n \in \Omega_{km}} P(n) \quad (3.1)$$

Ενώ για αυτό του V-BBU:

$$P_b^{BBU} = 1 - \sum_{n \in \Omega_{km}} P(n) \quad (3.2)$$

Στη συνέχεια, θεωρώντας  $j$  την κατάσταση συστήματος η οποία παίρνει τιμές ακέραιων τιμών στο  $[0, \dots, C]$  και  $[0, \dots, T]$  αντίστοιχα, δηλώνουμε  $q(j)$  την πιθανότητα της κατάστασης  $j$  και για τον υπολογισμό της  $CBPP_b^{RRH}$  και  $P_b^{BBU}$ . Όταν οι κατειλημμένες γραμμές του συστήματος είναι  $j = nb > C - b_{km}$  ή  $j = nd > T - d_{km}$ , τότε παρατηρείται απώλεια των κλήσεων της υπηρεσίας  $k$  και κεραίας  $m$ . Έτσι σύμφωνα και με την (2.11) προκύπτουν:

$$P_b^{RRH} = \sum_{j=C-b_{km}+1}^C q(j) = \sum_{j=0}^{b_{km}-1} q(C-j) \quad \text{και} \quad P_b^{BBU} = \sum_{j=T-b_{km}+1}^T q(j) = \sum_{j=0}^{d_{km}-1} q(T-j)$$

(3.3) και (3.4).

Τελικά, χρησιμοποιώντας τον αναδρομικό τύπο των Kaufman και Roberts για συστήματα δέσμωσης εύρους ζώνης και μέσω της (2.19) για το σύστημά μας προκύπτουν:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_m^M \sum_k^K a_{km} D_{km}(j - b_{km}) q(j - b_{km}) & \text{για } j = 1, \dots, C \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{όπου το } D_{km}(j - b_{km}) = \begin{cases} b_{km} & \text{για } j \leq C - t(k) \\ 0 & \text{για } j > C - t(k) \end{cases} \quad (3.5\alpha)$$

Και πιθανότητα απώλειας κλήσης λόγω μη διαθέσιμων τηλεπικοινωνιακών πόρων:

$$P_b^{RRH} = \sum_{j=0}^{b_{km}+t(k)-1} G^{-1} q(C-j), \quad (3.6)$$

όπου  $G = \sum_{j=0}^C q(j)$  σταθερά κανονικοποίησης.

Αντίστοιχα, η πιθανότητα απώλειας κλήσης λόγω μη διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων θα έχουμε:

$$q(j) = \begin{cases} 1 & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_m^M \sum_{k=1}^K a_{km} D_{km}(j - d_{km}) q(j - d_{km}) & \text{για } j = 1, \dots, T \\ 0 & \text{αλλού} \end{cases} \quad (3.7)$$

όπου το

$$D_{km}(j - d_{km}) = \begin{cases} b_{km} & \text{για } j \leq T - t(k) \\ 0 & \text{για } j > T - t(k) \end{cases} \quad (3.7\alpha)$$

$$P_b^{BBU} = \sum_{j=0}^{d_{km}+t(k)-1} G^{-1} q(T - j), \quad (3.8)$$

όπου  $G = \sum_{j=0}^T q(j)$  σταθερά κανονικοποίησης.

Στόχος μας, όμως, είναι ο υπολογισμός της ολικής πιθανότητας αποκλεισμού υπηρεσίας  $k$  κεραίας  $m$ . Σύμφωνα με τα παραπάνω ο τύπος που θα προκύψει για τον υπολογισμό της τελικής CBP είναι:

$$P_b = (1 - (1 - P_b^{RRH})(1 - P_b^{BBU})) \quad (3.9)$$

όπου  $(1 - P_b^{RRH})$  και  $(1 - P_b^{BBU})$  είναι οι πιθανότητες οικλήσεις υπηρεσίας  $k$  κεραίας  $m$  να γίνουν δεκτές για εξυπηρέτηση στο δίκτυο.

### 3.4 Εφαρμογή μοντέλων Επανάκλησης και Πολλαπλών Επανακλήσεων σε δίκτυο C-RAN

Στο Κεφάλαιο 2.4 αναλύσαμε τα μοντέλα απωλειών πολυδιάστατης κίνησης με δυνατότητα επανάκλησης. Όπως είδαμε, η εφαρμογή τους είναι ιδιαίτερα προσοδοφόρα καθώς συμβάλλουν στην μείωση των απωλειών σε ένα σύστημα. Στην προκειμένη περίπτωση θα αναλύσουμε το μοντέλο απλής επανάκλησης – SingleRetryModel (SRM) και το μοντέλο πολλαπλών επανακλήσεων – MultiRetryModel (MRM) στο σύστημά μας, αρχιτεκτονικής C-RAN.

#### 3.4.1 Μοντέλο SRM σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN

Η εφαρμογή του μοντέλου απλής επανάκλησης σε δίκτυο C-RAN θα δώσει την δυνατότητα σε κλήσεις υπηρεσίας  $k$  και κεραίας  $m$  σε περίπτωση που αποκλειστούν λόγω ανεπάρκειας διαθέσιμων πόρων είτε στο RRH είτε στο V-BBU σύστημα να προσπαθήσουν εκ νέου τη σύνδεσή τους με νέο εύρος ζώνης  $b_{kmr} < b_{km}$  ή  $d_{kmr} < d_{km}$  και χρόνο εξυπηρέτησης  $\mu_{kmr}^{-1} > \mu_{km}^{-1}$ . Δεδομένου αυτού, μια προσπάθεια κλήσης θα γίνεται αποδεκτή όταν ισχύει  $j \leq C - b_{kmr}$  και  $j \leq T - d_{kmr}$ .

Για να οδηγηθούμε σε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της εφαρμογής αυτού του μοντέλου στο σύστημά μας και την αξιολόγηση της συνολικής CBP ανατρέχουμε στον αναδρομικό τύπο (2.28) από όπου προκύπτει:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{k=1}^K a_{km} b_{km} q(j - b_{km}) + \sum_{k=1}^K a_{kmr} b_{kmr} \gamma_{km}(j) q(j - b_{kmr}) \right] & \text{άλλο} \end{cases} \quad (3.10)$$

όπου για να προκύψει η πιθανότητα απώλειας κλήσης στο σύστημα RRH και μέσω των (2.29), (2.30) και (2.31) έχουμε:

$$P_{b_{km}}^{RRH'} = \frac{q(j)}{\sum_{j=C-b_{km}+1}^C q(j)}, \quad P_{b_{km}}^{RRH} = \frac{q(j)}{\sum_{j=C-b_{kmr}+1}^C q(j)}$$

$$\text{και τελικά } P_{b_{kmr}}^{RRH} = \frac{P_{b_{km}}}{P_{b_{km}}'} \quad (3.11)$$

Αντίστοιχα για το σύστημα V-BBU:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{k=1}^K a_{km} d_{km} q(j - d_{km}) + \sum_{k=1}^K a_{kmr} d_{kmr} \gamma_{km}(j) q(j - d_{kmr}) \right] & \text{άλλο} \end{cases} \quad (3.12)$$

και η CBP που θα προκύψει είναι:

$$P_{b_{kmr}}^{BBU} = \frac{P_{b_{km}}}{P_{b_{km}}'} \quad (3.13)$$

Για τον υπολογισμό της τελικής CBP του συστήματος συνολικά έχουμε:

$$P_{b_r} = (1 - (1 - P_{b_{kmr}}^{RRH}))(1 - P_{b_{kmr}}^{BBU}) \quad (3.14)$$

### 3.4.2 Μοντέλο MRM σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, το μοντέλο πολλαπλών επανακλήσεων δίνει την ευκαιρία σε κλήσεις οι οποίες απορριφθούν ακόμα και μετά την προσπάθεια επανάκλησής τους να επιχειρήσουν και πάλι τη σύνδεσή τους στο σύστημα με ακόμα μικρότερες απαιτήσεις σε μονάδες χωρητικότητας. Έτσι λοιπόν, για το σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN που μελετάμε οι κλήσεις υπηρεσίας  $k$  και κεραίας  $m$  θα γίνουν δεκτές στο σύστημα των RRH και V-BBU όταν αντίστοιχα ισχύουν:

$$C - b_{kmrs-1} < j < C - b_{kmrs}$$

και

$$T - d_{kmrs-1} < j < T - d_{kmrs}$$

όπου  $s$  η κάθε νέα επανάκληση που πραγματοποιεί η κλήση.

Για τον υπολογισμό της CBP του κάθε συστήματος θα χρησιμοποιήσουμε τους τύπους (2.32) και (2.34) και θα προκύψουν:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{k=1}^K a_{km} b_{km} q(j - b_{km}) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S(k)} a_{kmrs} b_{kmrs} \gamma_{kms}(j) q(j - b_{kmrs}) \right] \\ 0, & \text{άλλο} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$P_{b_{kmrs}}^{RRH} = \frac{\sum_{j=C-b_{kmrs}+1}^C q(j)}{\sum_{j=C-b_{kmrs-1}+1}^C q(j)} \quad (3.16)$$

και για το V-BBU:

$$q(j) = \begin{cases} 1, & \text{για } j = 0 \\ \frac{1}{j} \sum_{m=1}^M \left[ \sum_{k=1}^K a_{km} d_{km} q(j - d_{km}) + \sum_{k=1}^K \sum_{s=1}^{S(k)} a_{kmrs} d_{kmrs} \gamma_{kms}(j) q(j - d_{kmrs}) \right] \\ 0, & \text{άλλο} \end{cases} \quad (3.17)$$

$$P_{b_{kmrs}}^{BBU} = \frac{\sum_{j=T-d_{kmrs}+1}^T q(j)}{\sum_{j=T-d_{kmrs-1}+1}^T q(j)} \quad (3.18)$$

Ο τύπος της συνολικής πιθανότητας αποκλεισμού κλήσης που θα πάρουμε από τις (3.16) και (3.18) είναι:

$$P_{b_{rs}} = (1 - (1 - P_{b_{kmrs}}^{RRH})(1 - P_{b_{kmrs}}^{BBU})) \quad (3.19)$$





## Κεφάλαιο 4. Αποτελέσματα Μαθηματικού Μοντέλου

### 4.1 Περιγραφή Δικτύου

Στο κεφάλαιο αυτό παραθέτονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου EMLM καθώς και του μοντέλου επανάκλησης EMLM στο δίκτυο C-RAN που εξετάζουμε. Το μοντέλο απωλειών EMLM, όπως αναλύσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρεται σε ένα σύστημα στο οποίο όταν μία νέα κλήση μιας κατηγορίας κίνησης  $k$  εισέρχεται στο δίκτυο, μπλοκάρεται και αποχωρεί χωρίς να εξυπηρετηθεί όταν δεν υπάρχουν ελεύθεροι τηλεπικοινωνιακοί ή IT πόροι για την εξυπηρέτησή της. Η πιθανότητα της απώλειας αυτής υπολογίζεται από τον αναδρομικό τύπο των Kaufman – Roberts.

### 4.2 Αριθμητικό σενάριο εφαρμογής του μοντέλου Πολυδιάστατης Κίνησης

Ως πειραματικό σενάριο θεωρούμε δίκτυο C-RAN δέκα κεραιών  $M = 10$ , όπου για τον αριθμό των RRHs ισχύει  $RRHs = 10$ . Κάθε RRH διαθέτει χωρητικότητα  $C_{RRH} = 100$  μονάδες τηλεπικοινωνιακών πόρων. Παράλληλα το V-BBU αποτελείται από  $C_{BBU} = 200$  μονάδες IT πόρων. Εξετάζουμε  $K = 3$  κλάσεις υπηρεσιών όπου ο ρυθμός άφιξης  $\lambda_k$  των κλήσεων είναι 0,1 και ο ρυθμός εξυπηρέτησης  $\mu_k$  είναι 1, τιμές που ισχύουν και στις 3 υπηρεσίες. Οι απαιτήσεις των τηλεπικοινωνιακών πόρων για κάθε υπηρεσία είναι  $b_1 = 20$  r.u.,  $b_2 = 16$  r.u.,  $b_3 = 12$  r.u. αντίστοιχα, ενώ οι απαιτήσεις σε IT πόρους  $d_1 = 8$  c.u.,  $d_2 = 6$  c.u.,  $d_3 = 4$  c.u..

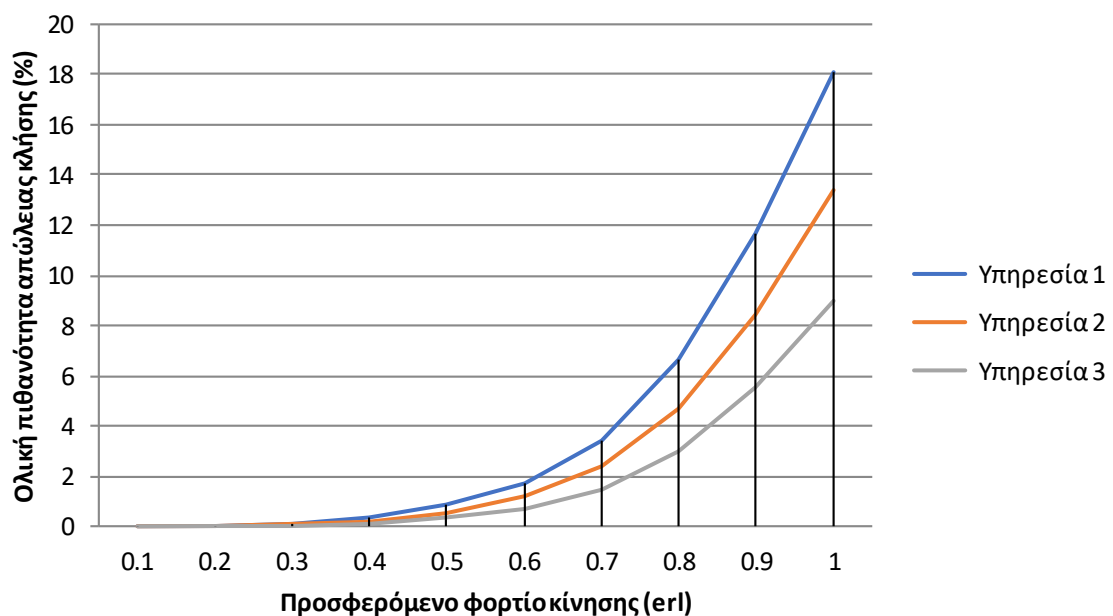
Αρχικά εξετάζουμε την ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης CBP κάθε υπηρεσίας συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης, το οποίο προκύπτει από τον τύπο  $A = \frac{\lambda}{\mu}$  όπως ήδη είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τιμές που δίνονται στο φορτίο κίνησης είναι  $A = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$  erl.

Παρατηρούμε ότι η CBP και των τριών υπηρεσιών είναι διαφορετική και αυξάνεται ανάλογα με τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης που έχει η καθεμία ξεχωριστά. Στον άξονα  $y$  αναπαρίσταται η προκύπτουσα CBP, η οποία αυξάνεται όσο αυξάνουμε την τιμή του προσφερόμενου φορτίου. Για τις τιμές του φορτίου κίνησης από 0.1 έως 0.6 η CBP διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, κάτω του 2% και στις τρεις περιπτώσεις υπηρεσιών. Στη συνέχεια, παρατηρείται σταδιακή αύξηση στις CBPs με αυτή της 1<sup>ης</sup> υπηρεσίας να προηγείται φτάνοντας το 18,094586 %. Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στην υψηλή απαίτηση πόρων τόσο τηλεπικοινωνιακών όσο και IT συγκριτικά με τις απαιτήσεις των άλλων δύο κατηγοριών.

Πίνακας 4.1: Πιθανότητες απώλειας κλήσης για τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης  $A$

A	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2	Υπηρεσία 3
0,1	0,000648	0,000365	0,000170
0,2	0,016688	0,009858	0,005028
0,3	0,101474	0,062360	0,033941
0,4	0,341060	0,216711	0,124032
0,5	0,833278	0,544839	0,324564
0,6	1,728257	1,159272	0,713045
0,7	3,426935	2,357582	1,487418
0,8	6,607169	4,665038	3,007341
0,9	11,627397	8,415885	5,535634
1	18,094586	13,394830	8,982286

Και η ακόλουθη γραφική παράσταση:



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του προσφερόμενου φορτίου κίνησης  $A$

Διατηρώντας τα δεδομένα του πρώτου σεναρίου που αφορούν τον αριθμό κεραιών, την ΙΤ χωρητικότητα  $C_{BBU}$ , τον ρυθμό εξυπηρέτησης των κλήσεων  $\mu_k$  καθώς και τις απαιτήσεις σε τηλεπικοινωνιακούς  $b_k$  και ΙΤ πόρους  $d_k$ , εξετάζουμε την επίδραση της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας στην ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης του συστήματος είναι σταθερό στα 0,5 erl και κοινό

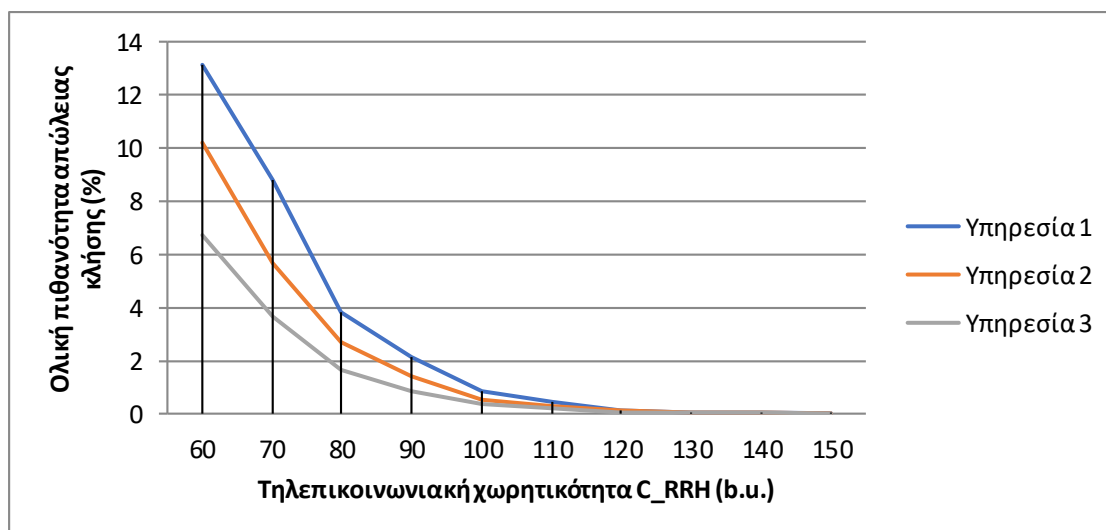
και στις τρεις κατηγορίες υπηρεσίας. Οι τιμές που δίνονται στην τηλεπικοινωνιακή χωρητικότητα είναι  $C\_RRH = \{60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150\}$ . Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι τιμές της CBP κάθε υπηρεσίας κίνησης για τις διαφορετικές τιμές της  $C\_RRH$ .

Παρατηρώντας τα δεδομένα του πίνακα, διαπιστώνουμε τη μείωση της πιθανότητας απώλειας κλήσης, όσο αυξάνεται η  $C\_RRH$  λόγω της μεγαλύτερης δυνατότητας δέσμευσης πόρων από κλήσεις που εισέρχονται στο σύστημα.

Πίνακας 4.2: Πιθανότητες απώλειας κλήσης για τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας  $C\_RRH$

$C\_RRH$	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2	Υπηρεσία 3
60	13,128755	10,198469	6,719431
70	8,782310	5,677929	3,647775
80	3,811232	2,664683	1,635933
90	2,137955	1,37698	0,875207
100	0,833278	0,544839	0,324564
110	0,418044	0,266534	0,164684
120	0,148326	0,093188	0,054593
130	0,071623	0,045012	0,026875
140	0,026588	0,016501	0,009550
150	0,015201	0,009575	0,005569

Και η ακόλουθη γραφική παράσταση:



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας  $C\_RRH$

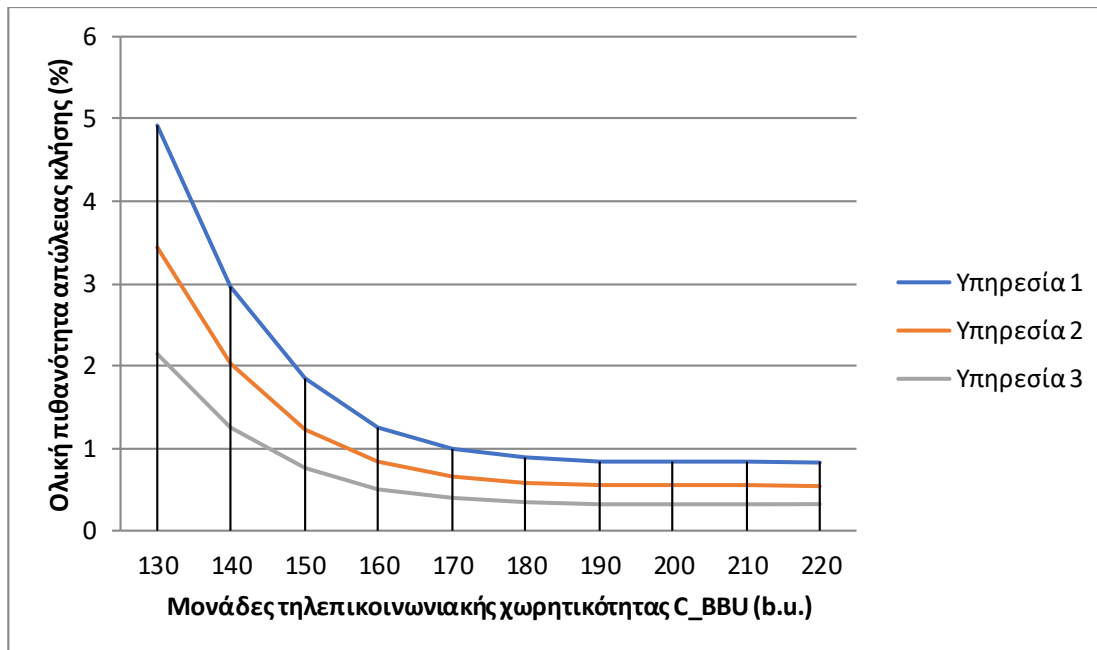
Τέλος, εξετάζουμε την επίδραση της IT χωρητικότητας στην ολική πιθανότητα απώλειας κλήσης του συστήματος. Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση ο αριθμός των κεραιών, η τηλεπικοινωνιακή χωρητικότητα  $C_{RRH}$ , ο ρυθμός εξυπηρέτησης των κλήσεων  $\mu_k$  καθώς και τις απαιτήσεις σε τηλεπικοινωνιακούς  $b_k$  και IT πόρους  $d_k$  παραμένουν ίδια. Το προσφερόμενο φορτίο κίνησης του συστήματος είναι σταθερό στα 0,5 erl και κοινό και στις τρεις κατηγορίες υπηρεσίας. Οι τιμές που δίνονται στην IT χωρητικότητα είναι  $C_{BBU} = \{130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 210, 220\}$ . Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά οι τιμές της CBP κάθε υπηρεσίας κίνησης για τις διαφορετικές τιμές της  $C_{BBU}$ .

Όπως και στο σενάριο κατά το οποίο εξετάσαμε την επίδραση της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας στην CBP, στην περίπτωση αυτή παρατηρείται επίσης σταδιακή μείωση του ποσοστού αυτού που οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων για τις κλήσεις του συστήματος. Επιπλέον παρατηρείται εμφανώς πολύ μικρή μεταβολή στις CBP και των τριών υπηρεσιών για τις τιμές  $C_{BBU}$  από 180 b.u. έως 220 b.u..

Ακολουθούν ο Πίνακας 4.3 και το αντίστοιχο διάγραμμα στο Σχήμα 4.3.

Πίνακας 4.3: Πιθανότητες απώλειας κλήσης για τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει του της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας  $C_{BBU}$

$C_{BBU}$	Υπηρεσία 1	Υπηρεσία 2	Υπηρεσία 3
130	4,921032	3,441284	2,146274
140	2,958534	2,031576	1,248256
150	1,838853	1,239868	0,751446
160	1,264925	0,839828	0,503809
170	0,503809	0,657685	0,392456
180	0,889700	0,582636	0,347102
190	0,847811	0,554496	0,330279
200	0,833278	0,544839	0,324564
210	0,828641	0,541788	0,322776
220	0,827273	0,540897	0,322258



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα πιθανοτήτων απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες κίνησης συναρτήσει της τηλεπικοινωνιακής χωρητικότητας  $C_{RRH}$

#### 4.3 Αριθμητικό σενάριο εφαρμογής του μοντέλου Επανάκλησης και Πολλαπλής Επανάκλησης

Στο Κεφάλαιο 2 συναντήσαμε το μοντέλο απλής επανάκλησης (single-retry model, SRM) σύμφωνα με το οποίο μια κλήση της κατηγορίας κίνησης  $k$  εάν δεν γίνει δεκτή από το σύστημα με τις αρχικές τις απαιτήσεις  $b_k$ ,  $d_k$ , έχει τη δυνατότητα να ξαναζητήσει εξυπηρέτηση με νέες μονάδες εύρους ζώνης και IT πόρους ώστε να ισχύει  $b_{kr} < b_k$  και  $d_{kr} < d_k$ , η νέα μέση τιμή του χρόνου εξυπηρέτησης θα ικανοποιεί τη σχέση  $\mu_{kr}^{-1} > \mu_k^{-1}$ .

Έπειτα αναλύσαμε τη μέθοδο πολλαπλών επανακλήσεων. Αποτελεί επέκταση του μοντέλου απλής επανάκλησης αφού θεωρείται η περίπτωση όπου οι κλήσεις μιας κατηγορίας κίνησης  $k$  έχουν τη δυνατότητα να προσπαθήσουν να συνδεθούν στο σύστημα περισσότερες από δυο φορές.

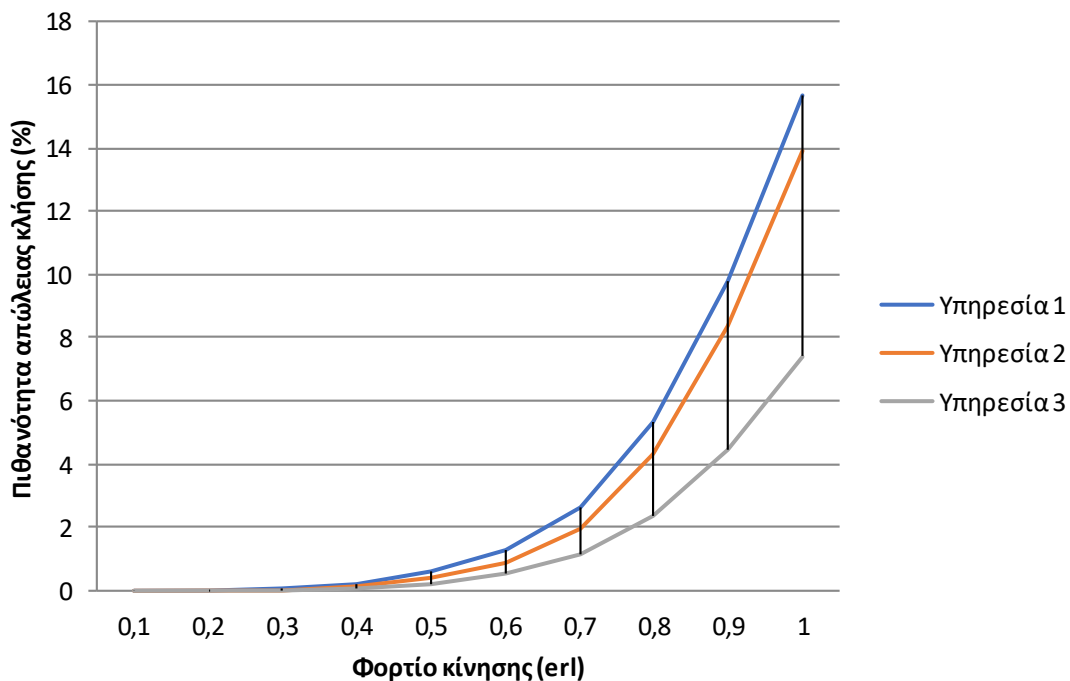
Σε ότι αφορά το δικό μας δίκτυο, δεδομένου του ότι διαθέτουμε δύο συστήματα, αυτό των RRHs και αυτό του VBBU, οι κλήσεις μιας κατηγορίας κίνησης  $k$  έχουν τη δυνατότητα επανάκλησης είτε και στα δύο συστήματα είτε μόνο στο ένα αντίστοιχα. Συνεπώς στο σημείο αυτό θα εξετάσουμε τρία σενάρια, τα οποία θα αντιστοιχούν σε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις: 1) υπάρχει δυνατότητα επανάκλησης και στο σύστημα RRH, και στο σύστημα BBU, 2) υπάρχει δυνατότητα επανάκλησης μόνο στο σύστημα RRH, 3) υπάρχει δυνατότητα επανάκλησης μόνο στο σύστημα BBU.

Και στα τρία σενάρια θεωρούμε δίκτυο C-RAN δέκα κεραίων  $M = 10$ , όπου για τον αριθμό των RRHs ισχύει  $RRHs = 10$ . Κάθε RRH διαθέτει χωρητικότητα  $C_{RRH} =$

100 μονάδες τηλεπικοινωνιακών πόρων. Παράλληλα το V-BBU αποτελείται από  $C\_BBU=200$  μονάδες IT πόρων και οι τιμές του προσφερόμενου φορτίου κίνησης είναι  $A = \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1\}$  erl. Εξετάζουμε και πάλι  $K=3$  κλάσεις υπηρεσιών όπου οι απαιτήσεις των τηλεπικοινωνιακών πόρων για κάθε υπηρεσία είναι  $b_1=20$  r.u.,  $b_2=16$  r.u.,  $b_3=12$  r.u. αντίστοιχα, ενώ οι απαιτήσεις σε IT πόρους  $d_1=8$  c.u.,  $d_2=6$  c.u.,  $d_3=4$  c.u. Όπως αναφέραμε, υπάρχει η δυνατότητα επανάκλησης είτε και των δυο συστημάτων είτε μόνο του ενός ξεχωριστά, σε περίπτωση που οι κλήσεις αποκλειστούν από το δίκτυο. Στη δική μας περίπτωση θα εξετάσουμε 2 επίπεδα επανάκλησης. Επομένως οι κλήσεις και των τριών κλάσεων υπηρεσίας με σκοπό να εξυπηρετηθούν, προσπαθούν να επανασυνδεθούν με χαμηλότερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης και IT πόρους,  $b_{11}=16$  r.u.,  $b_{21}=13$  r.u.,  $b_{31}=10$  r.u. και  $d_{11}=7$  c.u.,  $d_{21}=5$  c.u.,  $d_{31}=3$  c.u. αυξάνοντας ταυτόχρονα το προσφερόμενο φορτίο κίνησης σε εύρος τιμών  $A = \{0.125, 0.25, 0.375, 0.5, 0.5, 0.625, 0.75, 0.875, 1, 1.125\}$ . Με τη δεύτερη επανάκληση τα νέα δεδομένα για τις απαιτήσεις είναι  $b_{12}=12$  r.u.,  $b_{22}=9$  r.u.,  $b_{32}=7$  r.u. και  $d_{12}=6$  c.u.,  $d_{22}=4$  c.u.,  $d_{32}=2$  c.u. και για το φορτίο κίνησης  $A = \{0.15, 0.30, 0.45, 0.6, 0.75, 0.9, 1.05, 1.2, 1.35, 1.5\}$

#### 4.3.1 Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου επανάκλησης στο 1<sup>ο</sup> σενάριο

Το πρώτο σενάριο που θεωρήθηκε αφορά την περίπτωση όπου και τα δύο συστήματα του δικτύου, δηλαδή τόσο του RRH όσο και του BBU δέχονται την δυνατότητα επανάκλησης. Σύμφωνα με τα δεδομένα που ήδη παραθέσαμε προκύπτουν οι τιμές της πιθανότητας απώλειας κλήσης για τις τρεις κατηγορίες υπηρεσίας όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

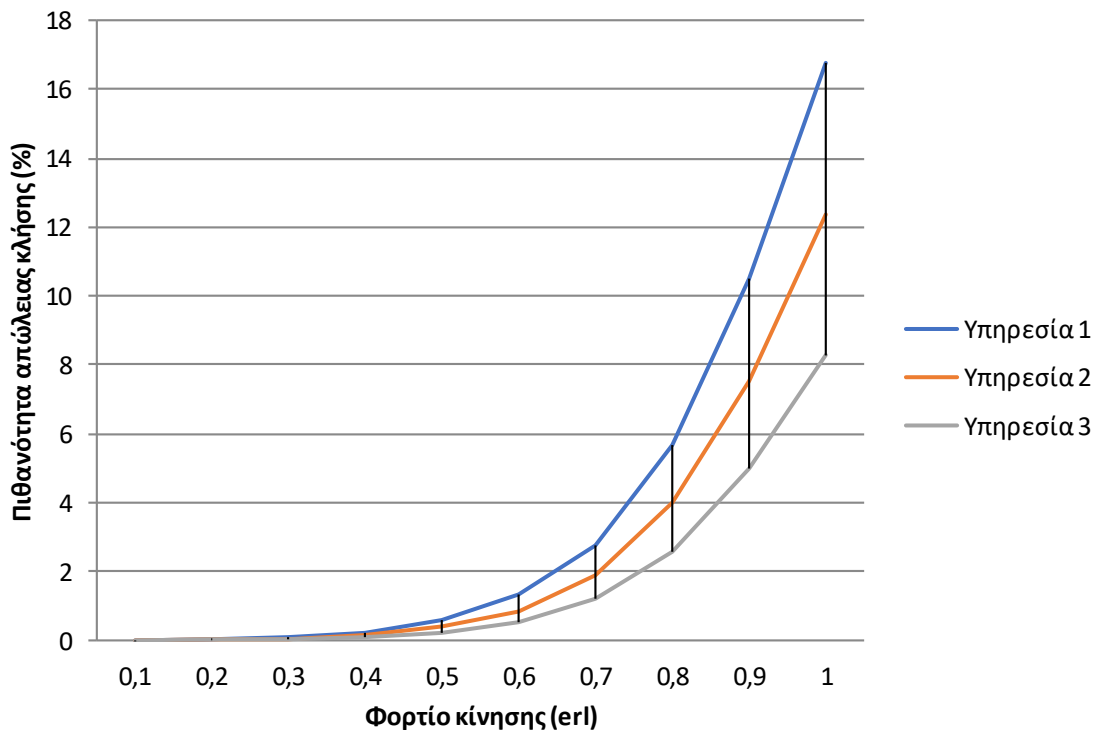


Σχήμα 4.4: Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων

Οι διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης της κάθε κατηγορίας κίνησης καθώς και η αύξηση του προσφερόμενου φορτίου αυξάνει αντίστοιχα και την CBP κάθε υπηρεσίας. Στον άξονα  $y$ , δείχνουμε την προκύπτουσα CBP. Η CBP της 1ης κατηγορίας κυμαίνεται από 0,000374% έως 15,65808% της 2ης κατηγορίας από 0,000180% μέχρι 13,90260%, ενώ η 3η κατηγορία εμφανίζει πολύ χαμηλότερα ποσοστά, λόγω της χαμηλότερης απαίτησης σε πόρους ξεκινώντας από 0,000074% και καταλήγοντας στο ποσοστό του 7,39441%.

#### 4.3.2 Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου επανάκλησης στο 2ο σενάριο

Το δεύτερο σενάριο που θεωρήσαμε αφορά την περίπτωση όπου μόνο το σύστημα RRH επιτρέπει την δυνατότητα επανάκλησης με μικρότερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Επομένως, η κλήσεις και των τριών κατηγοριών προσπαθούν να επανασυνδεθούν στο σύστημα RRH με χαμηλότερες απαιτήσεις.



Σχήμα 4.5: Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών πόρων

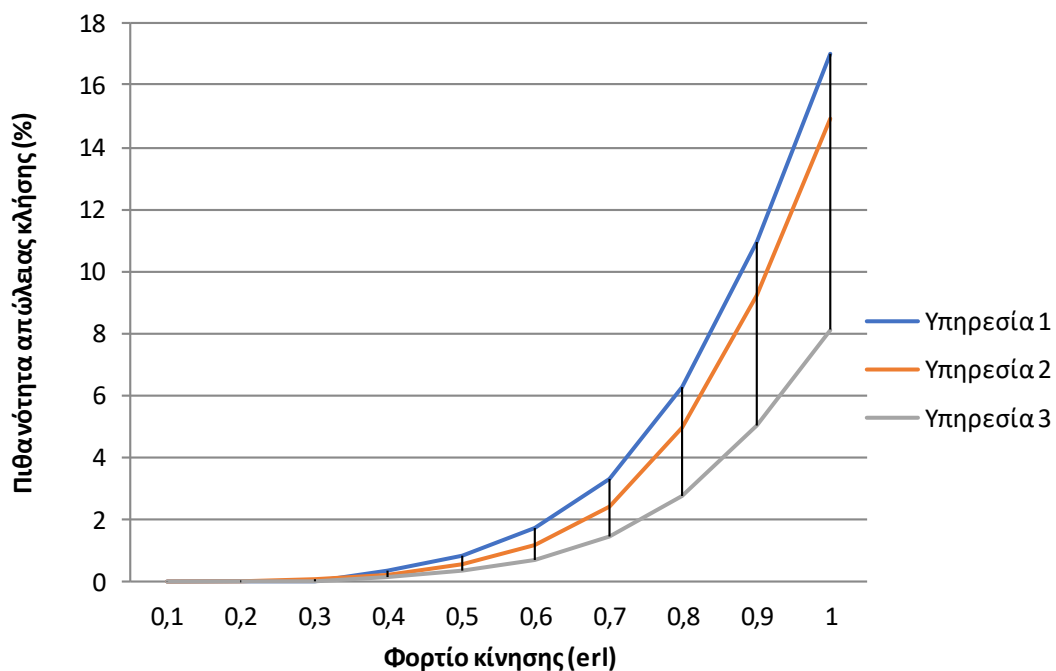
Παρατηρώντας τα δεδομένα του διαγράμματος, διαπιστώνουμε την αύξηση της πιθανότητας απώλειας κλήσης, όσο αυξάνεται το φορτίο κίνησης  $A$ . Αυτό ισχύει και



για τις τρεις κατηγορίες υπηρεσίας με την πρώτη να προηγείται και πάλι με τιμές από 0,000374 έως 16,76277%, ακολουθεί η δεύτερη με CBP από 0,000180% έως 12,363836% και τέλος η τρίτη με CBP από 0,000074% έως 8,283252%.

#### 4.3.3 Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου επανάκλησης στο 3ο σενάριο

Το τρίτο σενάριο που θεωρήσαμε αφορά την περίπτωση όπου μόνο το σύστημα BBU επιτρέπει την δυνατότητα επανάκλησης με μικρότερες απαιτήσεις σε υπολογιστικούς πόρους. Παρατηρούμε και πάλι αύξηση της CBP όλων των κατηγοριών όσο αυξάνεται και η τιμή του φορτίου. Συγκεκριμένα, η CBP της 1<sup>ης</sup> υπηρεσίας ξεκινά από 0,000648% και φτάνει μέχρι 17,00757%, η 2<sup>η</sup> με ποσοστά 0,000365% έως 14,915491 και η CBP της 3<sup>ης</sup> υπηρεσίας που ξεκινά από το 0,000170% και καταλήγει στο 8,100219%. Οπότε η γραφική παράσταση που εξάγεται είναι η παρακάτω:



Σχήμα 4.6: Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης IT πόρων

#### 4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο σημείο αυτό θα δούμε αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων και προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε για κάθε υπηρεσία κίνησης ξεχωριστά.

Πίνακας 4.4: Σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 1<sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης

Φορτίο (erl)	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος χωρίς δυνατότητα επανάκλησης	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών πόρων	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης IT πόρων	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων
0,1	0,000648	0,000374	0,000648	0,000374
0,2	0,016688	0,010314	0,016688	0,010314
0,3	0,101474	0,066352	0,010147	0,066352
0,4	0,341060	0,233956	0,341021	0,233917
0,5	0,833278	0,597275	0,831649	0,595642
0,6	1,728257	1,305155	1,707612	1,284421
0,7	3,426935	2,771196	3,312988	2,656475
0,8	6,607169	5,700419	6,259812	5,349690
0,9	11,627397	10,486206	0,924997	9,774735
1	18,09459	16,76277	17,00757	15,65808

Πίνακας 4.5: Σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 2<sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης

Φορτίο (erl)	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος χωρίς δυνατότητα επανάκλησης	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών πόρων	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης IT πόρων	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων
0,1	0,000365	0,000180	0,000365	0,000180
0,2	0,009858	0,005484	0,009858	0,005484
0,3	0,062360	0,037933	0,062360	0,037933
0,4	0,216711	0,14279	0,216722	0,141290
0,5	0,544839	0,376633	0,545466	0,377261
0,6	1,159272	0,854200	1,170156	0,865117
0,7	2,357582	1,878855	2,438025	1,959692
0,8	4,665038	3,992817	4,985079	4,315115
0,9	8,415885	7,553068	9,230336	8,375191
1	13,394830	12,363836	14,915491	13,90260

Πίνακας 4.6: Σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 3<sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης

Φορτίο (erl)	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος χωρίς δυνατότητα επανάκλησης	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών πόρων	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης IT πόρων	Πιθανότητα απώλειας κλήσης συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων
0,1	0,000170	0,000074	0,000170	0,000074
0,2	0,005028	0,00267	0,005028	0,002670
0,3	0,033941	0,020346	0,033941	0,020346
0,4	0,124032	0,808050	0,124016	0,080789
0,5	0,324564	0,225544	0,323795	0,224774
0,6	0,713045	0,528868	0,702128	0,517930
0,7	1,487418	1,191119	1,420166	1,123663
0,8	3,007341	2,579979	2,778711	2,350341
0,9	5,535634	4,970165	5,021033	4,452484
1	8,982286	8,283252	8,100219	7,394411

Η σύγκριση των πιθανοτήτων απώλειας κλήσης που γίνεται από τους παραπάνω πίνακες επιτρέπουν την εξαγωγή ορισμένων συμπερασμάτων και παρατηρήσεων σε ότι αφορά το μοντέλο μας καθώς και τη θέση της επανάκλησης σε αυτό. Όπως επισημάνθηκε και νωρίτερα, οι διαφορετικές απαιτήσεις εύρους ζώνης της κάθε κατηγορίας κίνησης καθώς και η αύξηση του προσφερόμενου φορτίου αυξάνει αντίστοιχα και την CBP κάθε υπηρεσίας, γεγονός που φαίνεται ξεκάθαρα συγκρίνοντας τους πίνακες και των τριών υπηρεσιών. Συγκεκριμένα, για κάθε περίπτωση προσομοίωσης συστήματος, είτε χωρίς δυνατότητα επανάκλησης είτε με δυνατότητα επανάκλησης συγκεκριμένου τύπου συστήματος, ισχύει  $CBP_{k1} > CBP_{k2} > CBP_{k3}$  για όλες τις τιμές του φορτίου  $A$  που εξετάσαμε.

Σε ότι αφορά την υπηρεσία κίνησης 1 και 3, συγκρίνοντας τις CBP κάθε διαδικασίας διαπιστώνουμε ότι η τιμή της στις περιπτώσεις επανάκλησης είναι μειωμένη συγκριτικά με αυτή του συστήματος που δεν έχει τη δυνατότητα επανάκλησης. Συγκεκριμένα η CBP του συστήματος χωρίς δυνατότητα επανάκλησης φτάνει το ποσοστό του 18,09459% για την υπηρεσία 1 και 8,982286% για την υπηρεσία 2, ενώ οι CBP των διαδικασιών όπου το σύστημα έχει τη δυνατότητα επανάκλησης ανέρχονται στο 16,76277% - 17,00757% - 15,65808% και 8,283252% - 8,100219% - 7,394411% αντίστοιχα. Σε πιο εκτενή ανάλυση, η περίπτωση του συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων μας δίνει την μικρότερη τιμή του ποσοστού απώλειας κλήσης, γεγονός που αποδεικνύει ότι οι νέες κλήσεις με την επίτευξη της επανασύνδεσης μειώνουν τις απαιτήσεις που έχουν σε εύρος ζώνης

και IT πόρους, με αποτέλεσμα να μειώνεται και η ταχύτητα μετάδοσης, ενώ παράλληλα αυξάνεται ο χρόνος εξυπηρέτησης.

Ο Πίνακας 4.5. ο οποίος απεικονίζει τη σύγκριση διαφορετικών διαδικασιών επανάκλησης για την 2<sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης μας δίνει αποτελέσματα από τα οποία προκύπτουν ελαφρώς διαφορετικά συμπεράσματα για την 2<sup>η</sup> υπηρεσία κίνησης. Εδώ, η διαδικασία που εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό της CBP είναι αυτή του συστήματος με δυνατότητα επανάκλησης IT πόρων με τιμή που φτάνει στο 14,915491% για φορτίο A, ενώ ακολουθεί το σύστημα με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών και IT πόρων με CBP 13,90260%, έπειτα το σύστημα χωρίς δυνατότητα επανάκλησης με 13,394830% και τέλος το σύστημα με δυνατότητα επανάκλησης τηλεπικοινωνιακών πόρων με 12,363836%.



## Κεφάλαιο 5. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική πρότεινε την μαθηματική μοντελοποίησης αρχιτεκτονικής C-RAN. Όπως αναλύθηκε, η δυνατότητά της να διαχωρίσει τα RRHs από τα BBUs στους σταθμούς βάσης αποδίδει μια νέα δυναμική ιδιαίτερα σημαντική έναντι στην ήδη αυξανόμενη ζήτηση κυκλοφορίας και του φορτίου κίνησης. Η C-RAN έχει τη δυνατότητα να μειώσει δραστικά τον αριθμό των BSs και συνεπώς να υλοποιηθεί σε χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με τα παραδοσιακά κυψελοειδή συστήματα. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής αυτής βέβαια αποτελεί η αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος λόγω της αξιοσημείωτης μείωσης των απωλειών. Αναπτύχθηκε μαθηματικό μοντέλο για τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσης, για τις περιπτώσεις όπου το δίκτυο υποστηρίζει α) πολλαπλές υπηρεσίες, β) πολλαπλές υπηρεσίες με δυνατότητα επανάκλησης. Η εφαρμογή της προτεινόμενης ανάλυσης σε διαφορετικά σενάρια δικτύων που πραγματοποιήσαμε αποδεικνύουν το θετικό αντίκτυπο της εφαρμογής των μοντέλων Πολυδιάστατης Κίνησης και κυρίως αυτών της Απλής και Πολλαπλής Επανάκλησης σε ένα δίκτυο αρχιτεκτονικής C-RAN. Παρατηρήθηκαν μειώσεις στην πιθανότητα απώλειας κλήσης από το σύστημα λόγω αδυναμίας εξυπηρέτησης, είτε στην περίπτωση που η επανάκληση πραγματοποιείται από το σύστημα των RRHs, είτε από αυτό των BBUs. Οι σημαντικότερες μειώσεις της CBP βέβαια σημειώθηκαν στην περίπτωση όπου τόσο το σύστημα των RRHs όσο και των BBUs πραγματοποιούν επανάκληση. Καταλήγουμε ότι οι διαφορές αυτές στην CBP οι οποίες προκύπτουν δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Αντιθέτως, μάλιστα, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ορθή χρήση και εφαρμογή της επανάκλησης σε σύστημα αρχιτεκτονικής C-RAN φέρει ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα ως προς τη συνολική λειτουργικότητα του δικτύου.



## Βιβλιογραφία

- [1] AkhilGupta, RakeshKumarJha, “ASurveyof 5GNetwork: ArchitectureandEmergingTechnologies”, IEEE Access, 28 July 2015
- [2] 5G Infrascrucute Public Private Partnership. [Online]. Available: <http://5g-ppp.eu/>
- [3] Ericsson Mobility Report November 2020. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/4adc87/assets/local/mobility-report/documents/2020/november-2020-ericsson-mobility-report.pdf>
- [4] Prabesh Paudel, Abhi Bhattarai, “5G Telecommunication Technology: History, Overview, Requirements and Use Case Scenario in Context of Nepal”, Conference Paper, May 2018, publication at Research Gate
- [5] Ekram Hossain, Monowar Hasan, “5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges”, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine · February 2015
- [6] Steven Bergren, “Design Considerations for a 5G Network Architecture”, Oklahoma State University, Stillwater, 2017, Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-Considerations-for-a-5G-Network-Architecture-Bergren/>
- [7] Μήττα Αικατερίνη - Λούτα Μαλαματή & Βαρδάκας Ιωάννης , "Τεχνικές ανάθεσης πόρων δικτύων σε πολυχρηστικά συστήματα πολλαπλής-εισόδου-πολλαπλής-εξόδου" - Διπλωματική Εργασία, Κοζάνη, Φεβρουάριος 2020
- [8] Wang, C.-X., et al. "Cellular Architecture and Key Technologies for 5G Wireless Communication Networks." *IEEE Communications Magazine*, February 2014
- [9] A. Checko, H.-L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G.Kardaras, M.-S. Berger, and L. Dittmann “Cloud RAN for mobile networks – A technology overview”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol 17, No 1 First Quarter 2015
- [10] H.Akamaru K.Kawashima: Teletraffic, Theory and Applications, Springer-Verlang, 1999
- [11] Μ. Δ. Λογοθέτης, «Θεωρία τηλεπικοινωνιακής κινήσεως και εφαρμογές», 2η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2012.
- [12] Ι. Δ. Μοσχολιός, Κατσιβά Μαρία. «Υπολογισμός της πιθανότητας συμφόρησης κλήσεων πολυδιάστατης ψευδο-τυχαίας κίνησης στην ανερχόμενη ζεύξη κυψέλης WCDMA » Διπλωματική εργασία, Σχολή οικονομίας, διοίκησης και πληροφορικής, Τμήμα πληροφορικής και τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου, Απρίλιος 2014.
- [13] Ι. Δ. Μοσχολιός, Κώστας Ευαγγέλου Νέστωρ. «Ανάλυση συστήματος απωλειών πολυδιάστατης τυχαίας και ψευδοτυχαίας κίνησης με δυνατότητα



επανάκλιση» Διπλωματική εργασία, Σχολή θετικών επιστημών και τεχνολογίας, Μάιος 2012

- [14] Efficient Multirate Teletraffic Loss Models Beyond Erlang, Michael Logothetis, Ioannis D. Moscholios
- [15] J. Kaufman, “Blocking in a shared resource environment”, *IEEE Trans. Commun.*, 29 (10), pp. 1474-1481, October 1981.
- [16] Ioannis D. Moscholios, Vassilios G. Vasilakis, John S. Vardakas and Michael D. Logothetis. Retry Loss Models Supporting Elastic Traffic.1. Dept. of Telecommunications Science and Technology, University of Peloponnese, 2. WCL, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of Patras. January 2014.
- [17] Rehenuma Tasnim Rodoshi, Taewoon Kim, Wooyeol Choi, “Resource Management in Cloud Radio Access Network: Conventional and New Approaches”, Department of Computer Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, School of Software, Hallym University, Chuncheon 24252, Korea, 9 May 2020
- [18] Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper. Διαθέσιμο online: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [19] Chih-Lin I, Jinri Huang, Ran Duan, Chunfeng Cui, Jesse (Xiaogen) Jiang, Lei Li, “Recent Progress on C-RAN Centralization and Cloudification”, 1Green Communication Research Center, China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China, Alcatel-Lucent Shanghai Bell Company, Ltd., Shanghai 200233, China, Ericsson (China) Communications Company, Ltd., Beijing 100102, China, September 19, 2014.
- [20] J. Yao and N. Ansari, "QoS-aware Joint BBU-RRH Mapping and User Association in Cloud-RANs," in *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, DOI: 10.1109/TGCN.2018.2837867
- [21] Στεργίου Ζωή – Χρήστος Δουληγέρης, “C-RAN Αλγόριθμος υλοποίησης RRH σε BBU”, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής, Ιούλιος 2017

## Παράρτημα

Κώδικας σε γλώσσα C, για τον υπολογισμό της πιθανότητας απώλειας κλήσης σε δίκτυο CRAN.

```
# include <stdlib.h>
# include <stdio.h>
# include <math.h>
double retry_RRH(int jj);
double retry_BBU(int jjj);
double EMLM_BBU(int jjjj);
double EMLM_RRH(int jjjjj);

# define N 500
# define M 5

void main(void)
{
    int C_RRH, C_BBU, i, j, K, S, s1, N_antennas;
    double b[M], d[M], br[M][M], dr[M][M];
    double G;
    double AR[M][M], A[M], P_RRH[M], sum5[N], P_BBU[M], sum6[N];
    FILE* source;
    source=fopen("multiretry.txt", "r");

    fscanf(source, "%d %d %d %d", &N_antennas, &C_RRH, &C_BBU, &K, &S); //

    for (i=1; i<=K; i++) // Eisagogi dedomenwn gia ton arithmo kathgoriwn
    { // fortio, apaitheis euros zwntis kai arithmo epanaklisewn
        fscanf(source, "%lf %lf %lf", &A[i], &b[i], &d[i]);
    } //

    for (i=1; i<=K; i++) //
    { //
        for (s1=1; s1<=S; s1++) //
        { //
            fscanf(source, "%lf %lf %lf", &AR[s1][i], &br[s1][i], &dr[s1][i]); // Eisagogi dedomenwn Retry Parameters kai o arithmos twv trunks
        } //
    } //
    fclose(source); //

    printf("BLOCKING PROBABILITIES WHEN BOTH SYSTEMS RETRY\n\n");
    for (i=1; i<=K; i++)
    {
        sum5[i]=0;
        sum6[i]=0;

        for (j=(C_RRH-(int)(br[S][i])+1); j<=C_RRH; j++) //
        { //
            sum5[i]=sum5[i]+retry_RRH(j); // Blocking ths kathgorias k gia to teliko euros zwntis Bkr stin RRH
        }

        P_RRH[i]=sum5[i];
        printf("Pbr_RRH[%d]= %f\n", i, P_RRH[i]);

        for (j=(C_BBU-(int)(dr[S][i])+1); j<=C_BBU; j++) //
        { //
            sum6[i]=sum6[i]+retry_BBU(j); // Blocking ths kathgorias k gia to teliko euros zwntis Bkr sto BBU
        }
    }
}
```

```

P_BBU[i]=sum6[i];
printf("Pbr_BBU[%d]= %f\n",i,P_BBU[i]); //

printf("Final Call Blocking Probability of service class %d = %lf %%\n", i, 100 * (1-((1-sum5[i])*(1-sum6[i]))));
}

printf("\n\nBLOCKING PROBABILITIES WHEN ONLY THE RRH SYSTEM RETRIES\n\n");
for(i=1;i<=K;i++)
{
sum5[i]=0;
sum6[i]=0;

for(j=(C_RRH-(int)(br[S][i])+1);j<=C_RRH;j++) // //
{
sum5[i]=sum5[i]+retry_RRH(j); // // Blocking ths kathgorias k gia to teliko euros zwnis Bkr stin RRH
}

P_RRH[i]=sum5[i];
printf("Pbr_RRH[%d]= %f\n",i,P_RRH[i]);

for(j=(C_BBU-(int)(d[i])+1);j<=C_BBU;j++) // //
{
sum6[i]=sum6[i]+EMLM_BBU(j); // // Blocking ths kathgorias k gia to teliko euros zwnis Bkr sto BBU
}
P_BBU[i]=sum6[i];
printf("Pbr_BBU[%d]= %f\n",i,P_BBU[i]); // //

printf("Final Call Blocking Probability of service class %d = %lf %%\n", i, 100 * (1-((1-sum5[i])*(1-sum6[i]))));
}

printf("\n\n BLOCKING PROBABILITIES WHEN ONLY BBU SYSTEM RETRIES\n\n");
for(i=1;i<=K;i++)
{
sum5[i]=0;
sum6[i]=0;

for(j=(C_RRH-(int)(b[i])+1);j<=C_RRH;j++) // //
{
sum5[i]=sum5[i]+EMLM_RRH(j); // // Blocking ths kathgorias k gia to teliko euros zwnis Bkr stin RRH
}

P_RRH[i]=sum5[i];
printf("Pbr_RRH[%d]= %f\n",i,P_RRH[i]);

for(j=(C_BBU-(int)(dR[S][i])+1);j<=C_BBU;j++) // //
{
sum6[i]=sum6[i]+retry_BBU(j); // // Blocking ths kathgorias k gia to teliko euros zwnis Bkr sto BBU
}
P_BBU[i]=sum6[i];
printf("Pbr_BBU[%d]= %f\n",i,P_BBU[i]); // //

printf("Final Call Blocking Probability of service class %d = %lf %%\n", i, 100 * (1-((1-sum5[i])*(1-sum6[i]))));
}
printf("\n\n");

```

```

}

double retry_RRH(int jj)
{
    int C_RRH1, C_BBU1, i1, j1, K1, S1, s11, N_antennas1;
    double b1[M], d1[M], bR1[M][M], dR1[M][M];
    double G1;
    double AR1[M][M], G11[M][N][M], temp21[M][N], temp31[M][N];
    double q11[N], A1[M], q1[N], q21[N];
    double sum1[N], sum31[M][N], sum51[N];

    FILE* source1;
    source1=fopen("multiretry.txt", "r");

    fscanf(source1, "%d %d %d %d", &N_antennas1, &C_RRH1, &C_BBU1, &K1, &S1); //
    for (i1=1; i1<=K1; i1++) // Eisagogi dedomenwn gia ton arithmo kathgoriwn
    { // fortio, apaitheis euros zwnis
        fscanf(source1, "%lf %lf %lf", &A1[i1], &b1[i1], &d1[i1]);
        //printf("RRH %lf %lf %lf\n", A1[i1], b1[i1], d1[i1]);
    } //
    // arithmo epanaklisewn

    for (i1=1; i1<=K1; i1++) //
    { //
        for (s11=1; s11<=S1; s11++) //
        { //
            fscanf(source1, "%lf %lf %lf", &AR1[s11][i1], &bR1[s11][i1], &dR1[s11][i1]); // Eisagwgi dedomenwn Retry Parameters kai o arithmos twm trunks
        } //
    } //
    fclose(source1); //

    for (i1=1; i1<=K1; i1++) //
    { //
        //printf("RRH b1: %f\n", b1[i1]); //
        bR1[0][i1]=b1[i1]; // -> Dhlwsh oti Bkro=Bk
        //printf("RRH dR: %f\n", bR1[0][i1]); //
    } //

    for (i1=1; i1<=K1; i1++) //
    { //
        for (j1=1; j1<=C_RRH1; j1++) //
        { //
            for (s11=1; s11<=S1; s11++) //
            { //
                //printf("%d, %f\n", j1, (C_RRH1+bR1[s11][j1]-bR1[s11-1][j1])); //
                if (j1>C_RRH1+bR1[s11][j1]-bR1[s11-1][j1]) //
                { // Ypologismos tou pinaka g tou tupou
                    G11[i1][j1][s11]=1; //
                } //
                else //
                { //
                    G11[i1][j1][s11]=0; //
                } //
            } //
        } //
    } //

    for (j1=1; j1<=C_RRH1; j1++) //
    { //
        for (i1=1; i1<=K1; i1++) //
        { //
            sum1[j1]=0; //
            sum31[i1][j1]=0; // Arxikopoihsh twm athraismatwn pou tha xrisimopoiouthoun
            sum51[j1]=0; //
        } //
    } //

    q1[0]=1;
    G1=q1[0];

    for (i1=(N-C_RRH1-1); i1<=1; i1++) //
    { //
        q1[i1]=0; // Dinoume thn plhroforia oti q[i]=0 gia i<0
    } //

    for (j1=1; j1<=C_RRH1; j1++) //
    { //
        for (i1=1; i1<=K1; i1++) //
        { //
            for (s11=1; s11<=S1; s11++) //
            { //
                temp31[i1][j1-(int)(bR1[s11][i1])]=AR1[s11][i1]*bR1[s11][i1]*G11[i1][j1][s11]*q1[j1-(int)(bR1[s11][i1])]; // -> 2os oros tou tupou
                sum31[i1][j1]=sum31[i1][j1]+temp31[i1][j1-(int)(bR1[s11][i1])]; // -> Ypologismos tou athraismatos tou 2ou orou tou tupou
            } //
            temp21[i1][j1-(int)(b1[i1])]=A1[i1]*b1[i1]*q1[j1-(int)(b1[i1])]; // -> 1os oros tou tupou
            sum1[j1]=sum1[j1]+temp21[i1][j1-(int)(b1[i1])]; // -> Ypologismos tou athraismatos tou 1ou orou tou tupou
            sum51[j1]=sum51[j1]+sum31[i1][j1]; // -> Sunoliko athraisma
        } //
        q1[j1]=(sum51[j1]+sum1[j1])/j1; // -> Ypologismos tou q(j) gia j>0
        G1=G1+q1[j1]; // -> Ypologismos tou athraismatos G twm g(j)
    } //

    for (j1=0; j1<=C_RRH1; j1++) //
    { //
        q11[j1]=q1[j1]/G1;
        if (jj==j1)
            q21[jj]=q11[j1];
        //printf("q[%d]=%f\n", jj, q21[jj]);
    } //
    return(q21[jj]);
}

```

```

double retry_BBU(int jjj)
{
    int C_RRH, C_BBU,i,j,K,S,s1, N_antennas;
    double b[M],d[M],bR[M][M],dR[M][M];
    double G;
    double AR[M][M],G1[M][N][M],temp2[M][N],temp3[M][N];
    double q1[N], A[M],q[N],q2[N];
    double sum[N], sum3[M][N],sum6[N];

    FILE* source;
    source = fopen("multiretry.txt","r");

    fscanf(source,"%d %d %d %d",&N_antennas,&C_RRH,&C_BBU,&K, &S);
    for (i=1;i<=K;i++) // Eisagogi dedomenwn gia ton arithmo kathgoriwn
    { // fortio, apaitheis euros zwnis
        fscanf(source,"%lf %lf %lf",&A[i],&b[i],&d[i]);
    } // arithmo epanaklisewn

    for (i=1;i<=K;i++) //
    { //
        for(s1=1;s1<=S;s1++) //
        { // Eisagogi dedomenwn Retry Parameters kai o arithmos twv trunks
            fscanf(source,"%lf %lf %lf",&AR[s1][i],&bR[s1][i],&dR[s1][i]);
        } //
    } //
    fclose(source);

    for (i=1;i<=K;i++) //
    { //
        dR[0][i] = d[i]; // -> Dhlwsh oti Bkro=Bk
        //printf("dR: %f\n", dR[0][i] ); //
    } //

    for(i=1;i<=K;i++) //
    { //
        for (j=1;j<=C_BBU;j++) //
        { //
            for(s1=1;s1<=S;s1++) //
            { //
                //printf("%d , %f\n", j, (C_BBU + dR[s1][i] - dR[s1-1][i])); //
                if (j > (C_BBU + dR[s1][i] - dR[s1-1][i])) // Ypologismos tou pinaka g tou tupou
                { //
                    G1[i][j][s1]=1; //
                } //
                else //
                { //
                    G1[i][j][s1]=0; //
                } //
            } //
            //printf("%f\n", G1[i][j][s1]); //
        } //
    } //

    for(j=1;j<=C_BBU;j++) //
    { //
        for(i=1;i<=K;i++) //
        { //
            sum[j]=0; //
            sum3[i][j]=0; // Arxikopoihsh twv athroismatwn pou tha xrisimopoihthoun //
            sum6[j]=0; //
        } //
    } //

    q[0]=1;
    G=q[0];

    for(i=-(N-C_BBU-1);i<=-1;i++) //
    { //
        q[i]=0; // Dinoume thn plhroforia oti q[i]=0 gia i<0
    } //

    for (j=1;j<=C_BBU;j++) //
    { //
        for(i=1;i<=K;i++) //
        { //
            for(s1=1;s1<=S;s1++) //
            { //
                temp3[i][j-(int)(dR[s1][i])]=N_antennas*AR[s1][i]*dR[s1][i]*G1[i][j][s1]*q[j-(int)(dR[s1][i])]; // -> 2os oros tou tupou
                sum3[i][j]=sum3[i][j]+temp3[i][j-(int)(dR[s1][i])]; // -> Ypologismos tou athroismatos tou 2ou orou tou tupou
            } //
            temp2[i][j-(int)(d[i])]=N_antennas*A[i]*d[i]*q[j-(int)(d[i])]; // -> 1os oros tou tupou
            sum[j]=sum[j]+temp2[i][j-(int)(d[i])]; // -> Ypologismos tou athroismatos tou 1ou orou tou tupou
            sum6[j]=sum6[j]+sum3[i][j]; // -> Sunoliko athroisma
        } //
        q[j]=(sum6[j]+sum[j])/j; // -> Ypologismos tou q(j) gia j>0
        G=G*q[j]; // -> Ypologismos tou athroismatos G twv g(j)
    } //

    for(j=0;j<=C_BBU;j++) //
    { //
        q1[j]=q[j]/G;
        if (jjj==j)
        { //
            q2[j]=q1[j];
            //printf("q[%d]=%f\n",jj, q2[j]);
        } //
    } //
    return(q2[jjj]);
}

```

```

double EMLM_BBU(int jjj) // -> Sunartsisi ypologismou Blocking gia polidiastati kir
{ //
int C_BBU,i,j,K,d[M],b[M],N_antennas,C_RRH, S; //
double G; //
double temp2[M][N]; //
double A[M], q[N],sum[N],sum3[N],Pb[M],q1[M],q2[M]; //
FILE*source;
source=fopen("multiretry.txt","r");

fscanf(source,"%d %d %d %d %d",&N_antennas,&C_RRH,&C_BBU,&K, &S);
for (i=1;i<=K;i++) //
{ //
fscanf(source,"%lf %d %d",&A[i],&b[i],&d[i]); //
} //
fclose(source);

for(i=1;i<=K;i++)
{
A[i]=N_antennas*A[i];
}

for(j=1;j<=C_BBU;j++) // -> Arxikopoihsh tw n a8roismatwn tou tupou
{ //
sum[j]=0; //
sum3[j]=0; //
} //
q[0]=1; //
G=q[0]; //
for(i=-(N-C_BBU-1);i<=-1;i++) // -> Dinoume thn plhroforia oti q[i]=0 gia i<0
{
q[i]=0;
}

for (j=1;j<=C_BBU;j++) //
{ //
for(i=1;i<=K;i++) //
{ //
temp2[i][j-d[i]]=A[i]*d[i]*q[j-d[i]]; //
sum[j]=sum[j]+temp2[i][j-d[i]]; // -> Ypologismos tou q(j) gia j>0
} //
q[j]=sum[j]/j; //
G=G+q[j]; // -> Ypologismos tou a8roismatos G tw n g(j)
} //

for(i=1;i<=K;i++) //
{ //
for(j=(C_BBU-d[i]+1);j<=C_BBU;j++) //
{ //
sum3[i]=sum3[i]+q[j]; //
} //
} //
} //

```

```

for(j=0;j<=C_BBU;j++)
{
q1[j]=q[j]/G;
if (jjjj==j)
q2[jjjj]=q1[j];
}
return(q2[jjjj]);
}

double EMLM_RRH(int jjjj) // -> Sunartsisi ypologismou Blocking gia polidiastati kinisi
{
int C_BBU1,i1,j1,K1,b1[M],d1[M], N_antennas1,C_RRH1, S1; //
double G1; //
double temp2_1[M][N]; //
double A1[M], q1[N],sum_1[N],sum2_1[N], q_1[M],q2_1[M]; //
FILE*source;
source=fopen("multiretry.txt","r");

fscanf(source,"%d %d %d %d %d",&N_antennas1,&C_RRH1,&C_BBU1,&K1, &S1);
for (i1=1;i1<=K1;i1++) //
{
fscanf(source,"%lf %d %d",&A1[i1],&b1[i1],&d1[i1]); //
}
fclose(source);

for(j1=1;j1<=C_RRH1;j1++) // -> Arxikopoihsh tw'n a8roismatwn tou tupou
{
sum_1[j1]=0; //
sum2_1[j1]=0; //
}
q_1[0]=1; //
G1=q_1[0]; //
for(i1=-(N-C_RRH1-1);i1<=-1;i1++) // -> Dinoume thn plhroforia oti q[i]=0 gia i<0
{
q_1[i1]=0;
}

for (j1=1;j1<=C_RRH1;j1++) //
{
for(i1=1;i1<=K1;i1++) //
{
temp2_1[i1][j1-b1[i1]]=A1[i1]*b1[i1]*q_1[j1-b1[i1]]; //
sum_1[j1]=sum_1[j1]+temp2_1[i1][j1-b1[i1]]; // -> Ypologismos tou q(j) gia j>0
}
q_1[j1]=sum_1[j1]/j1; //
G1=G1+q_1[j1]; // -> Ypologismos tou a8roismatos G tw'n g(j)
}

for(i1=1;i1<=K1;i1++) //
{
for(j1=(C_RRH1-b1[i1]+1);j1<=C_RRH1;j1++) //
{
sum2_1[i1]=sum2_1[i1]+q_1[j1]; //
}
}

for(j1=0;j1<=C_RRH1;j1++) //
{
q_1[j1]=q_1[j1]/G1;
if (jjjj==j1)
q2_1[jjjj]=q_1[j1];
}
return(q2_1[jjjj]);
}

```