



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
“ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑ”**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)  
και Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε δίκτυα LTE-A**

**Ιωάννα Χ. Καρούντζου**

**Επιβλέπων: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)  
και Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε δίκτυα LTE-A**

**Ιωάννα Χ. Καρούντζου  
Α.Μ.: M1211**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Λάζαρος Μεράκος, Καθηγητής ΕΚΠΑ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2014**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο τομέας των τηλεπικοινωνιών έχει εξελιχθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Η εισαγωγή πολυμεσικών και απαιτητικών υπηρεσιών καθώς και η ραγδαία αύξηση των χρηστών απαιτούν καλύτερη και εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, (QoS)). Ενώ για τη συνεχή παρακολούθηση του δικτύου και των υπηρεσιών που παρέχονται, οι τηλεπικοινωνιακοί πάροχοι δύνανται να εκτιμήσουν την εμπειρία που αντιλαμβάνεται ο τελικός χρήστης (Quality of Experience, (QoE)).

Πρόσφατα, η 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) ανέπτυξε το δίκτυο LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) με στόχο την επίτευξη επιδόσεων επιπέδου 4G, όπως αυτές ορίζονται από την ITU-R στο IMT-Advanced. Το LTE-A παρέχει υψηλές ταχύτητες, μέγιστο εύρος ζώνης, αυξημένη χωρητικότητα και απόδοση σε σύγκριση με τα υφιστάμενα δίκτυα, ενώ η υποστήριξη QoS και QoE στα δίκτυα αυτά είναι μια ανοιχτή πρόκληση.

Στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής μελετώνται τρόποι υποστήριξης QoS και QoE σε δίκτυα LTE-A. Αρχικά, γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα και στη συνέχεια αναφορά στην αρχιτεκτονική του δικτύου LTE-A. Σε ότι αφορά την υποστήριξη QoS, ο κομβικός ρόλος της λειτουργίας Policy control and charging rules function (PCRF) του δικτύου κορμού του LTE-A μελετάται αναλυτικά. Για την εκτίμηση και παροχή υψηλής QoE στο LTE-A όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που σχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με την QoE διαχειρίζονται σε ένα κεντρικό σημείο του δικτύου, το οποίο συλλέγει δείκτες επιδόσεων και δίνει εντολές διαχείρισης με βάση την QoE.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Υποστήριξη Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε δίκτυα LTE-A.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** κόμβος, διεπαφή, κομιστής, ροή δεδομένων, δείκτης

## **ABSTRACT**

The telecommunication sector has grown rapidly in recent years. The introduction of multimedia and demanding services and the rapid growth of users require better and guaranteed QoS (Quality of Service, (QoS)) while continuously monitoring the network and services provided by telecommunications providers may assess the experience perceived by the end-users (Quality of Experience, (QoE)).

Recently the 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) developed the LTE-A (Long Term Evolution-Advanced) network to achieve 4G requirements as defined by ITU-R in IMT-Advanced. LTE-A aims at providing high speeds, wide bandwidth usage and increased capacity and performance compared to existing networks, while the support of QoS and QoE in such networks is an open challenge.

This thesis studies ways to support QoS and QoE network in LTE-A networks. First, a brief historical review of telecommunications systems is provided leading to the description of the LTE-A network. Considering the QoS, the key role of the operating Policy control and charging rules function (PCRF) backbone network of LTE-A is studied in detail. To assess and delivery high QoE in LTE-A all the necessary information related directly or indirectly to the QoE managed at a central point in the network, which collects performance indicators and gives commands for QoE-based management.

**SUBJECT AREA:** Support Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) in LTE-A networks

**KEYWORDS:** node, interface, bearer, data flow, indicator

Αυτή η προσπάθεια αφιερώνεται στη μνήμη του πατέρα μου.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Λάζαρο Μεράκο υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση αυτής και τη δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και τον κ. Δημήτρη Τσόγκα, επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για την καταλυτική βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

Ιωάννα Καρούντζου

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b> .....	<b>11</b>
<b>1. ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ</b> .....	<b>12</b>
<b>2. LONG TERM EVOLUTION – ADVANCED (LTE-A)</b> .....	<b>17</b>
2.1 Προδιαγραφές .....	18
2.2 Αρχιτεκτονική E-UTRAN και LTE-A .....	20
2.2.1 Σταθμός βάσης evolved Node B (eNodeB) .....	21
2.2.1.1 Διεπαφή X2 .....	22
2.2.1.2 Διεπαφή S1 .....	23
2.2.1.3 Εξοπλισμός χρήστη (User Equipment, UE) .....	23
2.2.2 Evolved Packet Core (EPC) .....	24
2.2.2.1 Policy control and charging rules function (PCRF) .....	24
2.2.2.2 Home subscriber server (HSS) .....	24
2.2.2.3 Packet Data Network Gateway (P-GW) .....	25
2.2.2.4 Serving Gateway (S-GW) .....	25
2.2.2.5 Mobile Management Entity (MME) .....	26
2.2.2.6 Application Function (AF) .....	26
2.2.2.7 Subscription Profile Repository (SPR) .....	27
2.2.2.8 Traffic Detection Function (TDF) .....	27
2.2.2.9 Online Charging System (OCS) .....	27
2.2.2.10 Offline Charging System (OFCS) .....	27
2.2.3 Femtocells .....	27
2.2.3.1 Εισαγωγή .....	27
2.2.3.2 Λειτουργικότητα των femtocells .....	29
<b>3. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ QoS ΣΤΟ LTE-A</b> .....	<b>34</b>
3.1 Quality of Service, (QoS) .....	34
3.1.1 Σημαντικές παράμετροι για την QoS .....	35
3.1.2 Τα δομικά στοιχεία της QoS .....	35
3.2 QoS στο LTE-A .....	36
3.2.1 QoS παράμετροι σε επίπεδο bearer .....	40
3.2.2 QoS Class Identifier, (QCI) .....	41
3.3 Υποστήριξη QoS μέσω της PCRF .....	42
3.3.1 QoS μηχανισμοί .....	42
3.3.1.1 Διαδικασίες επιπέδου ελέγχου σηματοδότησης .....	42
3.3.1.2 Λειτουργίες επιπέδου χρήστη .....	43
3.3.1.3 Λειτουργίες επιπέδου ροής πακέτου .....	43
3.3.1.4 Λειτουργίες επιπέδου bearer .....	43
3.3.1.5 Λειτουργίες επιπέδου DSCP .....	45
3.3.2 Εγκατάσταση bearer πυροδοτούμενη είτε από το δίκτυο είτε από το τελικό .....	45
3.3.3 Policy and Charging Control (PCC) .....	47
3.3.3.1 Η αρχιτεκτονική PCC .....	47
3.3.3.2 Πολλαπλή πρόσβαση και το «off-path» μοντέλο της PCC .....	48
3.3.3.3 Βασικές έννοιες PCC .....	49
3.3.3.3.1 PCC αποφάσεις .....	49
3.3.3.3.2 Δέσμευση bearer στο δίκτυο πρόσβασης .....	51
3.3.3.3.3 Υπηρεσία δεδομένων και ανίχνευση ροής .....	52
3.3.3.3.4 Ανανεωμένες πολιτικές αποφάσεις συνόδου και έναρξη γεγονότων .....	52
3.4 Volte .....	53
3.4.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου για τη διαδικασία Volte .....	55
3.4.2 Τα στάδια της διαδικασία Volte .....	57
<b>4. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ QOE ΣΤΟ LTE-A</b> .....	<b>60</b>

4.1. User experience (UX) .....	60
4.2 QoE οικοσύστημα .....	60
4.3 Customer Experiences Management System (CEMS) .....	62
4.4 QoE στο LTE-A.....	63
4.4.1. Η συλλογή των Δεικτών Απόδοσης.....	64
4.5 Key performance indicators (KPIs) Monitoring .....	65
4.5.1 Οι KPIs παρακολουθούνται από τον DPI. ....	65
4.5.2 KPIs που παρακολουθούνται στα τερματικά .....	67
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ .....</b>	<b>71</b>
<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>72</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>76</b>



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Χρονολογική αναδρομή τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [1] .....	12
Εικόνα 2: Releases της 3PPP.....	13
Εικόνα 3: LTE ως μελλοντική πλατφόρμα ασύρματης τεχνολογίας .....	16
Εικόνα 4: Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE-A [11].....	17
Εικόνα 5: Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική 3GPP LTE και LTE-A EPS [3].....	21
Εικόνα 6: Συνολική Αρχιτεκτονική E-UTRAN.....	23
Εικόνα 7: Τα femtocells συνδέονται με το CN διαμέσου της backhaul σύνδεσης του χρήστη [13].....	29
Εικόνα 8: Τα δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του framework της QoS [14].....	35
Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική υπηρεσιών EPS φορέα [4] .....	37
Εικόνα 10: Οι default και dedicated bearers και οι συσχετιζόμενες παράμετροι QoS [21] .....	39
Εικόνα 11: Η προβολή των διαδικασιών σηματοδότησης για τον έλεγχο των λειτουργιών της QoS [21] .....	42
Εικόνα 12: Οι λειτουργίες QoS στο επίπεδο του χρήστη [21] .....	43
Εικόνα 13: Οι διαφορές του δίκτυο-initiated (πάνω) με το τερματικό-initiated (κάτω) για τον έλεγχο της QoS [21] .....	45
Εικόνα 14: Αρχιτεκτονική της PCC χωρίς περιαγωγή [22].....	47
Εικόνα 15: Υψηλού επιπέδου περίπτωση χρήσης της PCC στο EPS για το μοντέλο on-path [22].....	50
Εικόνα 16: Ανίχνευση SDF και δέσμευση bearer στην κατερχόμενη ζεύξη [22] .....	52
Εικόνα 17: Η ροή πληροφοριών για το μοντέλο off-path [22] .....	53
Εικόνα 18: Η χρονική εξέλιξη του Volte [16] .....	54
Εικόνα 19: Οι φάσεις που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη της μετάδοσης φωνής [17].....	55
Εικόνα 20: Οι κόμβοι που απαρτίζουν το IMS δίκτυο για τη διαδικασία Volte [15].....	56
Εικόνα 21: Οι διασυνδέσεις Volte στο User Network Interface (UNI) μεταξύ συσκευής και δικτύου [18].....	57
Εικόνα 22: Volte end-to-end [18] .....	57
Εικόνα 23: Η εγγραφή του UE και πιστοποίηση του από IMS και LTE [18].....	58
Εικόνα 24: Bearer σηματοδότησης και dedicated bearer για την τηλεφωνία [18] .....	58
Εικόνα 25: QoE οικοσύστημα [20] .....	62
Εικόνα 26: Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική CEMS [20].....	62
Εικόνα 27: Λεπτομερής αρχιτεκτονική CEMS [20].....	63
Εικόνα 28: Η QoE αρχιτεκτονική [3].....	64

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κύριες Προδιαγραφές IMT Advanced [10] .....	18
Πίνακας 2: 3GPP Case 1 model [10] .....	19
Πίνακας 3: Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση κατά περίπτωση [10] .....	19
Πίνακας 4: Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση για χρήστες στα όρια της κυψέλης [10] .....	20
Πίνακας 5: Κύριες διαφορές μεταξύ των femtocells με τα picocells [13] .....	31
Πίνακας 6: Τυποποιημένοι QoS Class Identifiers (QCIs) για το LTE [7].....	41
Πίνακας 7: Ένα υποσύνολο στοιχείων που περιλαμβάνονται σε έναν κανόνα PCC [22] .....	51
Πίνακας 8: Οι KPIs που μετριοούνται σε κάθε επίπεδο πρωτοκόλλου [3] .....	70

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι τηλεπικοινωνίες ήταν ανέκαθεν ένας τομέας ραγδαία εξελισσόμενος με βάση τις ανάγκες της κάθε εποχής. Ο στόχος είναι οι πολυμεσικές τηλεπικοινωνίες να παρέχουν υπηρεσίες οποτεδήποτε και οπουδήποτε με εγγυημένη ποιότητα.

Η ιστορία των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαδοχικές γενιές δικτύων. Την αναλογική γενιά ή 1G ακολούθησε η ψηφιακή γενιά ή 2G. Το όραμα της 3G που ακολούθησε ήταν να απελευθερώσει πλήρως τη μετάδοση πολυμεσικών υπηρεσιών, όπως η φωνητική επικοινωνία.

Το LTE-A θεωρείται το πιο εξελιγμένο τηλεπικοινωνιακό σύστημα, που στοχεύει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των δικτύων τέταρτης γενιάς-4G. Το δίκτυο αποτελείται από το Evolved Packet Core (EPC) και το Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Ενώ το EPC αποτελείται από πολλούς λογικούς κόμβους, το E-UTRAN αποτελείται από έναν μόνο κόμβο, τον Evolved Node B (eNodeB), ο οποίος συνδέεται με τους User Equipments (UEs). Ένας από τους κύριους κόμβους του EPC είναι η Policy control and charging rules function (PCRF), η οποία είναι υπεύθυνη για την Policy and Charging Control (PCC) και μέσω διαδικασιών και λειτουργιών συντελεί στην υποστήριξη της Quality of Service (QoS).

Η δόκιμη μονάδα για την QoS στα δίκτυα LTE-A ονομάζεται bearer. Ο bearer φέρει την πληροφορία που επιτρέπει τη διαφορετική διαχείριση της κυκλοφορίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις QoS. Το δίκτυο LTE-A ορίζει ένα σύνολο προκαθορισμένων QoS Class Identifier (QCI) μεταβλητών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Ανάλογα με τον τύπο QCI που χαρακτηρίζει τον bearer, αυτό χαιρεί διαφορετικής μεταχείρισης από τον eNodeB.

Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον για την QoE έχει αυξηθεί σημαντικά σαν μια φυσική προέκταση της QoS, δεδομένου ότι δεν στηρίζεται στις παραδοσιακές μετρήσεις της απόδοσης αλλά στοχεύει στην αξιολόγηση της απόδοσης με βάση την εμπειρία του χρήστη. Μια από τις βασικές αρχές για την υποστήριξη της QoE στο LTE-A είναι η εκτίμηση και η παρακολούθηση σημαντικών παραμέτρων επίδοσης (Key Performance Indicators,(KPIs)).

## 1. ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ο όρος «γενιά» (generation) όταν χρησιμοποιείται σχετικά με την εξέλιξη των κυψελωτών δικτύων δεν είναι πάντα ακριβής. Παρόλα αυτά, πολλοί συχνά αναφέρονται σε 2G, 3G και σε 4G όταν πρόκειται για διαφορετικές γενιές κινητών τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 1.

• <b>1G FDMA (NMT, AMPS, TACS)</b> -Voice(analog traffic, digital signaling)		80's
• <b>2G TDMA (GSM, D-AMPS, PDC) and CDMA (IS-95)</b> -Voice, SMS, CS data transfer ~ 9.6 kbit/s (50 kbit/s HSCSD)		90's
• <b>2.5G TDMA (GPRS)</b> -PS data transfer ~ 50kbit/s		00's
• <b>3-3.5G WCDMA (UMTS) and CDMA 2000</b> -PS & CS data transfer ~ 14-42 Mbits/s (HSPA/HSPA+), Voice, SMS		00's
• <b>3.9G OFDMA (LTE/SAE)</b> -PS Data and Voice (VoIP) ~ 100Mbit/s		10's
• <b>4G IMT Advanced</b>		

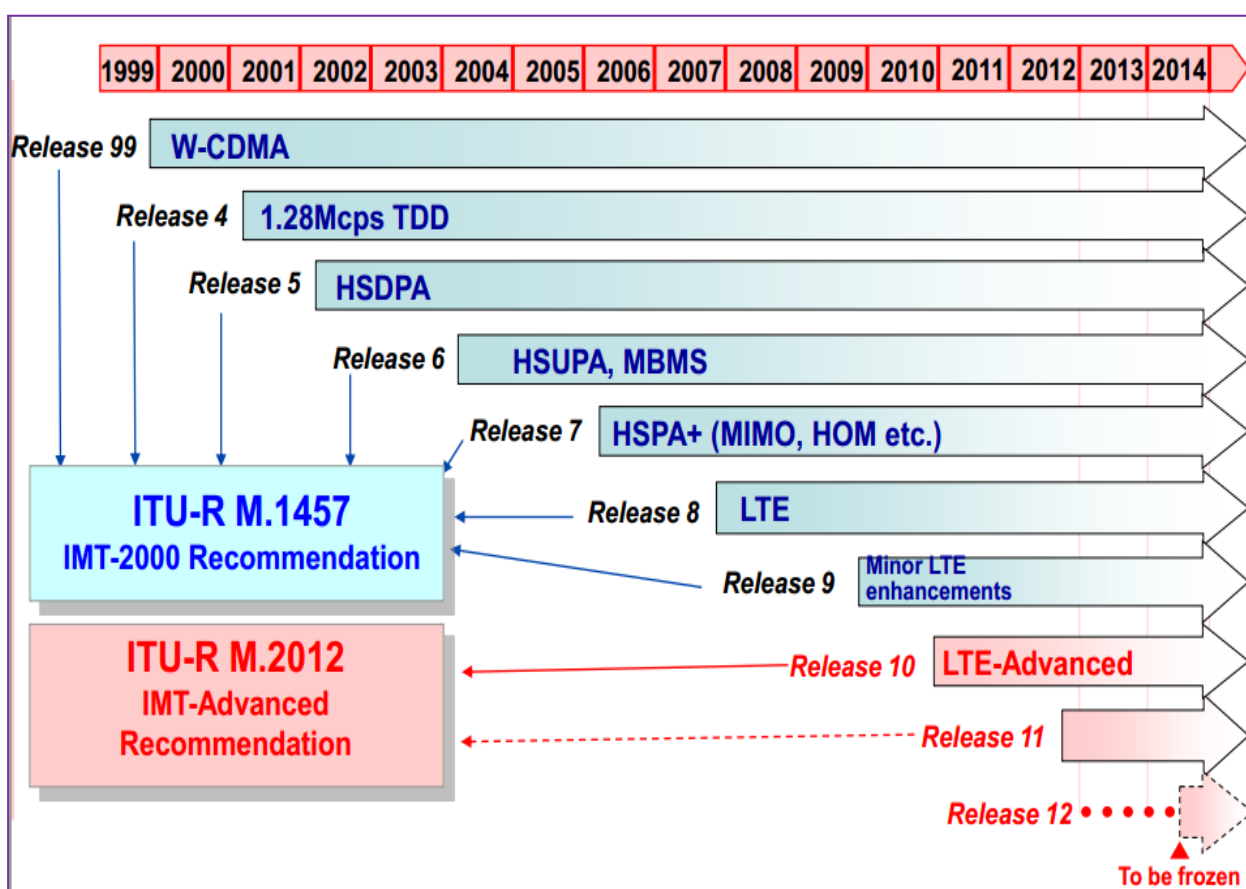
Εικόνα 1: Χρονολογική αναδρομή τηλεπικοινωνιακών συστημάτων [1]

Η πρώτη γενιά (1G) των σύγχρονων κυψελωτών δικτύων περιλαμβάνει τα συστήματα: NMT(Nordic Mobile Telephony), AMPS (Advanced Mobile Phone Service) και TACS (TOTAL Access Communication System). Σε αυτά τα συστήματα κοινό χαρακτηριστικό είναι η επικοινωνία φωνής μεταξύ των χρηστών, η οποία γίνεται με χρήση της τεχνικής FDMA(Frequency Division Multiple Access) με αναλογικό τρόπο μετάδοσης.

Η δεύτερη γενιά (2G) περιλαμβάνει συστήματα όπως τα GSM (Global System for Mobile communications), D-AMPS (Dual-mode AMPS), PDC (Personal Digital Communications) και Interim Standard 95 (IS-95). Τα συστήματα αυτά υποστηρίζουν επικοινωνία φωνής και δεδομένων κάνοντας χρήση τεχνικών TDMA (Time Division Multiple Access) ή CDMA (Code Division Multiple Access) και χρησιμοποιώντας ψηφιακή μετάδοση με τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος. Βελτιώσεις της 2G, όπως η εισαγωγή του GPRS (General Packet Radio Service) για μεταγωγή πακέτων, συχνά αναφέρεται ως 2.5G, ενώ η EDGE (Enhanced Data rates for GSM and TDMA Evolution) αναφέρεται ως 2.75G.

Η τρίτη γενιά (3G) βασίζεται στο πρότυπο IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000), το οποίο ξεκίνησε το 1986 από την ITU (International

Telecommunication Union). Το 1992, η WARC (World Administrative Radio Conference) όρισε τις μπάντες ραδιοσυχνοτήτων 1885-2015 και 2110-2200 MHz ως παγκόσμιο φάσμα για τα 3G συστήματα. Το 1998 ιδρύθηκε η 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project), μια συμφωνία συνεργασίας, η οποία εργάστηκε σε τηλεπικοινωνιακά πρότυπα, όπως τα ARIB (Association of Radio Industries and Businesses), CCSA (China Communications Standards Association), ETSI (European Telecommunications Standardization Institute), TTA (Telecommunications Technology Association) και TTC (Telecommunication Technology Committee). Το βασικό αντικείμενο της 3GPP ήταν να παράγει εφαρμόσιμες Τεχνικές Ειδικεύσεις και Τεχνικές Αναφορές για συστήματα κινητών επικοινωνιών 3<sup>ης</sup> γενιάς, τα οποία βασίζονται στα εξελιγμένα GSM δίκτυα κορμού και στις τεχνολογίες ασύρματης πρόσβασης που υποστηρίζουν. Έπειτα, το πλαίσιο τροποποιήθηκε για να συμπεριλάβει τη συντήρηση, την ανάπτυξη του GSM, τις τεχνικές ειδικεύσεις και τις τεχνικές αναφορές συμπεριλαμβανομένου των τεχνολογιών ασύρματης πρόσβασης.



Εικόνα 2: Releases της 3PPP

Στην Εικόνα 2 διακρίνουμε ότι η πρώτη πρακτικά εφαρμόσιμη 3GPP έκδοση για 3<sup>ης</sup> γενιάς συστήματα ήταν το W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access), το οποίο εκδόθηκε το 1999 και καλείται Release 99. Η έκδοση W-CDMA Release 99 υποστηρίζει επικοινωνία με μεταγωγή κυκλώματος και μεταγωγή πακέτου μέχρι ενός θεωρητικού ρυθμού 2 Mbps.

Μετά την Release 99, η 3GPP έπειτα από ένα χρόνο σταμάτησε την ονοματοδοσία εκδόσεων και επέλεξε ένα νέο σχήμα που ξεκίνησε με την Release 4. Η Release 4

παρουσίασε την 1,28 Mcps περιορισμένης ζώνης έκδοση του W-CDMA γνωστή ως TDD (Time Division Duplex). Επιπλέον, εισήγαγε την έννοια BICN (Bearer-Independent Core Network). Δηλαδή, τα δεδομένα μεταφέρονται μέσω IP πακέτων, αντί να χρησιμοποιείται μεταγωγής κυκλώματος 64 kbit/s χρονοθυρίδων. Η χρήση μεταγωγής πακέτου τόσο για τα δεδομένα όσο για τη φωνή βοήθησε τους διαχειριστές των δικτύων να μειώσουν τα κόστη τους.

Στην Release 5 εισήχθησαν το IMS (IP Multimedia Subsystem) και οι packet-based υπηρεσίες δεδομένων στο UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) μέσω της HSDPA (High Speed Downlink Packet Access). Η HSDPA πέτυχε καλύτερη απόδοση φάσματος και υψηλότερο κατερχόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η ολοκλήρωση των πακέτων δεδομένων για το UMTS επιτεύχθηκε στην Release 6 με την προσθήκη της HSUPA (High Speed Uplink Packet Access). Η HSUPA αύξησε τον ανερχόμενο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Η HSDPA και η HSUPA αναφέρονται ως HSPA (High Speed Packet Access) [10].

Η Release 7 περιέχει την πρώτη εργασία πάνω στο LTE (Long Term Evolution)/SAE (System Architecture Evolution) με την ολοκλήρωση μελετών και τις περαιτέρω βελτιώσεις που έγιναν στο HSPA, όπως είναι η κατερχόμενη σύνδεση MIMO (Multiple Input and Multiple Output). Δηλαδή, η Release 7 ήταν το HSPA evolution ή HSPA+, το οποίο σχεδιάστηκε με σκοπό να μεγιστοποιήσει τους ρυθμούς μετάδοσης. Η Release 8 συνεχίζει την εξέλιξη με την προσθήκη μικρότερων χαρακτηριστικών όπως το dual cell HSDPA. Ωστόσο, η κύρια εργασία της Release 8 είναι η προδιαγραφή των LTE και SAE.

Το UMTS με τα HSDPA και HSUPA, καθώς και το HSPA+ προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων. Ωστόσο, η αυξημένη ζήτηση ασύρματων υπηρεσιών αλλά και το διαρκώς μειωμένο κόστος στον τελικό χρήστη οδήγησε στην ανάγκη σχεδίασης προτύπων με υψηλότερη απόδοση από άποψη κόστους και φάσματος σε σχέση με τα ήδη υπάρχοντα. Η 3GPP έθεσε τις απαιτήσεις για μια νέα ασύρματη διεπαφή την E-UTRAN (Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network) και ένα εξελιγμένο δίκτυο κορμού το EPC (Evolved Packet Core), ώστε να είναι εφικτή η παροχή quadruple play υπηρεσιών (κινητή τηλεφωνία, μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων και υψηλή ταχύτητα σε διαδραστικές εφαρμογές) με υποστήριξη αυξημένης κινητικότητας χρηστών.

Οι εργασίες ξεκίνησαν επίσημα το καλοκαίρι του 2006 με την ανάπτυξη του LTE στην Release 8, το οποίο αποτελείται από το E-UTRAN και το EPC. Αυτά τα δύο μαζί (E-UTRAN + EPC) απαρτίζουν το EPS (Evolved Packet System), το οποίο καθορίζει τη δρομολόγηση της IP (Internet Protocol) κίνησης από το δίκτυο πακετοδοσμένων (Packet Data Network, (PDN)) στο UE (User Equipment). Το δίκτυο του LTE στο σύνολο του είναι δίκτυο μεταγωγής πακέτου και υποστηρίζει ποιότητα υπηρεσίας καθώς και σχήματα FDD (Frequency Division Duplex) και TDD. Δηλαδή, χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος είναι ότι πρόκειται για ένα βελτιωμένο σύστημα, επίπεδης αρχιτεκτονικής, που βασίζεται πλήρως σε μεταγωγή πακέτων, σε αντίθεση με τα παλαιότερα που βασίζονταν σε μεταγωγή κυκλώματος. Το E-UTRAN είναι εναέρια διεπαφή (air interface) του LTE του 3GPP για δίκτυα κινητών επικοινωνιών, πρόκειται να αντικαταστήσει τις τεχνολογίες UMTS, HSDPA και HSUPA. Το δίκτυο αυτό παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μεγάλη φασματική ευελιξία, μικρότερη καθυστέρηση

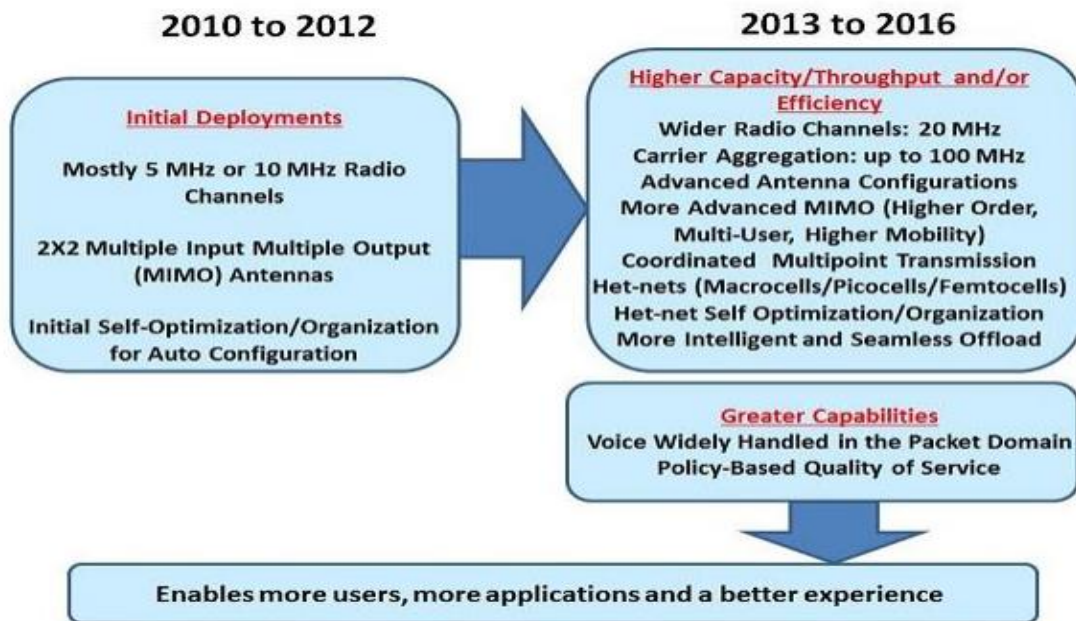
διάδοσης και βελτιωμένη μεταφορά πακέτων δεδομένων, χρησιμοποιώντας OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) για το downlink και SC-FDMA (Single Carrier FDMA) για το uplink.

Η προτυποποίηση του LTE αποτέλεσε σημαντικό βήμα για τις παγκόσμιες τηλεπικοινωνίες. Η Release 9 που ακολούθησε, εμπλούτισε την προϋπάρχουσα έκδοση χωρίς τροποποιήσεις στην υποδομή και αρχιτεκτονική. Με την βελτίωση της δυνατότητας μεταδόσεων MIMO 4x4, δηλαδή τέσσερις κεραιές παράλληλης μετάδοσης στο δέκτη και τέσσερις στον πομπό, τριπλασίασε σχεδόν τη μέγιστη ταχύτητα. Η έκδοση αυτή εισήγαγε ακόμα το MBSFN (Multicast Broadcast Single Frequency Network) για υπηρεσίες όπως Mobile TV και έθεσε συγκεκριμένες προδιαγραφές για την υποστήριξη αυτό-οργανώσιμων (self-organizing) και ετερογενών δικτύων (femtocells, picocells).

Οι εκδόσεις αυτές δεν κάλυπταν πλήρως τις προδιαγραφές του IMT Advanced και για αυτό αρχικά χαρακτηρίστηκαν 3.9G τεχνολογίες. Παρόλο αυτά, υπό την πίεση του μάρκετινγκ, τελικά προωθήθηκαν εμπορικά ως συστήματα τέταρτης γενιάς.

Η Release 10 που ακολούθησε, κατατέθηκε για έγκριση το 2009 και οριστικοποιήθηκε το 2011, όπου βελτίωνε αρκετά στοιχεία προηγούμενων εκδόσεων. Η έκδοση αυτή επέτρεπε βελτιωμένες τεχνικές MIMO 8x8 και εισήγαγε τη δυνατότητα συνάθροισης των φορέων (Carrier Aggregation, (CA)) αυξάνοντας την ταχύτητα και το μέγιστο εύρος ζώνης από τα 20 MHz στα 100 MHz. Πέραν των παραπάνω, η νέα έκδοση εισάγει ή βελτιώνει αρκετά ακόμα χαρακτηριστικά. Τα σημαντικότερα από αυτά, είναι η δυνατότητα CoMP (Coordinated Multipoint) μετάδοσης και λήψης, η αναβάθμιση της δυνατότητας του δικτύου για συντονισμό με στόχο την αντιμετώπιση παρεμβολών στα ετερογενή δίκτυα, η διασύνδεση μεταξύ των eNodeB (evolved Node B) η υποστήριξη relaying καθώς και σαφείς προδιαγραφές των HeNBs (Home eNodeBs), δηλαδή των σταθμών βάσης των femtocells για την τεχνολογία LTE-A (LTE-Advanced). Η έκδοση αυτή ήταν η πρώτη που κάλυπτε τις απαιτήσεις IMT Advanced ώστε να θεωρηθεί 4G. Για αυτό το λόγο, η Release 10 ονομάστηκε LTE-A και τέθηκε υποψήφια στον οργανισμό ITU για το παγκόσμιο πρότυπο 4G.

Η εξέλιξη είναι συνεχής και υποστηρίζεται έντονα από την ισχυρή παγκόσμια αποδοχή του LTE-A ως πρότυπο 4G. Η εξέλιξη αυτή του LTE-A οδήγησε στην Release 11, η οποία περιλαμβάνει βελτιώσεις των χαρακτηριστικών της προηγούμενης έκδοσης, όπως βελτιώσεις στους CA, στη CoMP και στο ICIC (Inter-cell interference coordination). Επίσης, εισήχθησαν νέες τεχνολογίες όπως η δέσμευση ραδιοσυχνοτήτων, MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services), SON (Self Organizing Networks), EPDCCH (Enhanced Physical Control Channel) και FeICIC (Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination). Ο κύριος λόγος εισαγωγής των παραπάνω τεχνολογιών και των βελτιώσεων είναι η αποτελεσματική υποστήριξη της τοπολογίας του ετερογενούς δικτύου.



Εικόνα 3: LTE ως μελλοντική πλατφόρμα ασύρματης τεχνολογίας

Το LTE είναι μια από τις πιο ελπιδοφόρες πλατφόρμες της ασύρματης τεχνολογίας για το μέλλον. Η σημερινή Release 12 αποτελεί εξέλιξη της Release 11 με απώτερο στόχο να αυξηθεί η απόδοση, η αποτελεσματικότητα και η χωρητικότητα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Οι εργασίες πάνω στα Releases 12 και 13 θα συνεχίσουν αυτήν την καινοτομία μέχρι το τέλος της δεκαετίας [2]. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε την αρχιτεκτονική του LTE-A (Release 10).



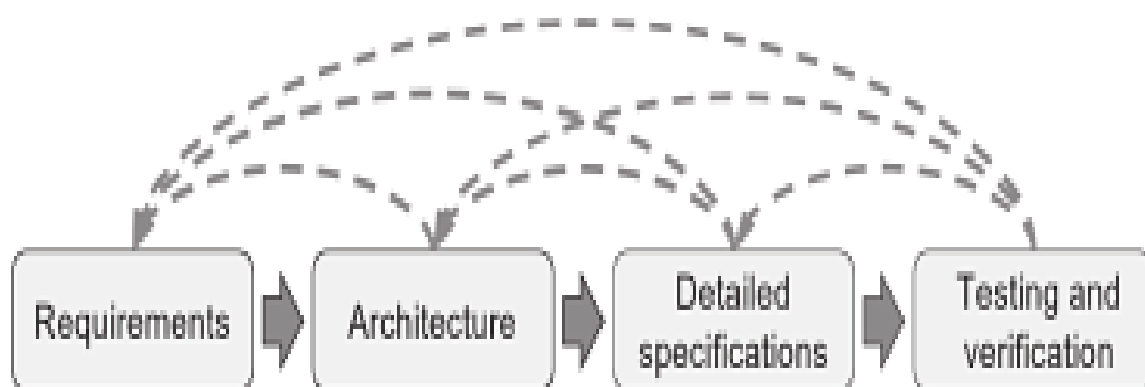
## 2. LONG TERM EVOLUTION – ADVANCED (LTE-A)

Το LTE-A είναι πιθανόν το πιο εξελιγμένο τηλεπικοινωνιακό σύστημα που αναπτύχθηκε ποτέ. Ενσωματώνει χαρακτηριστικά που θα ήταν οικονομικά δύσκολο να εφαρμοστούν μέχρι πριν από μια δεκαετία. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας τα χαρακτηριστικά του LTE-A μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στους σταθμούς βάσης και στις κινητές συσκευές.

Υπεύθυνος για τον καθορισμό των προδιαγραφών για το LTE-A είναι αποκλειστικά ο οργανισμός 3GPP, ο οποίος έχει θεσπίσει σαφείς κανονισμούς ως προς τη διαδικασία της προτυποποίησης όπως και αυστηρή δομή στην ανάθεση των αρμοδιοτήτων.

Η διαδικασία προτυποποίησης είναι συνεχής διαδικασία, εξελίσσοντας αδιάκοπα τα υφιστάμενα πρότυπα ώστε να καλύψουν νέες ανάγκες για υπηρεσίες και χαρακτηριστικά. Τα στάδια της διαδικασίας, σύμφωνα με την Εικόνα 4 αποτελούνται από:

- τον αρχικό καθορισμό των απαιτήσεων
- την αρχιτεκτονική, όπου αποφασίζονται οι δομικές μονάδες και οι διεπαφές
- τον λεπτομερή καθορισμό των προδιαγραφών
- τη δοκιμαστική περίοδο και επικύρωση



Εικόνα 4: Τα στάδια της διαδικασίας προτυποποίησης του LTE-A [11]

Τα στάδια αυτά μπορεί να είναι διαδοχικά, αλλά και με φάσεις επικάλυψης όταν κρίνεται απαραίτητο. Παραδείγματος χάριν, αλλαγές στις τεχνικές λεπτομέρειες μπορεί να αποδειχτούν αναγκαίες μέσω της δοκιμαστικής προτυποποίησης. Η τελευταία κάποιες φορές δε θεωρείται μέρος της διαδικασίας προτυποποίησης παρόλα αυτά γίνεται παράλληλα με άλλα στάδια και η συνεισφορά της στην τελική μορφή του προτύπου

είναι εξαιρετικά σημαντική. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν από τη δοκιμαστική διαδικασία, όπου έχουν προκύψει σταθερά αποτελέσματα, οπότε είναι δυνατό να αρχίσει και η διαδικασία υλοποίησης.

Αξίζει να σημειωθεί πως, αν και ανεξάρτητη, η 3GPP λαμβάνει υπόψη τις συστάσεις του οργανισμού ITU, καθώς και τους περιορισμούς που μπορεί να επιβάλλει μια συγκεκριμένη γεωγραφική ζώνη, όπως λειτουργία σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων ή ειδικές συνθήκες ασφαλείας. Οι προδιαγραφές αναπτύσσονται με το σκεπτικό της απροβλημάτιστης παγκόσμιας περιαγωγής και την εύκολη διακίνηση των τερματικών. Ωστόσο, πολλές φορές αυτό σημαίνει τοπικά επιβαλλόμενες προδιαγραφές μετατρέπονται σε καθολικές προδιαγραφές αφού ένα τερματικό πρέπει να καλύπτει τις αυστηρότερες των προδιαγραφών που ενδεχομένως συναντήσει για να εξασφαλιστεί η απροβλημάτιστη περιαγωγή.

## 2.1 Προδιαγραφές

Οι σχεδιαστικοί στόχοι που αναφέρθηκαν παραπάνω καθόρισαν την βάση της θέσπισης των ελαχίστων προδιαγραφών του LTE-A. Η 3GPP τις ανανεώνει, προσαρμόζει και ενημερώνει όταν κρίνεται απαραίτητο. Οι βασικότερες προδιαγραφές απεικονίζονται στον Πίνακα 1.

Παράμετρος	Τιμή
Εύρος φρεά	5-20 MHz
Ρυθμός μετάδοσης (Στατικό χρήστη)	1 Gbit/s
Ρυθμός μετάδοσης (Κινούμενο χρήστη)	100 Mbits/s
Φασματική απόδοση (Downlink)	15 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (Uplink)	6.75 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (Συστήματος)	3 bit/s/Hz
Φασματική απόδοση (Συστήματος σε εσωτερικό χώρο)	2.25 bit/s/Hz
Χαρακτηριστικά	All-IP δίκτυο μεταγωγής πακέτων Συνδεσιμότητα και λειτουργικότητα με υπάρχοντα ασύρματα πρότυπα  Δυναμικός διαμοιρασμός και χρήση πόρων  Υψηλής ποιότητας υπηρεσίες για υποστήριξη πολυμέσων  Αδιάκοπη συνδεσιμότητα  Παγκόσμια περιαγωγή μεταξύ διάφορων δικτύων με ομαλή πρόσβαση

Πίνακας 1: Κύριες Προδιαγραφές IMT Advanced [10]

Αν και πρωταρχικός στόχος ήταν να καλυφθούν οι απαιτήσεις του IMT Advanced, σε πολλά στοιχεία οι επιδόσεις ξεπερνούν κατά πολύ τις προδιαγραφές αυτές,

αποτελώντας μια μακροπρόθεσμη εγγύηση για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών στο χώρο των κινητών τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, ως μέγιστη επιτεύξιμη ταχύτητα τέθηκε να είναι τουλάχιστον 1Gbit/s για το downlink, ενώ για χρήστες με υψηλή κινητικότητα η ταχύτητα αναμένεται να φτάνει στα 100 Mbit/s. Ο στόχος για το uplink τέθηκε να είναι 500 Mbps και η μέγιστη ταχύτητα χρήστη που υποστηρίζεται φτάνει στα 350 km/h.

Πέρα από τη μέγιστη ταχύτητα, ορίστηκε η ελάχιστη συνολική χωρητικότητα του δικτύου, που εκφράζεται μέσω του βαθμού εκμετάλλευσης του φάσματος. Η μετρική αυτή ονομάζεται spectrum efficiency ή φασματική απόδοση, ορίζεται ως bps/Hz και τέθηκαν στόχοι τόσο για το σύνολο της κυψέλης όσο και για τις περιοχές στα όρια της. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ιδανικές συνθήκες και με ανάθεση όλων των διαθέσιμων πόρων σε μια υπό εξέταση σύνδεση, το σύστημα οφείλει να υποστηρίζει 30 bps/Hz στο downlink και 15 bps/Hz στο uplink.

Στον Πίνακα 2, απεικονίζονται οι τιμές της CF (Carrier Frequency), της ISD (Inter-site Distance), της BW (Operating Bandwidth), της PLoss (Penetration Loss) και της ταχύτητας UE για την Case 1, βάση της οποία μετράμε την ελάχιστη φασματική απόδοση.

<b>Simulation</b>	<b>CF</b>	<b>ISD</b>	<b>BW</b>	<b>PLoss</b>	<b>Speed</b>
<b>Cases</b>	<b>(GHz)</b>	<b>(meters)</b>	<b>(MHz)</b>	<b>(dB)</b>	<b>(km/h)</b>
1	2.0	500	10	20	3

**Πίνακας 2:** 3GPP Case 1 model [10]

Η ελάχιστη μέση φασματική απόδοση της κυψέλης που πρέπει να πληροί το σύστημα παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Καθώς διαφορετικές συνθήκες, όπως υψηλές ταχύτητες ή εσωτερικοί χώροι, επιτρέπουν διαφορετικό βαθμό εκμετάλλευσης του φάσματος. Η 3GPP σχεδιάζει να θέσει συγκεκριμένες τιμές και για αυτές τις υποπεριπτώσεις.

Radio env.		Case 1 [bps/Hz/cell]	Micro	Indoor	Rural/ High speed
UL	1x2	1.2			
	2x4	2.0			
DL	2x2	2.4			
	4x2	2.6			
	4x4	3.7			

**Πίνακας 3:** Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση κατά περίπτωση [10]

Σημαντική κρίθηκε και η προστασία των χρηστών που βρίσκονται στα όρια της κυψέλης, δηλαδή η θέσπιση της ελάχιστης απόδοσης. Αυτό γίνεται θέτοντας ελάχιστη τιμή στο σημείο 5% της CDF (Cumulative Distribution Function) του ρυθμού δεδομένων κανονικοποιημένο ως προς το σύνολο του φάσματος που χρησιμοποιεί η κυψέλη. Η ελάχιστη τιμή εξαρτάται προφανώς από τους πόρους που είναι διαθέσιμοι εκείνη τη στιγμή. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται οι καθορισμένες τιμές.

Radio env.		Case 1	Micro	Indoor	Rural/ High speed
Ant. Config		[bps/Hz/cell/user*]			
UL	1x2	0.04	/	/	/
	2x4	0.07			
DL	2x2	0.07	/	/	/
	4x2	0.09			
	4x4	0.12			/

\* θεωρώντας 10 χρήστες ομοιόμορφα-τυχαία κατανεμημένους στο κελί

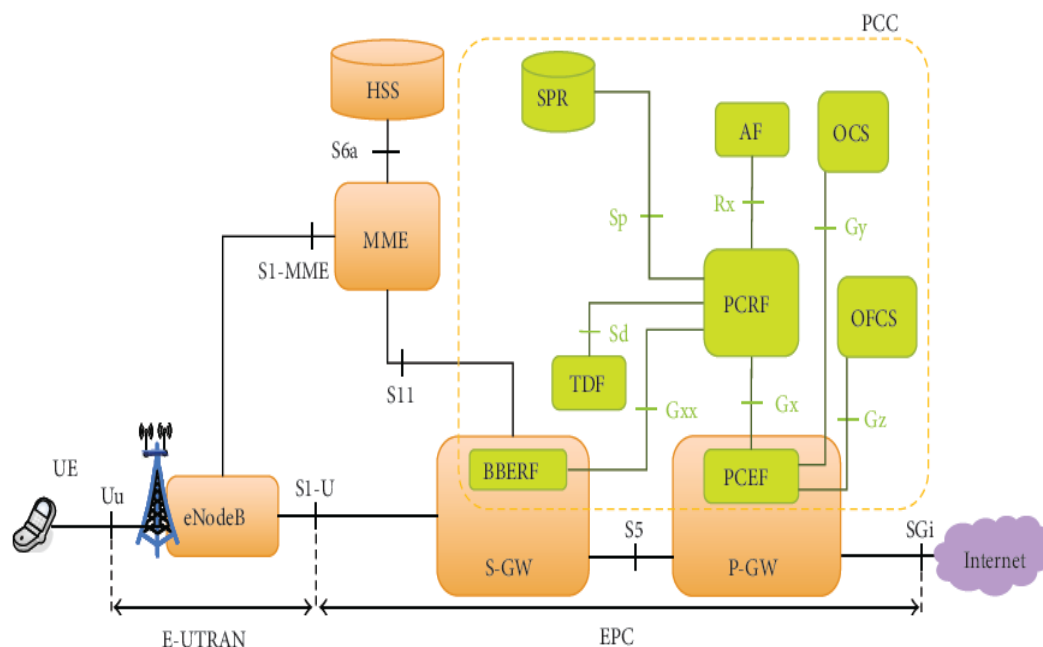
**Πίνακας 4:** Ελάχιστη επιτρεπόμενη φασματική απόδοση για χρήστες στα όρια της κυψέλης [10]

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε και στη μέγιστη επιτρεπόμενη καθυστέρηση ώστε να διευκολυνθούν διαδραστικές εφαρμογές και άλλες υπηρεσίες για τις οποίες η καθυστέρηση είναι κρίσιμης σημασίας. Συγκεκριμένα, για μετάβαση από Idle mode σε Connected mode η μέγιστη καθυστέρηση ορίστηκε στα 50 ms, ενώ αντίστοιχα για μετάβαση από dormant state σε active ορίστηκε σε 10 ms. Οι απαιτήσεις για κάλυψη δικτύου, συγχρονισμό δικτύου καθώς και διαχείριση των πόρων συχνοτήτων ακολουθούν τις απαιτήσεις του LTE (Release 8). Έμφαση δόθηκε και στη συμβατότητα των τερματικών αφού κρίθηκε απαραίτητο ένας UE (Release 8 και 10) να λειτουργεί ομαλά και ανεξάρτητα από το αν το περιβάλλον είναι LTE ή LTE-A. Το ίδιο σημαντικό είναι και η αρμονική συνύρπαξη μεταξύ των συστημάτων, δηλαδή λειτουργία LTE και LTE-A στο ίδιο φάσμα, όπως και η ύπαρξη συστημάτων GERAN (GSM EDGE Radio Access Network)/UTRA (UMTS Terrestrial Radio Access Network)/E-UTRA σε γειτονικά κανάλια. Η ευλυγισία χρήσης φάσματος του LTE ισχύει και για το LTE-A με την δυνατότητα χρήσης φάσματος μεγαλύτερου των 20MHz μέσω της πρόσθεσης φορέων (CA). Το μέγιστο φάσμα που μπορεί να ανατεθεί σε έναν μοναδικό χρήστη κατά αυτόν τον τρόπο γίνεται πλέον 100 MHz.

## 2.2 Αρχιτεκτονική E-UTRAN και LTE-A

Μια γενική θεώρηση της LTE-A αρχιτεκτονικής περιγράφεται παρακάτω, εστιάζοντας στις έννοιες QoS (Quality of Service) που ορίζονται στις προδιαγραφές 3GPP. Η Εικόνα 2 απεικονίζει τη συνολική αρχιτεκτονική του δικτύου με το εξελεγμένο σύστημα πακέτων (EPS), συμπεριλαμβανομένων των στοιχείων του δικτύου και τις τυποποιημένες διεπαφές. Το δίκτυο αποτελείται από το κεντρικό δίκτυο (EPC) και το δίκτυο πρόσβασης το E-UTRAN. Ενώ το EPC αποτελείται από πολλούς λογικούς κόμβους, το E-UTRAN αποτελείται ουσιαστικά από έναν μόνο κόμβο, τον εξελεγμένο κόμβο (eNodeB), ο

οποίος συνδέεται με τους UEs. Το EPS παρέχει στον χρήστη IP συνδεσιμότητα στο PDN για πρόσβαση στο Internet αλλά και χρήση υπηρεσιών, όπως VoIP (Voice over IP).



Εικόνα 5: Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική 3GPP LTE και LTE-A EPS [3]

### 2.2.1 Σταθμός βάσης evolved Node B (eNodeB)

Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της ασύρματης πρόσβασης. Αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο, τον eNodeB. Ο eNodeB είναι βελτιωμένος σταθμός βάσης σύμφωνα με τα 3GPP πρότυπα. Είναι υπεύθυνος για πολλαπλές λειτουργίες που ανάγονται στην πλευρά του δικτύου, οι οποίες παλαιότερα εκτελούνταν είτε από κάποιο κεντρικό ελεγκτή είτε από το τερματικό. Συγκεκριμένα, περιέχει υποστήριξη επιπέδου χρήστη, επιπέδου ελέγχου και υποστήριξη στον UE. Το E-UTRAN χαρακτηρίζεται ως επίπεδο καθώς δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός «ελεγκτής» στο δίκτυο. Οι σταθμοί βάσης, όπως ο eNodeB, κατανέμονται συνήθως σε όλη την περιοχή κάλυψης των δικτύων και κάθε eNodeB είναι τοποθετημένος κοντά στις ραδιοκεραίες (radio antennas).

Επιπλέον, ο eNodeB ενεργεί ως συνδετική γέφυρα μεταξύ του UE και του EPC, αφού είναι το σημείο τερματισμού όλων των ραδιο-πρωτοκόλλων προς τον UE ενώ ταυτόχρονα αναμεταδίδει τα δεδομένα προς το EPC, μεταξύ των ραδιο-συνδέσεων και της αντίστοιχης σύνδεσης που είναι βασισμένη σε IP. Επιπλέον, ο eNodeB εκτελεί κρυπτογράφηση/αποκρυπτογράφηση των δεδομένων του UE καθώς επίσης και συμπύεση/αποσυμπύεση των IP κεφαλίδων, ώστε να αποφεύγεται η επανειλημμένη αποστολή των ίδιων ή διαδοχικών δεδομένων στην κεφαλίδα IP.

Ο eNodeB είναι υπεύθυνος για πολλές λειτουργίες του επιπέδου ελέγχου, συγκεκριμένα είναι υπεύθυνος για το RRM (Radio Resource Management). Δηλαδή, τον έλεγχο χρήσης της ραδιοεπαφής, όπου περιλαμβάνονται απαραίτητοι αλγόριθμοι για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής χρήσης των ασύρματων πόρων, για την πλήρη εκμετάλλευση των τεχνικών προσαρμογής και για την ορθή απόδοση στους χρήστες των απαιτούμενων χαρακτηριστικών QoS. Αυτοί διακρίνονται σε:

- Semi-dynamic μηχανισμούς, που εκτελούνται κυρίως στο στάδιο των ρυθμίσεων ροών δεδομένων ή κατά τη διάρκεια ασύγχρονων αναδιαρθρώσεων. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών είναι η παραμετροποίηση της QoS, αποδοχή κλήσεων και ο ημι-μόνιμος χρονοπρογραμματισμός.
- Highly dynamic μηχανισμούς, που αφορούν νέες αποφάσεις που λαμβάνονται σε κάθε TTI (Transmission Time Interval) του 1 ms (γρήγορη προσαρμογή ζεύξης), διαχείριση HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request), MIMO προσαρμογή.

Επίσης, ο eNodeB έχει σημαντικό ρόλο στη διαχείριση κινητικότητας. Ελέγχει και αναλύει τις μετρήσεις της έντασης του ραδιοσήματος (radio signal) που πραγματοποιούνται από τον UE, κάνει παρόμοιες μετρήσεις ο ίδιος και με βάση αυτές λαμβάνεται η απόφαση για το handover των UEs μεταξύ των κελιών. Όταν ένας νέος UE ενεργοποιείται από κάποιον eNodeB και κάνει αίτηση σύνδεσης στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση αυτού του αιτήματος στην MME, η οποία προηγουμένως εξυπηρετούσε τον συγκεκριμένο UE. Σε περίπτωση που η δρομολόγηση προς την προηγούμενη MME δεν είναι διαθέσιμη ή λείπουν κάποιες πληροφορίες δρομολόγησης, τότε επιλέγεται μια νέα MME.

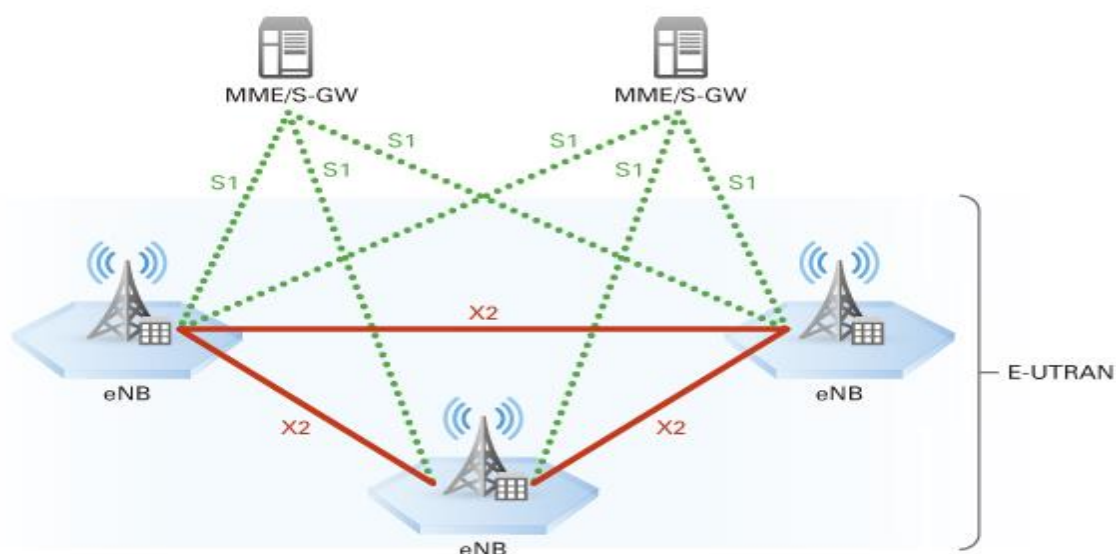
Χρήζει αναφοράς το γεγονός ότι ανά πάσα στιγμή ένας eNodeB μπορεί να εξυπηρετεί πολλαπλούς UEs στην περιοχή κάλυψής του, ωστόσο κάθε UE μπορεί να είναι συνδεδεμένος με ένα μόνο eNodeB. Επίσης, γειτονικοί eNodeBs πρέπει να είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Κάθε στιγμή σε έναν UE προσφέρονται υπηρεσίες από μια μόνο MME και S-GW, και ο eNodeB πρέπει να παρακολουθεί αυτή την συσχέτιση. Αυτό σημαίνει ότι ένας eNodeB είναι πιθανό να πρέπει να συνδεθεί με πολλές MMEs και S-GWs. Τέλος, η επικοινωνία μεταξύ των eNodeBs εξασφαλίζεται μέσω της διεπαφής X2, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις handover, ενώ η επικοινωνία με το EPC μέσω της διεπαφής S1.

### 2.2.1.1 Διεπαφή X2

Η X2 διεπαφή εξυπηρετεί την επικοινωνία μεταξύ των eNodeBs. Εκτός από αυτή τη λειτουργία της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταφέρει πληροφορίες επιπέδου χρήστη και επιπέδου ελέγχου, όπως πληροφορίες διαπομπής, μετρήσεις φορτίου και προωθήσεις δεδομένων χρηστών. Βασικός στόχος είναι όλα αυτά να εκτελούνται με την ελάχιστη απώλεια πακέτων λόγω της κινητικότητας του χρήστη. Καθώς το τερματικό μετακινείται μέσα στο δίκτυο πρόσβασης, μη απεσταλμένα πακέτα ή μη αναγνωρισμένα πακέτα που βρίσκονται αποθηκευμένα στον παλιό eNodeB μπορούν να προωθηθούν στον νέο χάρη στην X2 διεπαφή.

### 2.2.1.2 Διεπαφή S1

Η διεπαφή S1 εξυπηρετεί την επικοινωνία μεταξύ των eNodeBs με το EPC (είτε με το MME είτε με τη S-GW). Η διεπαφή μεταξύ eNodeB και S-GW ονομάζεται S1-U και χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα χρήστη. Η διεπαφή μεταξύ eNodeB και MME ονομάζεται S1-MME και χρησιμοποιείται για να μεταφέρει πληροφορίες επιπέδου ελέγχου, όπως υποστήριξης κινητικότητας, υπηρεσίες τοποθεσίας και διαχείρισης δικτύου.



Εικόνα 6: Συνολική Αρχιτεκτονική E-UTRAN

### 2.1.1.3 Εξοπλισμός χρήστη (User Equipment, UE)

Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment, (UE)) είναι συσκευή που ο τελικός χρήστης χρησιμοποιεί για επικοινωνία. Συνήθως, πρόκειται για μια συσκευή χειρός, όπως είναι ένα smart phone ή ένα laptop. Επίσης, περιλαμβάνει την USIM (Universal Subscriber Identity Module), που είναι μια ξεχωριστή μονάδα από το υπόλοιπο UE και συχνά αποκαλείται TE (Terminal Equipment). Η USIM είναι μια εφαρμογή που τοποθετείται σε μια αφαιρούμενη έξυπνη κάρτα που λέγεται UICC (Universal Integrated Circuit Card) και χρησιμοποιείται για να προσδιορίζει και να ελέγχει την ταυτότητα του χρήστη καθώς και να παράγει κλειδιά ασφαλείας για την προστασία της μετάδοσης στη ραδιοεπαφή.

Ο UE είναι μια πλατφόρμα για εφαρμογές επικοινωνίας που επιτελεί λειτουργίες διαχείρισης κινητικότητας όπως handover και αναφορά της τοποθεσίας όπου βρίσκεται ο τερματικός σταθμός. Όλες αυτές οι λειτουργίες εκτελούνται όπως του επιβάλλει το δίκτυο. Ίσως το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι ο UE παρέχει διεπαφή για τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε εφαρμογές, όπως VoIP να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας φωνητικής κλήσης.

## 2.2.2 Evolved Packet Core (EPC)

Το EPC συνδέεται με τους eNodeBs μέσω της S1 διεπαφής. Το EPC είναι κινητό δίκτυο κορμού με βασικές ευθύνες τη διαχείριση της κινητικότητας, πολιτικής και ασφάλειας. Τόσο το E-UTRAN όσο και το EPC είναι υπεύθυνα για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στο δίκτυο όπως εξηγείται στο κεφάλαιο 2.

Οι κύριοι λογικοί κόμβοι του EPC είναι η MME, η S-GW και η P-GW (Packet Data Network Gateway). Επίσης, το EPC περιλαμβάνει και άλλους λογικούς κόμβους όπως HSS (Home subscriber server) και PCRF (Policy control and charging rules function). Οι λογικοί κόμβοι περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες παρακάτω.

### 2.1.2.1 Policy control and charging rules function (PCRF)

Η PCRF είναι στοιχείο του δικτύου το οποίο είναι υπεύθυνο για την PCC (Policy and Charging Control). Αυτή λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με το πώς δρουν οι υπηρεσίες όσον αφορά την QoS και παρέχει πληροφορίες στην PCEF, η οποία βρίσκεται στην P-GW, συμβάλλοντας στον ορισμό κατάλληλων bearers και στην σωστή τακτική. Οι πληροφορίες που παρέχει η PCRF στην PCEF ονομάζονται κανόνες PCC. Η PCRF στέλνει τους κανόνες PCC κάθε φορά που ένας νέος bearer/κανάλι χρειάζεται να εγκατασταθεί. Για παράδειγμα, όταν ο UE συνδέεται για πρώτη φορά στο δίκτυο και ο αρχικός bearer εγκατασταθεί τότε ένας ή περισσότεροι dedicated bearers εγκαθίστανται [5],[7].

### 2.2.2.2 Home subscriber server (HSS)

Ο Home subscriber server (HSS) αποτελεί «αποθήκη» δεδομένων με τις εγγραφές όλων των μόνιμων χρηστών. Είναι μια βάση δεδομένων αποθηκευμένη σε κάποιο εξυπηρετητή, ο οποίος βρίσκεται σε κεντρικό σημείο στις εγκαταστάσεις του παρόχου. Ο HSS αποθηκεύει το πρωτότυπο profile του συνδρομητή, το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που είναι κατάλληλες για τον χρήστη, τις πληροφορίες για τις επιτρεπόμενες PDN συνδέσεις και αν επιτρέπεται ή όχι η περιαγωγή σε ένα δίκτυο που έχει επισκεφτεί. Επίσης, ο HSS αποθηκεύει τις ταυτότητες των P-GWs, που είναι διαθέσιμες προς χρήση, για την υποστήριξη handover μεταξύ non-3GPP ANS (Advanced Network Solutions).

Μια ακόμα οντότητα που μπορεί να ενσωματωθεί στον HSS είναι το AUC (Authentication Center), το οποίο παράγει τα διανύσματα για την ταυτοποίηση και τα κλειδιά ασφαλείας. Σε όλες τις διαδικασίες που σχετίζονται με αυτές τις λειτουργίες ο HSS αλληλεπιδρά με την MME, επομένως θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με κάθε MME σε όλο το δίκτυο, προκειμένου να παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα να μετακινείται. Για κάθε UE, οι εγγραφές της HSS θα δείχνουν σε μια MME που του προσφέρει υπηρεσίες κάθε στιγμή και μόλις ένα νέο MME αναφέρει ότι προσφέρει υπηρεσίες στον UE, η HSS θα ακυρώσει την τοποθεσία της προηγούμενης MME [3],[4].



### 2.2.2.3 Packet Data Network Gateway (P-GW)

Η Packet Data Network Gateway (P-GW) παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης του UE με τα εξωτερικά δίκτυα πακέτων δεδομένων με το να δρα ως σημείο εξόδου και εισόδου της κυκλοφορίας για τον UE. Είναι ο συντονιστής κινητικότητας του πιο υψηλού επιπέδου στο σύστημα. Τυπικά, η P-GW διαθέτει την IP διεύθυνση στον UE και ο UE την χρησιμοποιεί ώστε να επικοινωνήσει με άλλους IP hosts στα εξωτερικά δίκτυα, όπως το Διαδίκτυο. Είναι πιθανό ότι το εξωτερικό PDN με το οποίο ο UE συνδέεται να διαθέτει την διεύθυνση που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από τον UE και η P-GW ανοίγει όλη την κυκλοφορία σε εκείνο το δίκτυο.

Η P-GW εκτελεί την απαραίτητη λειτουργία DHCP (Dynamic Configuration Protocol) ή έναν εξωτερικό DHCP εξυπηρετητή και παραδίδει την διεύθυνση στον UE. Μόνο IPV4, IPV6 ή και τις δύο διευθύνσεις μπορούν να διαθέτουν ανάλογα με την ανάγκη. Το UE μπορεί να επισημάνει αν θέλει να λάβει τη διεύθυνση στην σηματοδότηση συνδέσεων ή αν επιθυμεί να εκτελέσει την διαμόρφωση των διευθύνσεων ενώ συνδεθεί με το link layer.

Όταν ένας UE κινείται από μια S-GW σε μια άλλη οι bearers/κανάλια πρέπει να αλλάξουν στην P-GW. Η P-GW θα λάβει μια ένδειξη να μετατρέψει την ροή από την νέα S-GW. Η κάθε P-GW μπορεί να συνδεθεί με ένα ή περισσότερα PCRF, S-GW και το εξωτερικό δίκτυο.

Η P-GW περιλαμβάνει την PCEF εκτελώντας τις λειτουργίες των πυλών ελέγχου και το φιλτράρισμα όπως απαιτείται από τις πολιτικές που τίθενται για τον UE και την εν λόγω υπηρεσία. Με αποτέλεσμα, η P-GW να συλλέγει και να εκθέτει τις σχετικές πληροφορίες χρέωσης [3],[4].

### 2.2.2.4 Serving Gateway (S-GW)

Η Serving Gateway (S-GW) δρομολογεί και προωθεί τα πακέτα δεδομένων του χρήστη, ενώ επίσης ενεργεί ως σημείο αναφοράς όταν ο χρήστης κινείται μεταξύ των eNodeBs ή μεταξύ του LTE-A και άλλων 3GPP τεχνολογιών (handover). Η MME δίνει εντολή στην S-GW να αλλάξει τη σύνδεση από τον έναν eNodeB στον άλλον. Επίσης, μπορεί να ζητήσει από την S-GW να παρέχει πόρους σύνδεσης για τη διαβίβαση δεδομένων από τον αρχικό eNodeB στον επόμενο, εφόσον υπάρχει ανάγκη. Άλλο ένα σενάριο είναι η αλλαγή από μια S-GW σε άλλη, με την MME να ελέγχει την μετακίνηση αυτή μεταξύ της κατάρτησης συνδέσεων στην παλιά S-GW και της εγκατάστασης τους στην νέα S-GW.

Για όλες τις ροές δεδομένων που ανήκουν σε έναν UE, ο οποίος βρίσκεται σε λειτουργία, η S-GW μεταβιβάζει τα δεδομένα μεταξύ του eNodeB και της P-GW. Ωστόσο, όταν ένας UE είναι σε κατάσταση αδράνειας οι πόροι στον eNodeB απελευθερώνονται και η πορεία των δεδομένων τερματίζει στην S-GW. Εάν η S-GW λάβει πακέτα δεδομένων από την P-GW, τότε η S-GW θα αποθηκεύσει τα πακέτα και θα ζητήσει από την MME να αρχικοποιήσει τη διαδικασία τηλειδιοποίησης του UE. Αυτό

θα παρακινεί τον UE να ξανασυνδεθεί και όταν οι συνδέσεις πραγματοποιηθούν ξανά, τα αποθηκευμένα πακέτα θα σταλούν.

Η S-GW παρακολουθεί τα δεδομένα στις συνδέσεις και μπορεί επίσης να συλλέγει δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της χρέωσης των χρηστών. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνει τη λειτουργία νόμιμης παρακολούθησης, η οποία δίνει τη δυνατότητα να παρέχονται τα δεδομένα του χρήστη, που παρακολουθείται, στις αρχές για περαιτέρω έλεγχο.

Μια S-GW μπορεί να εξυπηρετήσει μόνο μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή με ένα περιορισμένο σύνολο eNodeBs και επίσης μπορεί να υπάρχει ένα περιορισμένο σύνολο MMEs που ελέγχουν αυτήν την περιοχή. Σημαντικό είναι το γεγονός ότι θα πρέπει να είναι σε θέση να συνδέεται με οποιαδήποτε P-GW σε όλο το δίκτυο, αφού η P-GW δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια της μετακίνησης, αντιθέτως η S-GW μπορεί να μεταφερθεί [3],[4].

### 2.2.2.5 Mobile Management Entity (MME)

Η Mobile Management Entity (MME) είναι ο κόμβος κλειδί για τον έλεγχο πρόσβασης στο δίκτυο LTE-A. Περιλαμβάνει την διαδικασία ενεργοποίησης/απενεργοποίησης των bearers και είναι επίσης υπεύθυνο για την επιλογή του S-GW για έναν UE στην αρχική σύνδεση. Επιπλέον, η MME υποστηρίζει τα εξής:

- Διαχείριση τοποθεσίας τερματικού σε κατάσταση αδράνειας: αναφέρεται στη διαδικασία ενημέρωσης της τοποθεσίας που βρίσκεται το τερματικό έτσι ώστε το δίκτυο να είναι ικανό να εκτελέσει άμεση σύνδεση του τερματικού σε περίπτωση συνεδρίας.
- Διαχείριση των συνεδριών τερματικού-δικτύου: αφορά όλες τις διαδικασίες σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του περιεχομένου των πακέτων δεδομένων και διαπραγμάτευση σχετικών παραμέτρων, όπως η QoS.
- Διαδικασίες ασφάλειας: σχετίζεται με την πιστοποίηση του τελικού χρήστη όπως και την εκκίνηση και διαπραγμάτευση των αλγόριθμων κρυπτογράφησης και προστασίας ακεραιότητας [3],[4].

### 2.2.2.6 Application Function (AF)

Η Application Function (AF) εξάγει τις πληροφορίες συνόδου από την εφαρμογή σηματοδότησης και επικοινωνεί με τον PCRF ώστε να μεταφέρει αυτή τη δυναμική πληροφορία, που απαιτείται για την λήψη αποφάσεων στην PCRF [3].

### **2.2.2.7 Subscription Profile Repository (SPR)**

Subscription Profile Repository (SPR) είναι η βάση δεδομένων που αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με την πολιτική χρήσης του δικτύου από έναν συνδρομητή. Για παράδειγμα, το SPR μπορεί να υποδείξει ποιες είναι οι τελικές υπηρεσίες που έχουν εγκριθεί για το χρήστη, τις εγκεκριμένες παραμέτρους QoS ανά υπηρεσία ή κατηγορία χρήστη (π.χ. επιχείρηση και καταναλωτής) [3],[4].

### **2.2.2.8 Traffic Detection Function (TDF)**

Traffic Detection Function (TDF) έχει εισαχθεί στο LTE-A για να βοηθήσει το δίκτυο ώστε να επιτύχει υπηρεσίες αναγνωρισιμότητας με την εισαγωγή μηχανισμών στην υπηρεσία ανίχνευσης [3].

### **2.2.2.9 Online Charging System (OCS)**

Online Charging System (OCS) παρέχει τη διαχείριση των πιστώσεων και χορηγεί πίστωση στον PCEF με βάση το χρόνο, τον όγκο κυκλοφορίας, ή τις επιβαρύνσεις [3].

### **2.2.2.10 Offline Charging System (OFCS)**

Offline Charging System (OFCS) λαμβάνει συμβάντα από τον PCEF και δημιουργεί εγγραφές δεδομένων χρέωσης (Charging Data Records, (CDRs)) για το σύστημα χρέωσης [3].

## **2.2.3 Femtocells**

### **2.2.3.1 Εισαγωγή**

Στα κυψελοειδή δίκτυα, εκτιμάται ότι τα 2/3 των κλήσεων και πάνω από το 90% των υπηρεσιών δεδομένων συμβαίνουν σε εσωτερικούς χώρους. Ως εκ τούτου, είναι εξαιρετικά σημαντικό για τους παρόχους κινητής να παρέχουν καλή κάλυψη στο εσωτερικό των κτιρίων, όχι μόνο για υπηρεσίες φωνής, αλλά βίντεο και άλλες υπηρεσίες υψηλής ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, οι οποίες καθίστανται όλο και πιο σημαντικές. Η καλή κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους και η υψηλή QoS αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τους παρόχους καθώς επιφέρουν περισσότερα έσοδα για τις επιχειρήσεις, την ενίσχυση της εμπιστοσύνης των συνδρομητών και τη μείωση των αποσυνδέσεων.

Μια τυπική προσέγγιση για την παροχή κάλυψης σε εσωτερικούς χώρους είναι να χρησιμοποιηθούν macrocells. Αυτή η προσέγγιση, έχει μια σειρά από μειονεκτήματα:

- Η προσέγγιση εγκατάστασης πιο πυκνών υποδομών macrocell σταθμών βάσεων χαρακτηρίζεται από μεγάλο κόστος χωρίς τα ανάλογα οφέλη.
- Ένα δίκτυο υψηλής χωρητικότητας χρειάζεται πολλούς εξωτερικούς σταθμούς βάσης, η απόκτηση των οποίων έχει γίνει ιδιαίτερα δύσκολη σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.
- Οι παρεμβολές και η υψηλή απαιτούμενη κατανάλωση από τους σταθμούς βάσης για εσωτερικούς χρήστες καθιστούν λιγότερο ελκυστικό να κατασκευαστεί ένα δίκτυο υψηλής χωρητικότητας με μια τέτοια προσέγγιση.
- Η απόδοση του δικτύου (π.χ. ρυθμός μετάδοσης δεδομένων) σε εσωτερικούς χώρους δεν μπορεί να διασφαλιστεί. Η επίτευξη υψηλών ρυθμών δεδομένων απαιτεί υψηλότερη διαμόρφωση και κωδικοποίηση. Αυτό με τη σειρά του απαιτεί καλύτερες συνθήκες καναλιού, που μπορεί να επιτευχθούν όταν οι χρήστες είναι κοντά στους σταθμούς βάσης.

Ως εκ τούτου, διαφορετικές λύσεις όπως picocells ή relaying κόμβοι αποτελούν ελκυστική και βιώσιμη επιχειρηματική πρόταση σε περιοχές όπως μεγάλα εμπορικά κέντρα, κτίρια γραφείων και μεγάλες εταιρίες. Αυτά τα συστήματα προσφέρονται και εγκαθίστανται από τους παρόχους προσφέροντας καλύτερη κάλυψη, αποφόρτιση κίνησης από το macrocell και ενίσχυση της QoS. Με τις λύσεις αυτές, η ορθογωνιότητα στο φάσμα μπορεί να βελτιωθεί, γεγονός που θα οδηγήσει σε υψηλή απόδοση. Έτσι, καλύτερες συνθήκες καναλιού θα επιτυγχάνονται και το σύστημα θα επιτρέπει υψηλή διαμόρφωση και κωδικοποίηση βελτιώνοντας σημαντικά την QoS.

Αν και οι προαναφερθείσες λύσεις είναι πιο αποδοτικές από τη χρήση εξωτερικών macrocells για την κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους, οι λύσεις αυτές εξακολουθούν να είναι σχετικά ακριβές ώστε να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις μικρότερης κλίμακας (μικρά γραφεία και οικιακούς χρήστες).

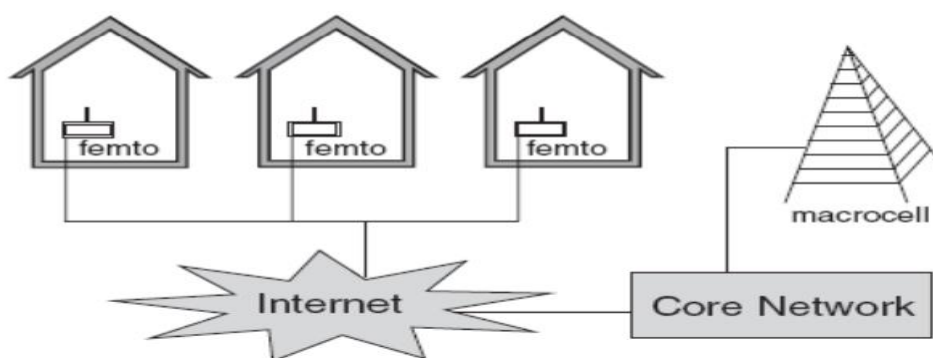
Αντίθετα, η ανάπτυξη των femtocells παρέχει μια καλή ευκαιρία για χαμηλού κόστους εσωτερική κάλυψη. Τα femtocells, γνωστά ως femto σταθμοί βάσης, είναι σημεία πρόσβασης που παρέχουν σύνδεση μεταξύ των συσκευών κινητής στο δίκτυο του παρόχου κινητής τηλεφωνίας μέσω της οικιακής DSL (Digital Subscriber Line) ή άλλης ευρυζωνικής σύνδεσης του ίδιου του χρήστη.

Η έννοια του femtocell μελετήθηκε για πρώτη φορά από τα Bell Lab της Alcatel-Lucent το 1999. Το 2002, η Motorola ανακοίνωσε τον πρώτο σταθμό βάσης για οικιακή χρήση. Το 2005, η έννοια του σταθμού βάσης στο σπίτι άρχισε να αποκτά ευρύτερη αποδοχή. Το 2006, υιοθετήθηκε ο όρος «femtocell». Τον Φεβρουάριο του 2007, ένας αριθμός εταιριών παρουσίασε femtocells στο 3GSM (Global System for Mobile) World Congress της Βαρκελώνης ανακοινώνοντας τις πρώτες δοκιμές. Τον Ιούλιο του 2007, το Femto Forum ιδρύθηκε για την προώθηση της τεχνολογίας femtocell και την ανάπτυξη της σε όλο τον κόσμο. Οι προτυποποιήσεις HNB (HNodeB) και HeNB εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην Release 8 του LTE ορίζοντας έτσι την υλοποίηση των femtocell σε

περιβάλλον LTE, που αποδεικνύει ότι είχε γίνει μια ευρέως αποδεκτή τεχνολογία ασύρματης πρόσβασης.

### 2.2.3.2 Λειτουργικότητα των femtocells

Ένα femtocell μοιάζει με ένα σημείο πρόσβασης Wi-Fi. Εντούτοις, περιέχει στοιχεία λειτουργικότητας RNC (Radio Network Controller) στην περίπτωση του GSM. Δηλαδή, δεν απαιτεί την ύπαρξη macrocell δικτύου αλλά μόνο σύνδεση δεδομένων DSL ή cable με το Internet, μέσω του οποίου συνδέεται με το δίκτυο κορμού κινητής τηλεφωνίας όπως φαίνεται στην Εικόνα 9. Ένα femtocell φαίνεται σαν ένα σημείο πρόσβαση Wifi (Wifi Access Point). Ωστόσο, στο εσωτερικό είναι διαφορετικό, αφού το πρώτο υλοποιεί τεχνολογίες Wifi (πρότυπα IEEE 802.11b, 802.11g και 802.11n), ενώ το δεύτερο υλοποιεί τεχνολογίες όπως (GSM/GPRS/EDGE/UMTS/HSPA/LTE/LTE-A και WiMAX (IEEE 802.16e).



**Εικόνα 7:** Τα femtocells συνδέονται με το CN διαμέσου της backhaul σύνδεσης του χρήστη [13]

Οι τεχνολογίες πίσω από τα femtocells είναι τεχνολογίες κινητών δικτύων. Δεδομένου ότι η βασική κινητήρια δύναμη ανάπτυξης femtocells είναι η ζήτηση για όλο και υψηλότερους ρυθμούς δεδομένων σε εσωτερικούς χώρους, το ενδιαφέρον για τα femtocells έχει αυξηθεί κατακόρυφα.

Χαρακτηριστικό των femtocells είναι πως εγκαθίστανται από τους χρήστες και όχι από τους διαχειριστές των δικτύων. Για αυτό θα πρέπει να θεωρούνται ως ηλεκτρικά είδη ευρείας κατανάλωσης. Για να εξασφαλιστεί η ελάχιστη δυνατή παρέμβαση στα macrocells και στα γειτονικά femtocells, ένα femtocell πρέπει να είναι σε θέση να ρυθμίσει αυτόματα τις παραμέτρους λειτουργίας του. Η αυτόματη ρύθμιση του femtocell μπορεί να χωριστεί στη φάση αίσθησης του περιβάλλοντος, που γίνεται συνήθως μέσω σάρωσης κατά την οποία θα πρέπει να αξιολογηθούν οι συνθήκες της ασύρματης μετάδοσης στο περιβάλλον του femtocell και στη φάση αυτό-ρύθμισης, στην οποία ρυθμίζονται παράμετροι όπως η ισχύς μετάδοσης στο downlink, κατανομή πόρων κ.λ.π. Η αυτόματη ρύθμιση των femtocell είναι το κλειδί για την επιτυχή ανάπτυξη της τεχνολογίας. Πριν την εγκατάσταση των femtocells, οι πάροχοι πρέπει να ελέγξουν τα σενάρια ανάπτυξης femtocell μέσα από δομικές και προσομοιώσεις. Ο κύριος σκοπός των δοκιμών και των προσομοιώσεων είναι να μάθουμε τον αντίκτυπο της ανάπτυξης

των femtocell στο macrocell στρώμα καθώς και πως τα femtocells μπορούν να επηρεάσουν το ένα το άλλο.

Σύμφωνα με την ικανότητα τους, τα femtocells μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, δηλαδή της μικρής κλίμακας femtocell, η οποία μπορεί να υποστηρίξει 3-6 ταυτόχρονους χρήστες και της μεγαλύτερης, η οποία μπορεί να υποστηρίξει 8-16 χρήστες και προορίζεται για τις μεγάλες επιχειρήσεις. Η βασική ιδέα πίσω από τα femtocells είναι η παροχή υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας δεδομένων. Η πιθανότητα όλοι οι συνδρομητές να χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το femtocell για τέτοιες υπηρεσίες θεωρήθηκε μικρή και αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος αριθμός υποστήριξης ταυτόχρονων χρηστών. Επιπλέον, ο αριθμός περιορίζεται και από το περιορισμένο εύρος ζώνης του ADSL uplink. Ο συνδρομητής ενός femtocell είναι ένας χρήστης εγγεγραμμένος σε αυτό. Οι συνδρομητές έτσι ορίζονται ως οι νόμιμοι χρήστες του femtocell και είναι συνήθως κινητά τερματικά του ιδιοκτήτη του femtocell. Τα τερματικά που εξυπηρετούνται από το femtocell, αναφέρονται ως femto UE.

Τα femtocells μπορούν να ταξινομηθούν με βάση την τεχνολογία για την οποία έχουν σχεδιαστεί, όπως το UMTS femtocell, GSM femtocell, WiMAX femtocell και ούτω καθεξής. Κάθε τύπος απαιτεί διαφορετική υλοποίηση προκειμένου να ενσωματωθεί στο αντίστοιχο δίκτυο. Τέλος, τα femtocells ταξινομούνται βάσει τη λειτουργία πρόσβασης, έκαστη με πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Αυτά είναι τα femtocells δημόσιας, ιδιωτικής και υβριδικής πρόσβασης.

Στα Femtocells δημόσιας πρόσβασης, ο χρήστης μπορεί να συνδεθεί με το femtocell ανεξάρτητα αν είναι ιδιοκτήτης ή συνδρομητής της υπηρεσίας femtocell. Η μέθοδος αυτή ωφελεί τους χρήστες σε εξωτερικούς χώρους, οι οποίοι είναι σε θέση να κάνουν χρήση των κοντινών femtocells, μειώνοντας έτσι τη συνολική χρήση των πόρων του συστήματος (ισχύς, συχνότητα) και ως εκ τούτου τις παρεμβολές. Αντίστοιχη κατάσταση ισχύει και μεταξύ των γειτονικών femtocells. Υπάρχει πιθανότητα η ισχύς του σήματος των γειτονικών femtocells να είναι υψηλότερη από το femtocell του πελάτη (πυκνοκατοικημένες περιοχές ή πολυώροφα κτίρια). Με τα femtocells δημόσιας πρόσβασης, ο χρήστης θα συνδεθεί στο femtocell με το καλύτερο σήμα.

Στα ιδιωτικής πρόσβασης femtocell, μόνο μια λίστα εγγεγραμμένων χρηστών/συνδρομητών μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ένα femtocell. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται CSG (Closed Subscriber Group). Μια τέτοια προσέγγιση αυξάνει σημαντικά τις παρεμβολές. Για παράδειγμα, περαστικοί χρήστες λαμβάνουν χαμηλό σήμα που προέρχεται από το macrocell, θα πρέπει να αυξήσουν την ισχύ τους προκαλώντας μεγαλύτερη παρεμβολή στα γειτονικά femtocells.

Στα Femtocells υβριδικής πρόσβασης, οι ιδιοκτήτες femtocell έχουν πληρώσει για το femtocell αλλά και για την ευρυζωνική σύνδεση με το Διαδίκτυο την οποία χρησιμοποιεί το femtocell. Αυτός είναι ο λόγος που η ανοιχτή πρόσβαση δεν είναι επιθυμητή. Θεωρείται άδικο να έχουν όλοι οι χρήστες που περνούν κοντά στο κτίριο του πελάτη το δικαίωμα να χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες των femtocells, ενώ μόνο ο ιδιοκτήτης του femtocell να επιβαρύνεται οικονομικά. Οι χρήστες προτιμούν femtocells σε μια ιδιωτική λειτουργία πρόσβασης, όπου μόνο λίγοι χρήστες επιτρέπεται να συνδεθούν με το

femtocell. Από την άλλη, η λειτουργία κλειστής πρόσβασης δημιουργεί ισχυρές παρεμβολές σε παρακείμενους χρήστες εντός της εμβέλειάς τους. Επιπλέον, σε περιπτώσεις μεγάλων επιχειρήσεων θα πρέπει να χρησιμοποιούνται πολλά femtocells για να καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή καθώς επίσης και πολλούς διαφορετικούς περαστικούς χρήστες αναδεικνύοντας την ανάγκη για δημόσια πρόσβαση femtocell.

Οι αντικρουόμενες αυτές απαιτήσεις οδηγούν στη υλοποίηση femtocell υβριδικής πρόσβασης, δηλαδή femtocells που επιλέγουν λειτουργία μεταξύ κλειστής και ανοιχτής πρόσβασης ανάλογα τις περιβάλλουσες συνθήκες. Οι μεταβολές μπορεί να γίνονται στο πεδίο του χρόνου, όπου ανάλογα με τα επίπεδα απαιτήσεων σε πόρους και τις παρεμβολές στο δίκτυο, το femtocell θα μετατρέπεται από κλειστής πρόσβασης σε ανοιχτής αλλά και στο πεδίο της συχνότητας όπου μη-συνδρομητές θα δικαιούνται πρόσβαση μόνο σε ένα μέρος του διαθέσιμου φάσματος.

Η επιλογή του τύπου πρόσβασης πέραν των ανωτέρω δημιουργεί και ορισμένες ανησυχίες που πρέπει να διευθετηθούν σχετικά με τις κλήσεις έκτακτης ανάγκης. Δηλαδή, αν τα femtocells ανεξαρτήτως λειτουργίας πρόσβασης υποχρεούνται να παρέχουν τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των παρόχων VoIP. Αυτός είναι ο λόγος που σε περιπτώσεις οικιακής χρήσης αν και έχει προτιμηθεί ιδιωτική πρόσβαση ορισμένοι πόροι θα μπορούσαν να απελευθερώνονται σε λειτουργία δημόσιας πρόσβασης, ώστε να εξασφαλιστεί η δυνατότητα υπηρεσιών κλήσεων έκτακτης ανάγκης.

Οι κύριες διαφοροποιήσεις των femtocells με τα picocells παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Όπως φαίνεται στον πίνακα, μπορούμε να θεωρήσουμε τα femtocells ως μικρά picocells όπου οι ιδιώτες τους έχουν σμικρυνθεί για να μειωθεί το κόστος και να απλοποιηθεί η εγκατάσταση. Πέραν των συρρικνωμένων ιδιοτήτων τους (εμβέλεια, ισχύς, χωρητικότητα) παρουσιάζουν και δυο σημαντικές διαφορές όσον αφορά την υλοποίηση, όπως στην σύνδεση με το κεντρικό δίκτυο και στον τρόπο εγκατάστασης.

Παράμετρος	Picocells	Femtocells
Εγκατάσταση	Από τον διαχειριστή	Από τον χρήστη
Σύνδεση με το CN	Οπτική ίνα/Ομοαξονικό	ADSL, cable
Κόστος	Μικρό	Πολύ μικρό
Χωρητικότητα	10-50 χρήστες	3-5 χρήστες
Εμβέλεια	<100 m	<30 m

Πίνακας 5: Κύριες διαφορές μεταξύ των femtocells με τα picocells [13]

Αντίθετα με τα picocells, τα femtocells είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο του παρόχου μέσω ευρυζωνικής σύνδεσης των χρηστών. Το femtocell είναι ένας αυτόνομος σταθμός βάσης και συνδέεται με το CN χρησιμοποιώντας IP. Για να διατηρηθεί η αυτονομία, το femtocell είναι αυτό-ρυθμιζόμενο σε αντίθεση με το picocell που ρυθμίζεται απευθείας από τον πάροχο. Αυτό υποδηλώνει πως η διασύνδεση μεταξύ του femtocell και του βασικού δικτύου πρέπει να είναι απλή για να αποφευχθεί οποιαδήποτε ανάγκη δράσης από τον πάροχο.

Τα femtocell εγκαθίστανται από τους πελάτες μέσα στο σπίτι τους ενώ στην περίπτωση των picocells γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό κατόπιν προσεκτικής σχεδίασης και μελέτης. Αυτό σημαίνει πως η εγκατάσταση για τον χρήστη πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερη (Plug and Play). Στην ιδανική περίπτωση, ο χρήστης πρέπει μόνο να συνδέσει την παροχή ρεύματος και το femtocell στην ευρυζωνική σύνδεση.

Τα femtocells παρουσιάζουν αλματώδη ανάπτυξη και αναμένεται ακόμα μεγαλύτερη τα επόμενα χρόνια. Η κυριαρχία τους στην αγορά σε σχέση με άλλες προσεγγίσεις εξαρτάται από πλήθος παραγόντων. Τα βασικά πλεονεκτήματά τους είναι τα εξής:

- Παρέχουν κάλυψη σε εσωτερικούς χώρους όπου τα macrocells δεν μπορούν.
- Η προσθήκη ενός στρώματος femtocell βελτιώνει σημαντικά την συνολική χωρητικότητα του δικτύου με την επαναχρησιμοποίηση του φάσματος.
- Μπορούν να προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας στα τερματικά. Οι απώλειες μετάδοσης λόγω τοιχωμάτων (penetration loss) προς το εσωτερικά εγκατεστημένο femtocell είναι πολύ μικρότερες από ότι στην διαδρομή ως τον εξωτερικό σταθμό βάσης του macrocell και έτσι η απαιτούμενη ισχύς εκπομπής του UE μειώνεται. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς η διάρκεια ζωής της μπαταρίας είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστεί στην προσπάθεια παροχής υπηρεσιών υψηλής ταχύτητας δεδομένων σε κινητά τερματικά
- Εφόσον τα femtocells χρειάζεται να ενεργοποιηθούν μόνο όταν οι χρήστες βρίσκονται στο σπίτι ή στην εργασία, η χρήση τους είναι πιο «πράσινη» από τα macrocells. Η κατανάλωση ενέργειας των σταθμών βάσης αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό από το κόστος ενός δικτύου για τους χειριστές. Ένας σταθμός βάσης καταναλώνει πολύ μεγαλύτερη ισχύ από εκείνη που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση και λήψη σημάτων. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες. Πρώτον, η αποτελεσματικότητα των ενισχυτών είναι πολύ χαμηλή. Δεύτερον, ένας σταθμός βάσης απαιτεί ένα αρκετά κοστοβόρο σύστημα κλιματισμού, ώστε να διατηρείται η σωστή θερμοκρασία. Τρίτον, ένα εφεδρικό σύστημα απαιτείται σε περίπτωση απώλειας ισχύος. Τα παραπάνω έχουν οδηγήσει στην αύξηση της ανάγκης για πιο «πράσινα» συστήματα.

Τα femtocells μπορούν να βοηθήσουν τους παρόχους να προσφέρουν οικονομικά, μεγαλύτερης χωρητικότητας δίκτυα και να δημιουργήσουν ένα πιο αποδοτικό σχέδιο αναβάθμισης του δικτύου τους με μειωμένους κινδύνους και οικονομικές επιβαρύνσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως τα femtocells είναι λύσεις χαμηλού κόστους για εσωτερική κάλυψη σε σύγκριση με άλλες προσεγγίσεις καθώς οι χρήστες μοιράζονται ένα σημαντικό μέρος της εγκατάστασης και της συντήρησης των υποδομών του δικτύου. Επιπλέον, τα femtocells βελτιώνουν σημαντικά την QoS, αυξάνοντας έτσι την εμπιστοσύνη των πελατών και τη μείωση των αποσυνδέσεων.



Ωστόσο, η ανάπτυξη των femtocells ενδεχομένως να προκαλεί και κάποια προβλήματα στις εταιρείες κινητών δικτύων. Ένα από τα μειονεκτήματα των femtocells για τους παρόχους είναι η δημιουργία παρεμβολών, ο έλεγχος των οποίων γίνεται πιο τυχαίος και πιο δύσκολος. Οι παρεμβολές από τα femtocells μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στην λειτουργία των macrocells προκαλώντας για παράδειγμα τρύπες στην περιοχή κάλυψης. Εφόσον, οι πάροχοι δεν θα είναι σε θέση να έχουν πρόσβαση στις εγκαταστάσεις των συνδρομητών, η αυτό-ρύθμιση των femtocells καθίσταται πολύ σημαντική, όπως και η δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης και συντήρησης από τους παρόχους. Οι πάροχοι θα πρέπει παρατάσσουν τα macrocells και τα femtocells στην ίδια ζώνη συχνοτήτων, προκειμένου να βελτιωθούν η συνολική χωρητικότητα του δικτύου και η φασματική απόδοση [13].

### 3. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ QOS ΣΤΟ LTE-A

#### 3.1 Quality of Service, (QoS)

Η αύξηση της χρήσης των κινητών τηλεφώνων αλλά και των χρηστών κινητής τηλεφωνίας έφερε στο προσκήνιο την ανάγκη για την ανάπτυξη υπηρεσιών και εφαρμογών, οι οποίες θα ξεπερνούσαν τα όρια των υπηρεσιών ομιλίας και θα εμπλούτιζαν τα δίκτυα με υπηρεσίες αποστολής/λήψης, βίντεο και περιήγησης στο διαδίκτυο. Η ανάπτυξη και η εξέλιξη των δικτύων επέφερε πρόσφορο έδαφος για τη δημιουργία υπηρεσιών με μεγαλύτερο φόρτο για το δίκτυο αλλά και με μεγαλύτερες απαιτήσεις από αυτό. Σαν αποτέλεσμα, οι χρήστες των υπηρεσιών αυτών απαιτούσαν ολοένα και μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης αλλά και πιο ολοκληρωμένη εξυπηρέτηση από τις εταιρείες. Οι συνθήκες αυτές εισήγαγαν το μέγεθος της QoS στα δίκτυα.

Ο όρος Ποιότητα Υπηρεσίας (Quality of Service, (QoS)) αναφέρεται στην δυνατότητα του δικτύου να προσφέρει καλύτερες υπηρεσίες προς τους χρήστες του. Δηλαδή, οι υπηρεσίες να χαρακτηρίζονται από τη διαθεσιμότητα, τον εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης, την ικανοποιητική διέλευση των δεδομένων, την ελεγχόμενη καθυστέρηση και τη μικρή διακύμανση της καθυστέρησης(jitter). Η QoS διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε κάθε σύγχρονο δίκτυο. Από τη πλευρά του χρήστη απαιτείται το δίκτυο όχι απλά να τον εξυπηρετεί αλλά να τον εξυπηρετεί με βάση τις δικές του ανάγκες.

Η πρώτη κύρια ανάγκη ενός χρήστη είναι να μπορεί να συνδέεται ανά πάσα στιγμή στο δίκτυο. Η πιθανότητα σύνδεσης θα πρέπει να είναι πάνω από 90% και ο χρόνος αναμονής για μια σύνδεση δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από μερικά δευτερόλεπτα. Μια δεύτερη απαίτηση είναι το δίκτυο να είναι ικανό να διατηρεί ενεργή τη σύνδεση κατά την ολική διάρκεια της κλήσης και να μην παρουσιάζονται φαινόμενα διακοπής επικοινωνίας. Αυτή η απαίτηση ικανοποιείται σε όλα τα επίγεια δίκτυα αλλά στις κινητές τηλεπικοινωνίες υφίστανται πολλές δυσκολίες καθώς απαιτείται πλήρης γεωγραφική κάλυψη και μεγάλη χωρητικότητα σε κάθε κυψέλη. Η τρίτη απαίτηση του χρήστη είναι η ποιότητα της κλήσης, καθώς επιθυμεί η ποιότητα της φωνής να προσεγγίζει την πραγματική ποιότητα. Γι' αυτό, διαφορετικοί αλγόριθμοι συμπίεσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, ώστε να ελαχιστοποιήσουν τον όγκο της πληροφορίας χωρίς όμως να αποκλίνουν σημαντικά από την πραγματική ποιότητα.

Όλες οι παραπάνω απαιτήσεις τίθενται όμως στις υπηρεσίες δεδομένων και όχι μόνο σε φωνητικές υπηρεσίες. Η σημαντικότερη απαίτηση είναι συνήθως η μεγάλη ταχύτητα, ενώ ακολουθούν οι απαιτήσεις για λίγα λάθη και για μη απώλεια της πληροφορίας. Βέβαια ανάλογα με την υπηρεσία τίθενται και διαφορετικές απαιτήσεις. Για παράδειγμα, στην μεταφορά αρχείων απαιτείται ακεραιότητα δεδομένων, ενώ στην παροχή video επιζητείται μεγάλη ταχύτητα μεταφοράς.

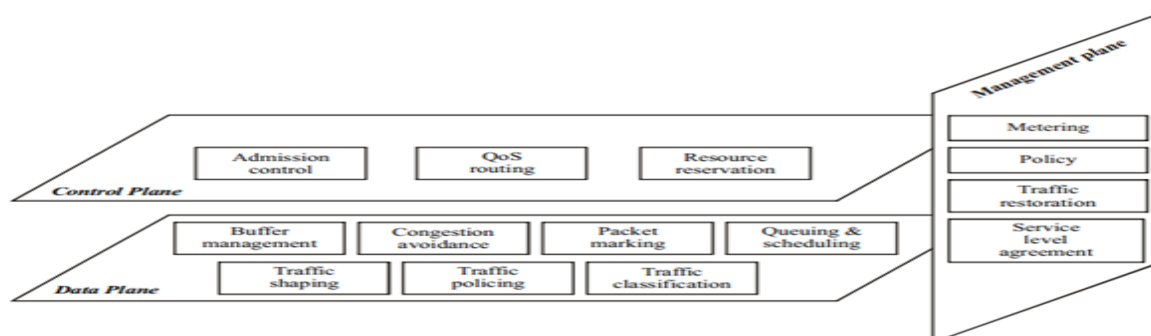
### 3.1.1 Σημαντικές παράμετροι για την QoS

Οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τον χρήστη, ο οποίος είναι κριτής της προσφερόμενης QoS, είναι η καθυστέρηση, η διακύμανση καθυστέρησης (jitter) και η απώλεια των δεδομένων. Οι υπόλοιπες παράμετροι της QoS είναι η διαθεσιμότητα υπηρεσιών, ικανοποιητική διέλευση δεδομένων, ρυθμός σφάλματος. Αυτές μαζί με άλλες όπως είναι ο εγγυημένος ρυθμός μετάδοσης, ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης κτλ, διαφοροποιούν τις τάξεις QoS και καθορίζουν τα διαφορετικά προφίλ QoS που προσφέρουν τα δίκτυα. Στη συνέχεια, ακολουθεί μικρή περιγραφή των σημαντικών παραμέτρων:

- Καθυστέρηση: Είναι ο χρόνος μεταξύ μιας ενέργειας του χρήστη και του αποτελέσματος της. Οι χαμηλοί χρόνοι καθυστέρησης σημαίνουν υψηλές ταχύτητες συναλλαγής ενώ οι μεγάλες καθυστερήσεις υπάρχουν κυρίως σε μεταφορές δεδομένων.
- Διακύμανση καθυστέρησης (jitter): Περιγράφει μεταβλητούς χρόνους άφιξης των πακέτων στον παραλήπτη, το οποίο είναι ιδιαίτερα ενοχλητικό για ορισμένες υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και καταπολεμάται με την χρήση τεχνικών ενδιάμεσης καταχώρησης (buffering), οι οποίες εξαλείφουν αυτό το φαινόμενο.
- Απώλεια δεδομένων: Είναι το ποσοστό των δεδομένων που δεν παραδίδονται ή που παραδίδεται έχοντας όμως σφάλματα. Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι που επιδιώκουν να διορθώσουν τα προβλήματα αυτά αλλά δεν είναι πάντα εφικτό. Εφαρμογές όπως η μεταφορά αρχείων απαιτούν μηδενική απώλεια δεδομένων, ενώ η μετάδοση βίντεο είναι ανεκτικές μέχρι κάποιο σημείο.

### 3.1.2 Τα δομικά στοιχεία της QoS

Το κλειδί για την υποστήριξη εγγυημένης QoS σε ένα δίκτυο είναι η ύπαρξη ενός συνόλου από ειδικούς μηχανισμούς μέσα στο δίκτυο που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της απόκρισης του δικτύου μετά από ένα αίτημα υπηρεσίας. Η απόκριση μπορεί να εστιάζεται σε ένα συγκεκριμένο στοιχείο του δικτύου ή στη σηματοδότηση μεταξύ των στοιχείων του δικτύου ή στον έλεγχο και τη διαχείριση της κίνησης μέσα σε ένα δίκτυο.



Εικόνα 8: Τα δομικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής του framework της QoS [14]

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία της QoS, τα οποία ταξινομούνται σε τρία επίπεδα:

- Επίπεδο ελέγχου: περιλαμβάνει μηχανισμούς που ασχολούνται με τους τρόπους επιλογής της διαδρομής μέσω των οποίων «ταξιδεύει» η κίνηση. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν έλεγχο εισόδου, δρομολόγηση της QoS και δέσμευση πόρων.
- Επίπεδο δεδομένων: περιλαμβάνει μηχανισμούς που σχετίζονται άμεσα με την κίνηση που παράγεται από το χρήστη. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τη διαχείριση προσωρινής καταχώρησης δεδομένων, την αποφυγή της συμφόρησης, τη σήμανση των πακέτων, την αναμονή σε ουρά, τον χρονοπρογραμματισμό, την ταξινόμηση, την αστυνόμευση και τη μορφοποίηση.
- Επίπεδο διαχείρισης: περιλαμβάνει μηχανισμούς που σχετίζονται με τη λειτουργία, τη διοίκηση και τη διαχείριση του δικτύου. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν τα SLA (Service Level Agreement), την αποκατάσταση της κίνησης, τη μέτρηση, την εγγραφή και την αστυνόμευση της κίνησης.

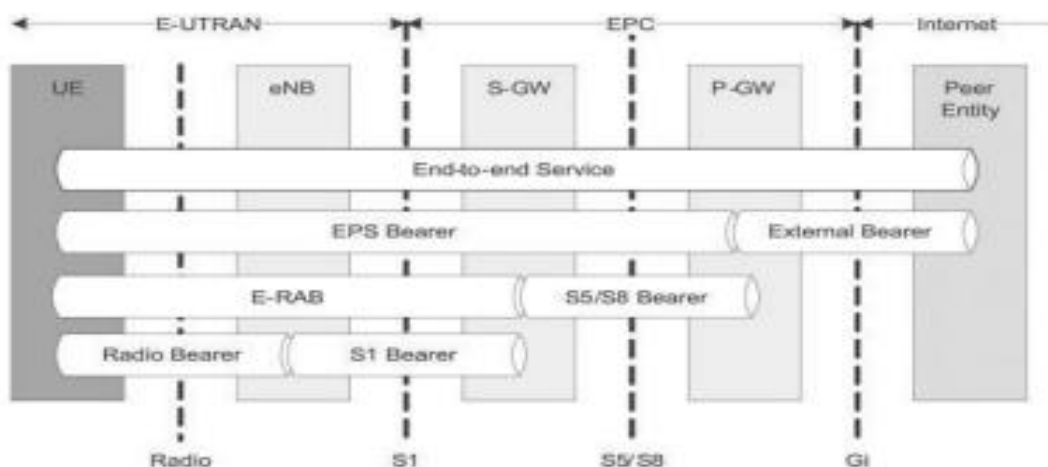
Η σηματοδосία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε καθένα από τα τρία λογικά επίπεδα και μπορεί να θεωρηθεί σαν αλληλεπίδραση μεταξύ των δομικών αυτών στοιχείων. Όταν έχουμε σηματοδосία στο επίπεδο ελέγχου ή διαχείρισης χρησιμοποιείται πρωτόκολλο σηματοδосίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η αρχιτεκτονική της QoS είναι λογική και δεν θέτει περιορισμούς στο πως ένα δομικό στοιχείο θα πραγματοποιηθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η υλοποίηση ενός δομικού στοιχείου να είναι κατανεμημένη ή κεντριοποιημένη [14].

### 3.2 QoS στο LTE-A

Η δόκιμη μονάδα για την QoS στα δίκτυα LTE-A ονομάζεται bearer(κομιστής). Ο bearer είναι αυτός που φέρει την πληροφορία που επιτρέπει τη διαφορετική διαχείριση της κυκλοφορίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις QoS. Δηλαδή, πρόκειται για ροή πακέτων μεταξύ της θύρας P-GW και του UE. Η κίνηση μεταξύ της συγκεκριμένης εφαρμογής χρήστη και μιας υπηρεσίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαφορετικές ροές δεδομένων, καθεμία από τις οποίες ονομάζεται ροή δεδομένων υπηρεσιών (Service Data Flows, (SDFs)). Οι SDFs που οδηγούνται στον ίδιο κομιστή λαμβάνουν ίδια ποιότητα υπηρεσίας, όπως πολιτική διαχείριση ουρών, πολιτική χρονοπρογραμματισμού, πολιτική διαμόρφωσης ρυθμού και διαμόρφωση του ελέγχου της ασύρματης σύνδεσης. Υπάρχουν τρία είδη bearers στο LTE-A, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 9:

- Οι ράδιο-κομιστές σύνδεσης (radio bearer)
- Οι κομιστές σύνδεσης (S1 bearer)

- Οι EPS bearers σύνδεσης



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική υπηρεσιών EPS φορέα [4]

Οι radio bearers φέρουν πληροφορία πάνω στην ράδιο-διεπαφή, ενώ οι S1 bearers υπάρχουν μεταξύ eNodeB και της MME/S-GW. Οι EPS bearers βρίσκονται μεταξύ της MME και της S-GW. Υπάρχει μια αντιστοίχιση ένα προς ένα μεταξύ των radio bearers, των S1 bearers και των EPS bearers. Οι radio bearers εγκαθιδρύονται χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο RRC. Οι EPS bearers παρέχουν υπηρεσίες σύνδεσης ώστε να έχει πρόσβαση το E-UTRAN στο EPS.

Υπάρχει μια σημαντική έννοια που αφορά τους EPS bearers, η οποία είναι το TFT (Πρότυπο Ροής Κίνησης, Traffic Flow Template). Το TFT χρησιμοποιείται για να διακρίνονται τα διαφορετικά φορτία κίνησης. Το TFT χρησιμοποιεί κεφαλίδα IP, όπως διεύθυνση IP ή νούμερο θύρας κλπ, ώστε να πραγματοποιήσει την διάκριση. Κάθε TFT αντιστοιχεί σε μια ποιότητα υπηρεσιών και όλα τα δεδομένα που αντιστοιχούν σε αυτό το TFT έχουν την ίδια μεταχείριση όσον αφορά την QoS.

Ένας EPS bearer εγκαθιδρύεται όταν ο UE συνδέεται στο PDN και παραμένει σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης. Λέγεται default bearer, ο οποίος παρέχει πάντα IP σύνδεση στο δίκτυο. Κάθε επιπρόσθετος EPS bearer λέγεται dedicated bearer, ο οποίος σχετίζεται με ένα TFT και κάθε TFT έχει μια QoS. Έτσι, κάθε dedicated bearer σχετίζεται πάντα με μια QoS. Το TFT ανερχόμενης ζεύξης και το TFT κατερχόμενης ζεύξης χρησιμοποιούνται για την αντιστοίχιση της κίνησης στην ανερχόμενη και στην κατερχόμενη ζεύξη αντίστοιχα με μια QoS. Η αντιστοίχιση αυτή για την ανερχόμενη ζεύξη συμβαίνει στον eNodeB και για την κατερχόμενη ζεύξη συμβαίνει είτε στην S-GW είτε στην P-GW.

Ένας EPS bearer, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, προσδιορίζει ροές πακέτων που έχουν την ίδια QoS συμπεριφορά μεταξύ τερματικού και πύλης. Μια ροή δεδομένων ορίζεται από five-tuple φίλτρα-πακέτου. Συγκεκριμένα, η διεύθυνση IP προέλευσης και προορισμού, η θύρα προέλευσης και προορισμού και το πρωτόκολλο ID συνήθως

αναφέρονται ως IP five-tuple. Τα φίλτρα των πακέτων στο τερματικό (για την ανερχόμενη κυκλοφορία) και στην πύλη (για την κατερχόμενη κυκλοφορία) καθορίζουν το πακέτο των ροών που συνδέεται με τον EPS bearer. Ο bearer είναι το επίπεδο ανάλυσης για τον έλεγχο του bearer-level QoS στο EPS. Δηλαδή, όλα τα πακέτα ροών που αντιστοιχίζονται στον ίδιο bearer λαμβάνουν το ίδιο πακέτο και προώθησης συμπεριφοράς (πολιτική προγραμματισμού, πολιτική διαχείριση της ουράς, διαμόρφωση επιπέδου σύνδεσης). Η παροχή διαφορετικών πακέτων προώθησης απαιτεί ξεχωριστούς bearers. Ένας bearer υπάρχει ανά συνδυασμό της κλάσης QoS και της IP διεύθυνσης του τερματικού. Ένα τερματικό μπορεί να έχει πολλές διευθύνσεις IP. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που είναι συνδεδεμένο με multiple APNs, (μια IP διεύθυνση ανά APN)). Το APN είναι μια αναφορά στο δίκτυο IP με την οποία το σύστημα συνδέει το τερματικό. Δηλαδή, το τερματικό μπορεί να έχει δύο ξεχωριστούς bearers που σχετίζονται με την ίδια κλάση QoS δύο διαφορετικών APNs.

Κάθε IP πακέτο από άκρο σε άκρο που εισέρχεται στο σύστημα εφοδιάζεται με μια tunnel-κεφαλίδα για διαφορετικές διεπαφές του συστήματος. Η tunnel κεφαλίδα περιέχει το αναγνωριστικό του bearer, έτσι οι κόμβοι του δικτύου μπορούν να αντιστοιχίσουν το πακέτο με τις σωστές QoS παραμέτρους. Στο δίκτυο μεταφοράς, η tunnel-κεφαλίδα περιέχει μία τιμή Different Service Code Point (DSCP), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 10. Ο bearer είναι κατάλληλος για το διαχωρισμό της κυκλοφορίας. Δηλαδή, παρέχει διαφορετική μεταχείριση για την κυκλοφορία με διαφορετικές QoS απαιτήσεις. Η έννοια του bearer και η διαδικασία σηματοδότησης επιτρέπουν στο σύστημα να εξασφαλίσει του πόρους του (π.χ. επεξεργασία και χωρητικότητα μετάδοσης) πριν οι ροές των πακέτων που αντιστοιχούν στον bearer εισαχθούν στο σύστημα. Το τελευταίο εκτελείται μέσω μιας λειτουργίας ελέγχου εισόδου που λειτουργεί στο pre-bearer επίπεδο .

Το LTE-A έχουν δύο ειδών EPS bearers:

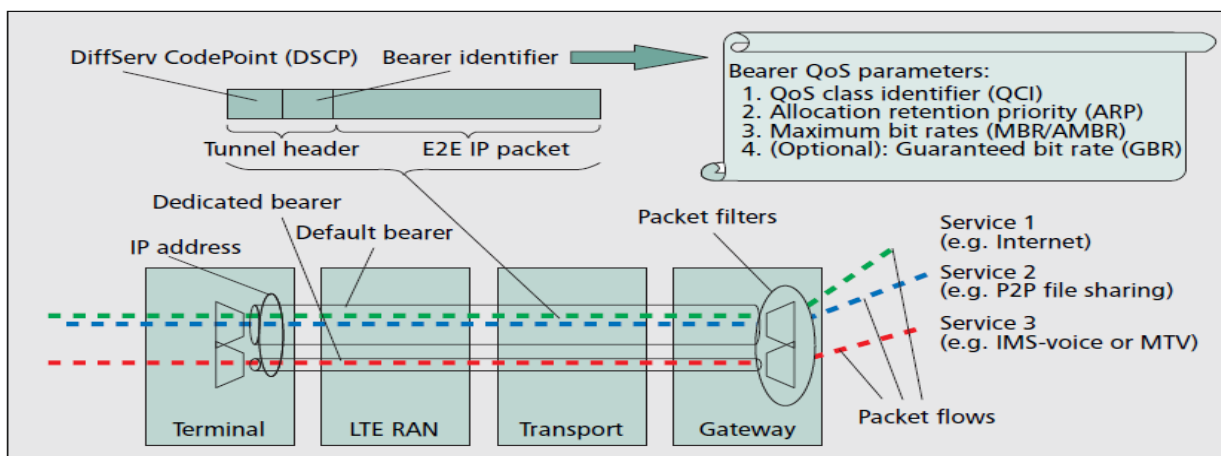
- **Guaranteed Bit Rate, (GBR):** Οι πόροι ενός αφιερωμένου δικτύου που σχετίζονται με την παράμετρο GBR του bearer κατανέμονται μόνιμα όταν ο bearer εγκαθίσταται ή διαμορφώνεται [5], [6].
- **Non-Guaranteed Bit Rate (Non-GBR):** Οι bearers αυτού του είδους δεν εγγυώνται κάποιο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, όπως οι bearers GBR και δεν αφιερώνονται μόνιμα πόροι για αυτά. Μια υπηρεσία που χρησιμοποιεί ένα Non-GBR bearer είναι πιθανόν να αντιμετωπίσει απώλειες πακέτων σχετιζόμενες με συμφόρηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση υπηρεσιών ιστού. Ένας Non-GBR bearer αναφέρεται ως dedicated bearer και χρησιμοποιείται επίσης για την εγκατάσταση σύνδεσης IP. Ο dedicated bearer παραμένει εγκατεστημένος σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης με το PDN έτσι ώστε να προσφέρει αδιάκοπη συνδεσιμότητα προς αυτό [5], [6].

Δηλαδή, ο GBR bearer συνήθως εγκαθίσταται υπό αίτηση επειδή εμποδίζει τη μετάδοση πόρων μέσω της λειτουργίας ελέγχου εισόδου. Από την άλλη πλευρά, ένας non-GBR bearer μπορεί να εγκατασταθεί για μεγάλη χρονική περίοδο καθώς δεν εμποδίζει τη μετάδοση των πόρων.

Ο διαχειριστής επιλέγει GBR bearers για υπηρεσίες όπου η προτεινόμενη UX είναι «service blocking over service dropping», δηλαδή μπλοκάρεται ένα αίτημα υπηρεσίας αντί να τεθεί σε υποβιβασμό η απόδοση των ήδη υφιστάμενων ζητημάτων υπηρεσίας. Αν πραγματοποιείται μια υπηρεσία με βάση GBR ή non-GBR bearers οφείλεται στο ότι αποτελεί πολιτική απόφαση του διαχειριστή καθώς εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το αναμενόμενο φορτίο κυκλοφορίας σε σχέση με την χωρητικότητα. Κάθε υπηρεσία τόσο σε πραγματικό χρόνο όσο και σε μη πραγματικό χρόνο μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω non-GBR bearers υποθέτοντας ότι υπάρχει επαρκής χωρητικότητα.

Ένας bearer είναι default ή dedicated bearer προκειμένου να χαρακτηριστεί ως GBR ή non-GBR. Ο default bearer είναι ένας bearer που εγκαθίσταται όταν το τερματικό συνδέεται με το δίκτυο. Ένας default bearer υφίσταται ανά τερματικό που έχει μια διεύθυνση IP και διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα το τερματικό διατηρεί την IP διεύθυνση. Ο default bearer παρέχει τη βασική σύνδεση. Επειδή, ο default bearer παραμένει εγκατεστημένος για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι 3GPP προδιαγραφές απαιτούν ότι ο default bearer είναι ένας non-GBR bearer. Το επίπεδο QoS του default bearer έχει ανατεθεί με βάση τα δεδομένα εγγραφής.

Ένας ή περισσότεροι dedicated bearers απαιτούνται για την παροχή διαφορετικής QoS στο δίκτυο στην περίπτωση που υπάρχουν δύο διαφορετικές ροές πακέτου προς το ίδιο τερματικό. Ο dedicated bearer μπορεί να είναι GBR ή non-GBR bearer. Ο διαχειριστής μπορεί να ελέγξει ποιες ροές πακέτου αντιστοιχίζονται στον dedicated bearer καθώς και το επίπεδο QoS του dedicated bearer μέσω των πολιτικών που προέρχονται από την PCRF. Η Εικόνα 10 απεικονίζει ένα τερματικό όπου έχουν εγκατασταθεί default και dedicated bearer.



Εικόνα 10: Οι default και dedicated bearers και οι συσχετιζόμενες παράμετροι QoS [21]

Η PCRF ορίζει συγκεκριμένες ροές πακέτων που αντιστοιχίζονται στον dedicated bearer και τις ορίζει συνήθως χρησιμοποιώντας μια IP five-tuple. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται στην five-tuple μπορεί να έχουν σηματοδοτηθεί κατά τη διάρκεια της εφαρμογής στο επίπεδο σηματοδότησης, όπως η Session Initiation Protocol (SIP) σηματοδότηση στην περίπτωση μιας IMS - συνόδου φωνής. Ο default bearer συνήθως δεν συνδέεται με ειδικά φίλτρα πακέτων. Αυτός χρησιμοποιεί ένα «match all» για το φίλτρο πακέτου που σημαίνει ότι κάθε πακέτο δεν ταιριάζει με οποιαδήποτε από τα

υπάρχοντα φίλτρα πακέτων του dedicated bearer που αντιστοιχίζονται στον default bearer. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι αν ένας dedicated bearer πέσει από το σύστημα, οι ροές του πακέτου που αρχικά μεταφέρθηκαν με αυτόν τον bearer δρομολογούνται ξανά στον default bearer [21].

### 3.2.1 QoS παράμετροι σε επίπεδο bearer

Το προφίλ της QoS του EPS bearer περιλαμβάνει δύο ή τέσσερις παραμέτρους QoS ανάλογα με την υπηρεσία (real-time ή best effort). Κάθε EPS bearer (GRB ή Non-GRB) σχετίζεται με αυτές και είναι οι εξής:

- Η ταυτότητα κλάσης της QoS (QoS Class Identifier, (QCI))
- Η Προτεραιότητα Ανάθεσης και Κράτησης (Allocation and Retention Priority, (ARP))
- Τον GBR - real-time services only
- Τον MBR (Maximum Bit Rate) - real-time services only

Μια QCI είναι μια βαθμωτή παράμετρος που χρησιμοποιείται σαν αναφορά για να έχει πρόσβαση σε παραμέτρους που ελέγχουν την διαχείριση της προώθησης πακέτων επιπέδου φορέα. Ενδεικτικές παράμετροι μπορεί να είναι τα κατώφλια υποδοχής, τα κατώφλια διαχείρισης ουράς, την ρύθμιση του πρωτοκόλλου επιπέδου σύνδεσης, οι οποίες είναι προρυθμισμένες από αυτόν που κατέχει τον κόμβο πρόσβασης (π.χ. τον eNodeB).

Η ARP περιέχει πληροφορίες για το επίπεδο προτεραιότητας, της εκ των προτέρων χωρητικότητας προτίμησης και της εκ των προτέρων τρωτής προτίμησης. Ο πρωταρχικός σκοπός της ARP είναι να αποφασίζει αν η αίτηση εγκαθίδρυσης/τροποποίησης μπορεί να γίνει δεκτή ή χρειάζεται να απορριφθεί σε περίπτωση περιορισμένων πόρων. Η ARP του προεπιλεγμένου bearer πρέπει να είναι κατάλληλα ορισμένη ώστε να ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο της άσκοπης διάθεσης του προεπιλεγμένου bearer.

Κάθε APN (Access Point Name) πρόσβαση, από τον UE, σχετίζεται με την παρακάτω παράμετρο QoS:

- Το συνολικό Μέγιστο Ρυθμό Bit (APN Aggregate Maximum Bit Rate, (APN\_AMBR)). Ο APN\_AMBR είναι παράμετρος που αποθηκεύεται για κάθε APN στον HSS. Είναι το όριο του συνολικού ρυθμού που αναμένεται να παρέχεται κατά μήκος όλων των Non-GBR bearers και όλων των συνδέσεων PDN της ίδιας APN. Κάθε ένας από τους φορείς μπορεί να χρησιμοποιήσει σημαντικά όλο τον APN\_AMBR, όταν για παράδειγμα ο άλλος bearer δεν έχει καθόλου κίνηση. Οι GRB bearers εξαιρούνται από την έννοια αυτού του ρυθμού. Η P-GW επιβάλλει APN\_AMBR στην καθοδική



ζεύξη. Η επιβολή του στην ανοδική ζεύξη γίνεται στον UE και επιπρόσθετα στην P-GW.

Κάθε UE στην κατάσταση EMM-REGISTERED σχετίζεται με την παρακάτω παράμετρο συνολικού επιπέδου QoS bearer:

- Τον συνολικό Μέγιστο Ρυθμό Bit για κάθε UE (User Equipment Aggregate Maximum Bit Rate, (UE-AMBR)). Ο UE-AMBR περιορίζεται από μια παράμετρο που είναι αποθηκευμένη στον HSS. Η MME θέτει στον UE-AMBR την τιμή του αθροίσματος των APN\_AMBR όλων των ενεργών APN μέχρι την τιμή του αποθηκευμένου UE-AMBR. Ο UE-AMBR περιορίζει τον συνολικό ρυθμό bit που αναμένεται κατά μήκος όλων των Non- GBR bearers ενός UE. Κάθε ένας από αυτούς τους bearers μπορεί να χρησιμοποιήσει όλο τον UE-AMBR, όταν για παράδειγμα ο άλλος bearer δεν έχει καθόλου κίνηση. Οι GBR bearers εξαιρούνται από την έννοια αυτού του ρυθμού. Το E-UTRAN επιβάλλει τον UE-AMBR τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη [4], [8].

### 3.2.2 QoS Class Identifier, (QCI)

Τα δίκτυα LTE ορίζουν ένα σύνολο προκαθορισμένων QCI μεταβλητών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά: την προτεραιότητα, το περιθώριο καθυστέρησης πακέτων και τον αποδεκτό ρυθμό απώλειας πακέτων. Ανάλογα με τον τύπο QCI που χαρακτηρίζει τον bearer, αυτό χαίρει διαφορετικής μεταχείρισης από τον eNodeB. Μόνο μια δωδεκάδα όπως τα QCIs έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε οι προμηθευτές να έχουν όλοι την ίδια κατανόηση των χαρακτηριστικών υποκείμενων υπηρεσιών και να παρέχουν έτσι την αντίστοιχη αντιμετώπιση συμπεριλαμβανόμενης της στρατηγικής διαχείρισης σειρών αναμονής, κατάστασης και πολιτικής. Αυτό εξασφαλίζει ότι ένας χειριστής του LTE μπορεί να αναμένει την ομοιόμορφη συμπεριφορά χειρισμού κυκλοφορίας σε όλο το δίκτυο άσχετα των κατασκευαστών του eNodeB εξοπλισμού στο σύνολο των τυποποιημένων QCIs και τα χαρακτηριστικά τους.

QCI	Bearer Type	Priority	Packet Delay	Packet Loss	Example
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	VoIP call
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Video call
3		3	50 ms		Online Gaming (Real Time)
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Video streaming
5	Non-GBR	1	100 ms		IMS Signaling
6		6	300 ms		Video, TCP based services e.g. email, chat, ftp etc
7		7	100 ms		Voice, Video, Interactive gaming
8		8	300 ms		$10^{-6}$
9	9				

Πίνακας 6: Τυποποιημένοι QoS Class Identifiers (QCIs) για το LTE [7]

Στον Πίνακα 6, η QCI διευκρινίζει τις τιμές για τον χειρισμό προτεραιότητας, τον αποδεκτό προϋπολογισμό καθυστέρησης και ποσοστό απώλειας σφάλματος πακέτων για κάθε ετικέτα QCI. Η προτεραιότητα και ο προϋπολογισμός καθυστέρησης πακέτων (σε ένα ορισμένο βαθμό το αποδεκτό ποσοστό απώλειας πακέτων) από την ετικέτα QCI καθορίζουν την διαμόρφωση τρόπου του RLC και το πώς ο προγραμματιστής στη MAC χειρίζεται τα πακέτα που στέλνονται πάνω στον φορέα. Παραδείγματος χάριν, ένα πακέτο με πιο υψηλή προτεραιότητα μπορεί να αναμένεται να προγραμματιστεί πριν από ένα πακέτο με χαμηλότερη προτεραιότητα. Για τους φορείς με ένα χαμηλό αποδεκτό ποσοστό απώλειας, ένας αναγνωρισμένος τρόπος (Acknowledged Mode, (AM)) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα στο στρώμα του πρωτοκόλλου RLC για να εξασφαλιστεί ότι τα πακέτα παραδίδονται επιτυχώς κατά μήκος της ράδιο διεπαφής.

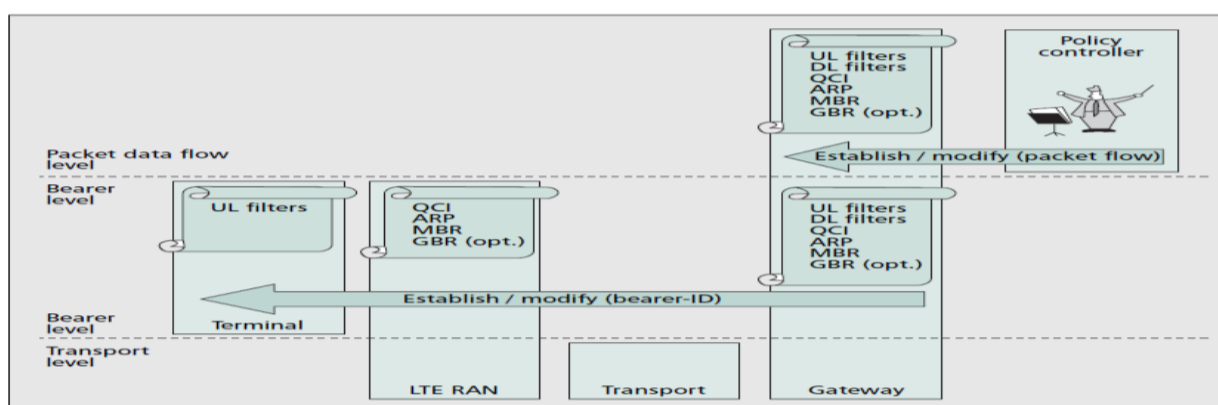
### 3.3 Υποστήριξη QoS μέσω της PCRF

#### 3.3.1 QoS μηχανισμοί

Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την παροχή QoS στο EPS σύστημα, διακρίνονται σε διαδικασίες επιπέδου, ελέγχου σηματοδότησης και λειτουργίες επιπέδου χρήστη.

##### 3.3.1.1 Διαδικασίες επιπέδου ελέγχου σηματοδότησης

Η PCRF του δικτύου καθορίζει τον τρόπο που κάθε ροή πακέτου για κάθε συνδρομητή πρέπει να διαχειριστεί με βάση τους όρους των παραμέτρων QoS που συσχετίζεται με την διαχείριση της εν λόγω ροής δεδομένων. Η PCRF μπορεί να εκδώσει τους κανόνες PCC στην πύλη, η οποία με την σειρά της τους χρησιμοποιεί ως ένα έναυσμα για να εγκαθιδρύσει έναν νέο bearer ή να τροποποιήσει έναν υφιστάμενο bearer για να διαχειριστεί μια συγκεκριμένη ροή πακέτου ή να τροποποιήσει τη διαχείριση της ροής δεδομένων. Η ροή των πακέτων περιγράφεται από τα φίλτρα των πακέτων UL/DL. Το αίτημα επιπέδου bearer διαβιβάζεται στο LTE Radio Access Network (RAN) εφόσον γίνει δεκτό από όλους τους εμπλεκόμενους κόμβους μεταξύ του δικτύου και του τερματικού. Μια υψηλού επιπέδου άποψη για τη σηματοδότηση της ροής απεικονίζεται στην Εικόνα 11.

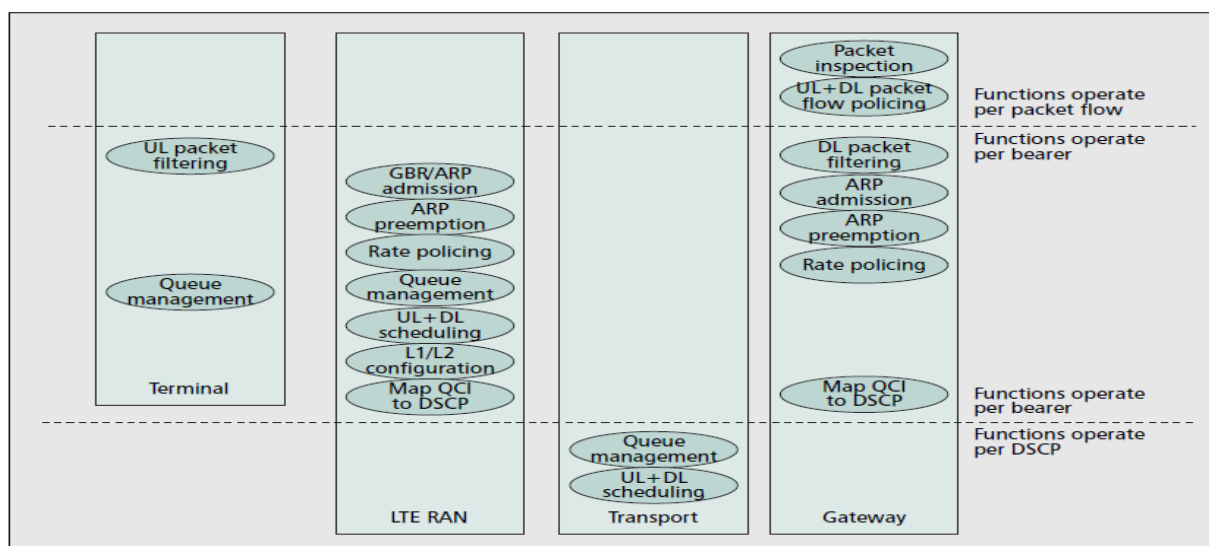


Εικόνα 11: Η προβολή των διαδικασιών σηματοδότησης για τον έλεγχο των λειτουργιών της QoS [21]

Εκτός από τις δυναμικές επιπέδου ελέγχου διαδικασίες σηματοδότησης, ο διαχειριστής πρέπει να πραγματοποιήσει μια άμεση ημι-στατική διαμόρφωση των λειτουργιών QoS στους κόμβους του δικτύου μέσω της operation and maintenance (O&M) του συστήματος. Ένα παράδειγμα από αυτή την ημι-στατική διαμόρφωση των λειτουργιών των εσωτερικών κόμβων είναι ο προγραμματισμός λειτουργιών.

### 3.3.1.2 Λειτουργίες επιπέδου χρήστη

Η διαμόρφωση των κόμβων του δικτύου (τόσο μέσω διαδικασιών σηματοδότησης που καθορίζεται από την 3GPP και μέσω του O&M συστήματος) επιτρέπει να πραγματοποιούν λειτουργίες QoS στο επίπεδο χρήστη. Οι λειτουργίες αυτές ανατίθενται σε διαφορετικούς κόμβους και ταξινομούνται σε λειτουργίες που λειτουργούν ανά ροή πακέτου, ανά bearer ή ανά DSCP όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 12.



Εικόνα 12: Οι λειτουργίες QoS στο επίπεδο του χρήστη [21]

### 3.3.1.3 Λειτουργίες επιπέδου ροής πακέτου

Η 3GPP καθορίζει ορισμένες QoS λειτουργίες που λειτουργούν στο επίπεδο ροής πακέτου. Χρησιμοποιώντας την πολιτική του ρυθμού ροής πακέτου, μια πύλη (ή ένας φυσικός ξεχωριστός κόμβος του δικτύου) μπορεί να προσδιορίσει ορισμένες ροές πακέτων χρησιμοποιώντας τεχνικές επιθεώρησης πακέτου και μειώνει το ρυθμό bit που υφίσταται η συγκεκριμένη ροή πακέτου χωρίς να προβεί στην τροποποίηση των παραμέτρων QoS του επιπέδου χρήστη. Αυτό αποτελεί μια χρήσιμη λειτουργία QoS που επιτρέπει στον διαχειριστή να περιορίσει την απόδοση εμπειρίας από το λεγόμενο “flat rate abuser” που είναι ένας συνδρομητής με ένα σχέδιο αξιολόγησης του flat rate και εμπλέκεται σε εκτεταμένες προσθήκες και λήψεις.

### 3.3.1.4 Λειτουργίες επιπέδου bearer

Το τερματικό και η πύλη εκτελούν φιλτράρισμα στο πακέτο κατά το UL/DL και αντίστοιχα αντιστοιχίζουν την ροή του πακέτου σε έναν προβλεπόμενο bearer. Αυτές οι υποκείμενες λειτουργίες που παρέχει το δίκτυο μέσω της λειτουργικότητας διαχωρισμού κίνησης.

Η πύλη και το LTE RAN μπορούν να εφαρμόσουν λειτουργίες που σχετίζονται με τον έλεγχο απόδοσης και διαχείριση προτίμησης (δηλαδή έλεγχο συμφόρησης) για να μπορούν οι εν λόγω κόμβοι να περιορίσουν και να ελέγξουν το φορτίο τους. Αυτές οι λειτουργίες μπορεί να λάβουν τιμή ARP ως εισοδο για να διαφοροποιήσουν τη διαχείριση των διαφορετικών bearers σε αυτές τις λειτουργίες. Για παράδειγμα, η ARP μπορεί να χρησιμοποιηθεί από την λειτουργία προτίμησης για να καθοριστούν ποιοι bearers να αποδεσμεύσουν το σύστημα σε περιπτώσεις όπου το σύστημα είναι υπερφορτωμένο ή όταν οι πόροι πρέπει να ελευθερώνονται για άλλους σκοπούς (όπως μια εισερχόμενη κλήση έκτακτης ανάγκης). Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι bearers έχουν χαμηλή κατανομή και η προτεραιότητα διατήρησης απελευθερώνεται [21].

Η πύλη και το LTE RAN εφαρμόζουν τις λειτουργίες που σχετίζονται με την πολιτική αξιολόγησης. Ο στόχος αυτών των λειτουργιών είναι διπλός: να προστατεύεται το δίκτυο από τυχόν υπερφόρτωση και να εξασφαλίσουν ότι οι υπηρεσίες στέλνουν δεδομένα σύμφωνα με τους καθορισμένους μέγιστους ρυθμούς (MBR, AMBR). Για τους non-GBR bearers, η πύλη εκτελεί πολιτική αξιολόγησης με βάση τις τιμές APN-AMBR τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη κυκλοφορίας, ενώ το LTE RAN εκτελεί πολιτική αξιολόγησης με βάση την τιμή AMBR του τερματικού τόσο για την ανερχόμενη όσο και για την κατερχόμενη ζεύξη κυκλοφορίας. Για τους GBR bearers, η πολιτική MBR πραγματοποιείται στην πύλη για την κατερχόμενη ζεύξη κυκλοφορίας και στο LTE RAN για την ανερχόμενη ζεύξη κυκλοφορίας. Για την κατανομή των πόρων RAN μεταξύ των εγκαθιδρυμένων φορέων, το LTE RAN υλοποιεί προγραμματισμένες λειτουργίες UL/DL. Η προγραμματισμένη λειτουργία είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνη για την εκπλήρωση των χαρακτηριστικών QoS που σχετίζονται με διαφορετικούς bearers.

Το LTE RAN είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση των L1 και L2 πρωτοκόλλων της ασύρματης σύνδεσης του bearer σύμφωνα με τα QoS χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τον bearer. Επίσης, αυτό περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του πρωτοκόλλου σφάλματος ελέγχου (π.χ. διαμόρφωση, κωδικοποίηση) έτσι ώστε να πληρούνται τα QoS χαρακτηριστικά προϋπολογισμού καθυστέρησης πακέτων και απώλειας πακέτων.

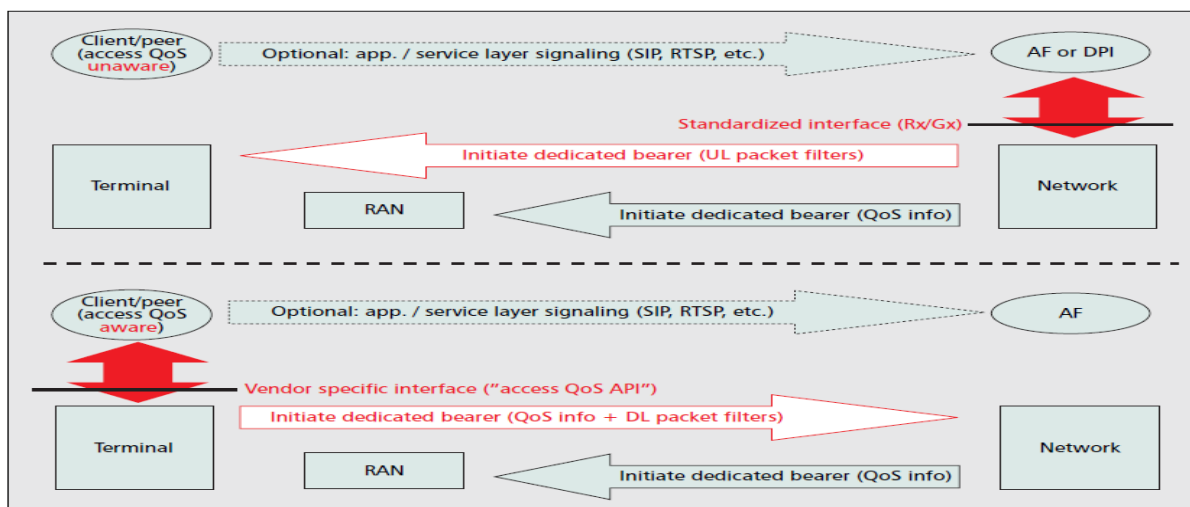
Για να επιτρέπουν το διαχωρισμό της κυκλοφορίας στην μεταφορά του δικτύου, η πύλη και το LTE RAN εφαρμόζουν μια QCI στο DSCP αντιστοιχίζοντας την λειτουργία. Ο σκοπός αυτής της λειτουργίας είναι να πραγματοποιήσει μια μετάφραση από το επίπεδο bearer QoS (QCI) προς το επίπεδο μεταφοράς QoS (DSCP). Χρησιμοποιώντας αυτή τη λειτουργία, τα πακέτα σε έναν bearer που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο QCI επισημαίνονται με ένα συγκεκριμένο DSCP για την προώθηση στο δίκτυο μεταφοράς. Η αντιστοίχιση της QCI στο DSCP γίνεται με βάση τις πολιτικές του διαχειριστή. Αυτές διαμορφώνονται στους κόμβους του δικτύου μέσω του συστήματος O&M. Η πύλη εκτελεί αυτή την αντιστοίχιση για τα πακέτα κατερχόμενης ζεύξης ενώ το LTE RAN την εκτελεί για τα πακέτα της ανερχόμενης ζεύξης.

### 3.3.1.5 Λειτουργίες επίπεδου DSCP

Στο δίκτυο μεταφοράς οι κόμβοι μπορούν να εφαρμόσουν το σύστημα διαχείρισης ουράς και τον προγραμματισμένο αλγόριθμο για την ανερχόμενη και κατερχόμενη ζεύξη κυκλοφορίας. Στο δίκτυο μεταφοράς ο bearer δεν είναι ορατός, έτσι οι αλγόριθμοι προσδιορίζουν την μεταχείριση της προώθησης της κυκλοφορίας του κάθε πακέτου με βάση την τιμή DSCP.

### 3.3.2 Εγκατάσταση bearer πυροδοτούμενη είτε από το δίκτυο είτε από το τελικό τερματικό

Υπάρχουν δύο διαφορετικά παραδείγματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση ενός dedicated bearer με ένα συγκεκριμένο QoS στο EPS. Αναφερόμαστε σε αυτά τα παραδείγματα ελέγχου QoS ως τερματικό-initiated και δίκτυο-initiated. Το παράδειγμα δίκτυο-initiated εισήχθη τόσο στην GPRS με τις προδιαγραφές της 3GPP Release 7, στο EPS με τις προδιαγραφές 3GPP Release 8 όσο και στο σύστημα evolved high-rate packet data (eHRPD) με τις προδιαγραφές 3GPP2. Οι βασικές αρχές παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.



**Εικόνα 13:** Οι διαφορές του δίκτυο-initiated (πάνω) με το τερματικό-initiated (κάτω) για τον έλεγχο της QoS [21]

Χρησιμοποιώντας το δίκτυο-initiated για τον έλεγχο της QoS, το δίκτυο δίνει το σήμα για την εγκατάσταση ενός dedicated bearer με ένα συγκεκριμένο QoS προς το τερματικό και το RAN. Αυτό προκύπτει από μία AF ή από μια λειτουργία deep packet inspector (DPI) και το σήμα μεταφέρεται προς τις τυποποιημένες διεπαφές (Rx/Gx). Χρησιμοποιώντας αυτό το παράδειγμα, η εφαρμογή του χρήστη δεν απαιτείται να είναι ενήμερη για τις ιδιαιτερότητες του μοντέλου της QoS του δικτύου πρόσβασης. Ωστόσο, η εφαρμογή του χρήστη είναι ενήμερη για την QoS με την οποία επιθυμεί να παραχθεί. Για ορισμένες υπηρεσίες, η QoS πρέπει να εφαρμόζεται στην συνεδρίαση ώστε να ανταπεξέρχεται στο δίκτυο. Αξίζει να τονιστεί ότι δεν υπάρχει καμία πληροφορία συγκεκριμένης πρόσβασης σε αυτή τη σηματοδότηση.

Στο παράδειγμα με το τερματικό-initiated για τον έλεγχο της QoS, ένα τερματικό που δίνει το σήμα ώστε να εγκατασταθεί ο dedicated bearer με μια συγκεκριμένη QoS προς το δίκτυο. Το έναυσμα γι' αυτό το σήμα μεταφέρεται σε ένα τερματικό μέσω application programming interface (API) συγκεκριμένης QoS. Αυτό σημαίνει ότι για να καθοριστούν οι πληροφορίες QoS για τον bearer, η εφαρμογή του UE πρέπει να είναι ενήμερη για τις ιδιαιτερότητες του μοντέλου της QoS του δικτύου πρόσβασης. Σε αυτή την περίπτωση, δεν υπάρχει πολιτική ελέγχου επικοινωνίας οποιασδήποτε πληροφορίας QoS στο δίκτυο.

Το κύριο κίνητρο για τον καθορισμό του παραδείγματος της δικτύωσης-initiated για τον έλεγχο της QoS είναι ότι οι υπηρεσίες (πρόσβαση στο Internet) παρέχονται τυπικά από τον διαχειριστή του δικτύου πρόσβασης. Είναι φυσικό ότι το δίκτυο πρόσβασης και ο ιδιοκτήτης της υπηρεσίας να εκχωρούν το επίπεδο της QoS ανά ροή πακέτου που σχετίζεται με μια συγκεκριμένη υπηρεσία.

Το δίκτυο-initiated για τον έλεγχο της QoS ελαχιστοποιεί την τερματική συμμετοχή στην QoS και την πολιτική ελέγχου. Έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το τερματικό-initiated για τον έλεγχο της QoS:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρέχει την QoS σε ενήμερη εφαρμογή, που έχει κατεβάσει και εγκαταστήσει ο χρήστης. Αυτό δεν είναι εφικτό για το τερματικό-initiated για τον έλεγχο της QoS, το οποίο απαιτεί πρόσβαση σε συγκεκριμένες εφαρμογές που πρέπει να προγραμματιστούν προς την API QoS.
- Ως άμεσο αποτέλεσμα του προηγούμενου, το δίκτυο-initiated για τον έλεγχο της QoS παρέχει την QoS στο τερματικό στην περίπτωση που η εφαρμογή του χρήστη βρίσκεται σε έναν κόμβο (laptop) που ξεχωρίζει από το τερματικό.
- Επιτρέπει την ανάπτυξη περισσότερων πολιτικών χειρισμού. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας πολιτικής είναι ο προσδιορισμός της δράσης όταν το αίτημα για την έναρξη της υπηρεσίας απορρίπτεται. Υπάρχουν πολλές πιθανές δράσεις για να ληφθούν (εγκατάλειψη, επανάληψη N φορές). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί πιο εύκολα με τη χρήση του παραδείγματος δίκτυο-initiated για τον έλεγχο της QoS, οι πολιτικές επικεντρώνονται στο δίκτυο αντί να διανέμονται σε πολλά τερματικά από πολλαπλούς προμηθευτές.
- Λόγω των παραπάνω πλεονεκτημάτων, θεωρείται ότι το παράδειγμα του δικτύου-initiated για τον έλεγχο της QoS είναι περισσότερο χρήσιμο στην περίπτωση που ο διαχειριστής ελέγχει την υπηρεσία. Για υπηρεσία που δεν ελέγχεται από τον διαχειριστή, υπάρχει η πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί το παράδειγμα του τερματικού-initiated για τον έλεγχο της QoS.





είναι ένα σύστημα πιστωτικής διαχείρισης για την χρέωση προπληρωμής και αναφέρει την χρήση των πόρων στο OFCS.

Στην αρχιτεκτονική PCC για το EPS, υπάρχουν δύο κύριες εναλλακτικές αρχιτεκτονικές: με και χωρίς BBERF στην πύλη εισόδου. Οι δύο εναλλακτικές αρχιτεκτονικές αναφέρονται ως «off-path» και ως «on-path» μοντέλα αντίστοιχα.

### 3.3.3.2 Πολλαπλή πρόσβαση και το «off-path» μοντέλο της PCC

Ο λόγος που οι δύο εναλλακτικές αρχιτεκτονικές ορίστηκαν στην Release 8 είναι ότι το EPS επιτρέπει για διαφορετικά πρωτόκολλα κινητικότητας ανάλογα με την τεχνολογία πρόσβασης. Αυτά τα πρωτόκολλα έχουν διαφορετικές ιδιότητες, γεγονός που οδηγεί σε διαφορετικές απαιτήσεις για την PCC.

Το GPRS Tunnelling Protocol (GTP) όπως ορίζεται από την 3GPP στις προηγούμενες releases, δεν υποστηρίζει μόνο τις λειτουργίες που σχετίζονται με την δρομολόγηση πακέτων και την κινητικότητα αλλά και τις λειτουργίες χειρισμού της QoS και την bearer σηματοδότηση. Όταν χρησιμοποιείται το GTP στο EPC μεταξύ της S-GW και της P-GW, η P-GW μπορεί να ελέγξει την QoS μέσω των διαδικασιών bearer. Οι διαδικασίες bearer χρησιμοποιούνται για να εγκατασταθούν, να τροποποιηθούν ή να αφαιρεθούν bearers.

Οι διαδικασίες bearer υποστηρίζονται από το GTP και την P-GW, η PCRF μπορεί να ελέγξει την QoS μέσω της διεπαφής Gx. Ένα τέτοιο μοντέλο αναφέρεται ως «on-path», επειδή η QoS/bearer σηματοδότηση συμβαίνει (χρησιμοποιώντας GTP) στην ίδια διαδρομή όπως στο επίπεδο χρήστη. Η BBERF και οι Gxa/Gxc δεν έχουν κάποιο ρόλο εδώ. Σε αντίθεση με το GTP, τα κινητά πρωτόκολλα IP ορίζονται από το Internet Engineering Task Force (IETF) με σκοπό την δρομολόγηση πακέτων και την κινητικότητα σε επίπεδο IP. Δεν χρησιμοποιούνται για να εγκαταστήσουν, να τροποποιήσουν ή να καταστρέψουν bearers ή να σηματοδοτούν παραμέτρους QoS. Όταν ένα κινητό πρωτόκολλο IP χρησιμοποιείται μεταξύ της S-GW και της P-GW, η P-GW δεν γνωρίζει τους bearers. Η BBERF εισήχθη στην αρχιτεκτονική για να χειριστεί αυτή την κατάσταση. Η PCRF παρέχει την επιτρεπόμενη QoS στο BBERF μέσω των σημείων αναφοράς Gxa και Gxc. Αυτό το μοντέλο αναφέρεται ως «off-path» επειδή η σηματοδότηση της QoS πραγματοποιείται μέσω των Gxa και Gxc σε μια διαφορετική διαδρομή από εκείνη του επιπέδου χρήστη. Για το EPS, η PCRF πάντα βρίσκεται στην P-GW. Η θέση της BBERF εξαρτάται από τη συγκεκριμένη τεχνολογία πρόσβασης. Για παράδειγμα, η BBERF (αν ισχύει) βρίσκεται στην εξυπηρέτηση της GW στην οικογένεια πρόσβασης της 3GPP, ενώ για την eHRPD πρόσβαση, η BBERF βρίσκεται στην HSGW.

Τα αρχιτεκτονικά θέματα που αναφέρθηκαν παραπάνω προστέθηκαν στην PCC στην Release 8 για την υποστήριξη της απαίτησης πολλαπλής πρόσβασης. Μια άλλη EPS απαίτηση για την PCC είναι η παράδοση εντός και μεταξύ ετερογενών προσπελάσεων. Για παράδειγμα, η υποστήριξη του σεναρίου όπου το τερματικό περνά μεταξύ διαφορετικών προσβάσεων GWs. Σε αυτήν την περίπτωση, η PCRF πρέπει να χειριστεί την μετεγκατάσταση της BBERF και παρέχει εξουσιοδοτημένη QoS στο νέο BBERF.



### 3.3.3.3 Βασικές έννοιες PCC

#### 3.3.3.3.1 PCC αποφάσεις

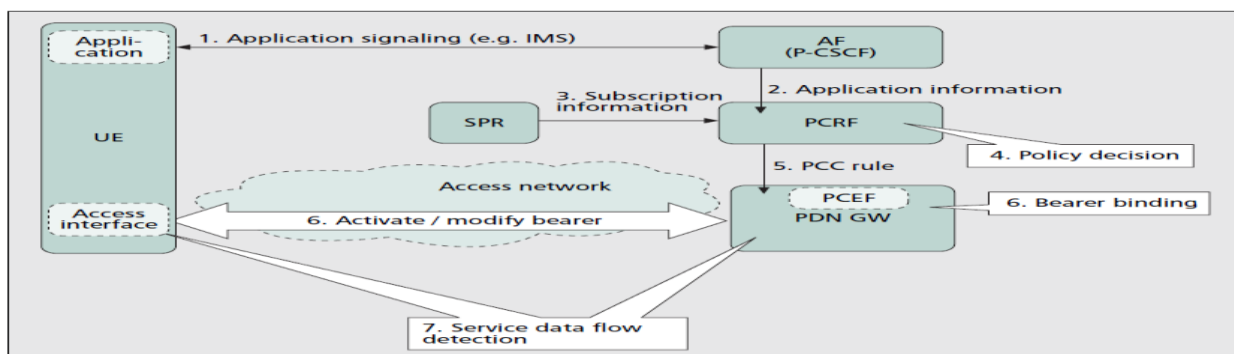
Ο έλεγχος της πολιτικής αποτελείται από τον έλεγχο διέλευσης και τον έλεγχο της QoS. Ο έλεγχος της διέλευσης είναι η ικανότητα να επιτρέψει ή να εμποδίσει να πακέτα IP που ανήκουν σε μια ορισμένη ροή IP με βάση τις αποφάσεις της PCRF. Η PCRF θα μπορούσε για παράδειγμα να λάβει αποφάσεις διέλευσης με βάση τα γεγονότα συνόδου (έναρξη /λήξη υπηρεσίας) που αναφέρονται στην AF μέσω του σημείου αναφοράς Rx. Ο έλεγχος της QoS επιτρέπει στην PCRF να παρέχει την PCEF με την εξουσιοδοτημένη QoS για μια δεδομένη ροή IP. Η εξουσιοδοτημένη QoS μπορεί για παράδειγμα να περιλάβει την εξουσιοδοτημένη τάξη QoS και τον εξουσιοδοτημένο ρυθμό bits.

Ο έλεγχος χρέωσης δεν συνεπάγεται μόνο τον έλεγχο πρόσβασης υπηρεσίας με την βοήθεια της online διαχείρισης πιστώσεων αλλά περιέχει σημαντικές λειτουργίες ανακατεύθυνσης, όπως συμβουλές χρέωσης. Το OCS μπορεί να επιτρέψει την πρόσβαση σε μεμονωμένες υπηρεσίες ή σε μια ομάδα υπηρεσιών με τη χορήγηση πιστώσεων για εξουσιοδοτημένες ροές IP. Η χρήση των πόρων είναι διαπιστευμένη σχετικά με τη μορφή ενός περιορισμένου χρονικού διαστήματος, τον όγκο κυκλοφορίας ή των γενεσιουργών αιτιών. Αν ο χρήστης δεν είναι εξουσιοδοτημένος για να αποκτήσει πρόσβαση σε μια συγκεκριμένη υπηρεσία, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση ενός άδειου προπληρωμένου λογαριασμού, το OCS μπορεί να αρνηθεί το αίτημα πίστωσης και να αναθέσει στην PCEF να ανακατευθύνει το αίτημα υπηρεσίας σε ένα συγκεκριμένο προορισμό. Επίσης, η PCC ενσωματώνει offline χρέωση υπηρεσίας. Ωστόσο, αυτή η λειτουργία δεν παρέχει από μόνη της κανένα μέσο για έλεγχο πρόσβασης. Αντίθετα, η πολιτική ελέγχου πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να περιορίσει την πρόσβαση και στην συνέχεια η χρήση συγκεκριμένης υπηρεσίας μπορεί να αναφερθεί στο OFCS [22].

Η PCRF είναι η κεντρική οντότητα της PCC παίρνοντας αποφάσεις πολιτικές και ελέγχου χρέωσης. Οι αποφάσεις μπορεί να βασίζονται στην είσοδο από διαφορετικές πηγές όπως:

- Ο συντονισμός του διαχειριστή στην PCRF όπου ορίζει τις πολιτικές που εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες υπηρεσίες
- Πληροφορίες/πολιτικές εγγραφής για έναν δεδομένο χρήστη που λαμβάνονται από το SPR
- Πληροφορίες σχετικά με την υπηρεσία που λήφθηκε από την AF
- Πληροφορίες από το δίκτυο πρόσβασης για ποια τεχνολογία πρόσβασης χρησιμοποιείται.

Ένα παράδειγμα περίπτωσης χρήσης για το μοντέλο «on-path» απεικονίζεται στην Εικόνα 16 και περιγράφει τα παρακάτω:



**Εικόνα 15:** Υψηλού επιπέδου περίπτωση χρήσης της PCC στο EPS για το μοντέλο on-path [22]

1. Ο συνδρομητής εκκινεί μια υπηρεσία για παράδειγμα IMS φωνητικής κλήσης και εκτελεί IMS σύνοδο σηματοδότησης μέσω της AF.
2. Με βάση τις πληροφορίες περιγραφής της υπηρεσίας που περιέχονται στην εφαρμογή σηματοδότησης, η AF παρέχει στην PCRF πληροφορίες σχετικές με την υπηρεσία μέσω της διεπαφής Rx. Οι πληροφορίες αυτές περιλαμβάνουν παραμέτρους κυκλοφορίας καθώς και QoS πληροφορίες.
3. Η PCRF μπορεί να αιτηθεί τη συνδρομή σχετικών πληροφοριών από το SPR.
4. Η PCRF λαμβάνει τις πολιτικές του διαχειριστή υπηρεσίας, πληροφορίες εγγραφής και άλλα στοιχεία κατά τη λήψη πολιτικών αποφάσεων. Οι πολιτικές αποφάσεις που διατυπώθηκαν ως κανόνες PCC και περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την κυκλοφορία στο επίπεδο χρήστη. Όλα τα πακέτα IP ταιριάζουν με τα φίλτρα των πακέτων με βάση τον κανόνα PCC και ορίζουν μια SDF. Οι κανόνες PCC μπορεί να περιέχουν την εξουσιοδοτημένη QoS και πληροφορίες χρέωσης καθώς και μια ένδειξη του κατά πόσο η κίνηση επιτρέπεται ή δεν επιτρέπεται. Ένα υποσύνολο διαθέσιμων παραμέτρων στον κανόνα της PCC απεικονίζεται στον Πίνακα 7.
5. Οι κανόνες PCC στέλνονται από την PCRF στην PCEF για την εφαρμογή της πολιτικής απόφασης. Η PCEF βρίσκεται σε ένα ακραίο κόμβο όπου περνά όλη η κίνηση του επιπέδου χρήστη για έναν δεδομένο συνδρομητή και η σύνδεση IP. Για το EPS, η PCEF βρίσκεται στην P-GW.
6. Η P-GW/PCEF εγκαθιστά τους κανόνες PCC και δεσμεύει bearer για να διασφαλίσει ότι η κίνηση για αυτή την υπηρεσία λαμβάνει την κατάλληλη QoS. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στην εγκαθίδρυση ενός νέου bearer ή στην τροποποίηση ενός υφιστάμενου bearer.

## 7. Η PCEF εκτελεί SDF ανιχνεύσεις προκειμένου να ανιχνευτεί η ροή IP για αυτήν την υπηρεσία. Αυτή η ροή IP μεταφέρεται στον κατάλληλο bearer.

Type of element	PCC rule element	Comment
Rule identification	Rule identifier	Used between PCRF and PCEF for referencing PCC rules.
Items related to service data flow detection in PCEF	Service data flow template	List of packet filters for the detection of the service data flow.
	Precedence	Determines the order, in which the service data flow templates are applied at PCEF.
Items related to policy control (i.e., gating and QoS control)	Gate status	Indicates whether a SDF may pass (gate open) or shall be discarded (gate closed).
	QoS class identifier (QCI)	Identifier that represents the packet forwarding behavior of a flow.
	UL and DL maximum bit rates	The maximum bitrates authorized for the service data flow.
	UL and DL guaranteed bit rates	The guaranteed bitrates authorized for the service data flow.
Items related to charging control	Charging key	The charging system uses the charging key to determine the tariff to apply for the service data flow.
	Charging method	Indicates the required charging method for the PCC rule. Values: online, offline, or no charging.
	Measurement method	Indicates whether the SDF data volume, duration, combined volume/duration or event shall be measured.

**Πίνακας 7:** Ένα υποσύνολο στοιχείων που περιλαμβάνονται σε έναν κανόνα PCC [22]

Για το μοντέλο «off-path», η PCRF παρέχει πληροφορίες σχετικά με την εξουσιοδοτημένη QoS αποστέλλοντας τους λεγόμενους κανόνες QoS στην BBERF μέσω των σημείων αναφοράς Gxa/Gxc. Οι κανόνες QoS περιέχουν πληροφορίες που απαιτούνται από την BBERF, ώστε να διασφαλιστεί ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί η δέσμευση του bearer. Έτσι, οι κανόνες QoS περιέχουν μόνο ένα υποσύνολο των πληροφοριών σε σχέση με τους αντίστοιχους κανόνες PCC και δεν περιλαμβάνουν οποιαδήποτε πληροφορία σχετικά με την χρέωση. Η επιβολή της πολιτικής και της χρέωσης στην PCEF περιλαμβάνει πολλές διαφορετικές πτυχές.

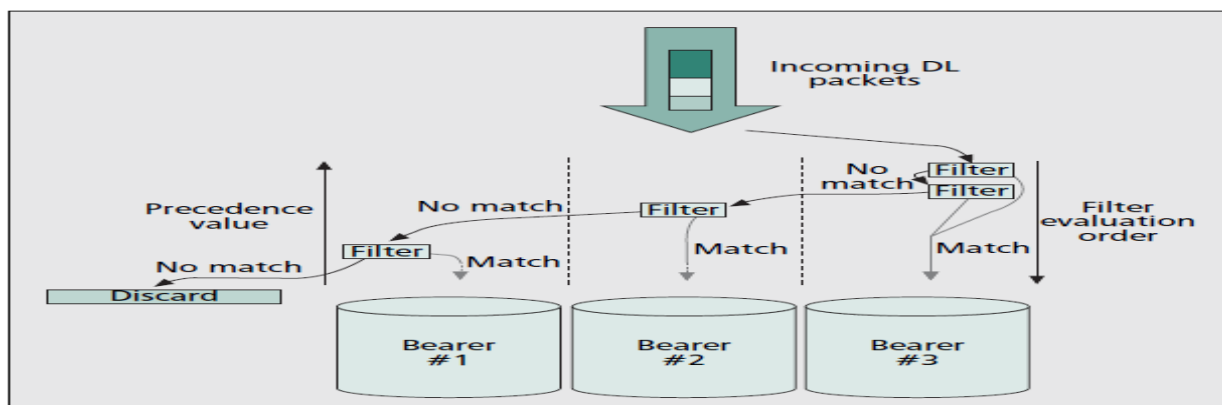
### 3.3.3.3.2 Δέσμευση bearer στο δίκτυο πρόσβασης

Η PCC είναι υπεύθυνη για την επιτυχή αλληλεπίδραση των διαδικασιών της QoS στο δίκτυο πρόσβασης. Ο κανόνας PCC που πρέπει να αντιστοιχιστεί σε έναν αντίστοιχο αγωγό της QoS ή σε έναν bearer στο δίκτυο πρόσβασης για να εξασφαλιστεί ότι τα πακέτα λαμβάνουν κατάλληλη QoS μεταχείριση. Η απεικόνιση της λειτουργίας είναι μια από τις βασικές συνιστώσες της PCC. Η απεικόνιση πραγματοποιείται από την bearer-binding function (BBF) όπου βρίσκεται στην PCEF ή στην BBRF. Όταν η PCEF λαμβάνει μια νέα ή τροποποιημένη PCC ή κανόνες QoS, η BBF αξιολογεί κατά πόσο ή όχι είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν υφιστάμενοι bearers. Αν ένας από τους υφιστάμενους bearers μπορεί να χρησιμοποιηθεί, η BBF μπορεί να ξεκινήσει διαδικασίες τροποποίησης bearer προκειμένου να προσαρμόσει το ρυθμό bit του bearer. Αν δεν χρησιμοποιηθούν οι υφιστάμενοι bearers, η BBF πρέπει να ξεκινήσει την εγκατάσταση ενός νέου κατάλληλου bearer. Συγκεκριμένα, αν ο κανόνας PCC περιέχει GBR παραμέτρους, η BBF πρέπει να εξασφαλίσει τη διαθεσιμότητα του bearer που μπορεί να υποστηρίξει την κυκλοφορία GBR για αυτόν τον κανόνα PCC. Έτσι, η BBF

πρέπει να ξεκινήσει την δέσμευση πόρων στο δίκτυο πρόσβασης για να εξασφαλίσει την εξουσιοδοτημένη QoS του κανόνα PCC [22].

### 3.3.3.3 Υπηρεσία δεδομένων και ανίχνευση ροής

Η PCEF και η BBERF χρησιμοποιούν φίλτρα πακέτων των εγκατεστημένων κανόνων των PCC και QoS για να ταξινομήσουν τα πακέτα IP και να εγκριθούν οι SDFs. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται ως ανίχνευση SDF. Τα εισερχόμενα πακέτα αντιστοιχίζονται με τα διαθέσιμα φίλτρα των υφιστάμενων κανόνων κατά σειρά προτεραιότητας. Αν ένα πακέτο αντιστοιχιστεί με ένα φίλτρο και η πύλη του συσχετιζόμενου κανόνα είναι ανοιχτή, τότε το πακέτο μπορεί να προωθηθεί στον προορισμό. Στην κατερχόμενη ζεύξη, η ταξινόμηση ενός πακέτου IP σε μια SDF προσδιορίζει ποιος bearer θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την μεταφορά του πακέτου, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 17.



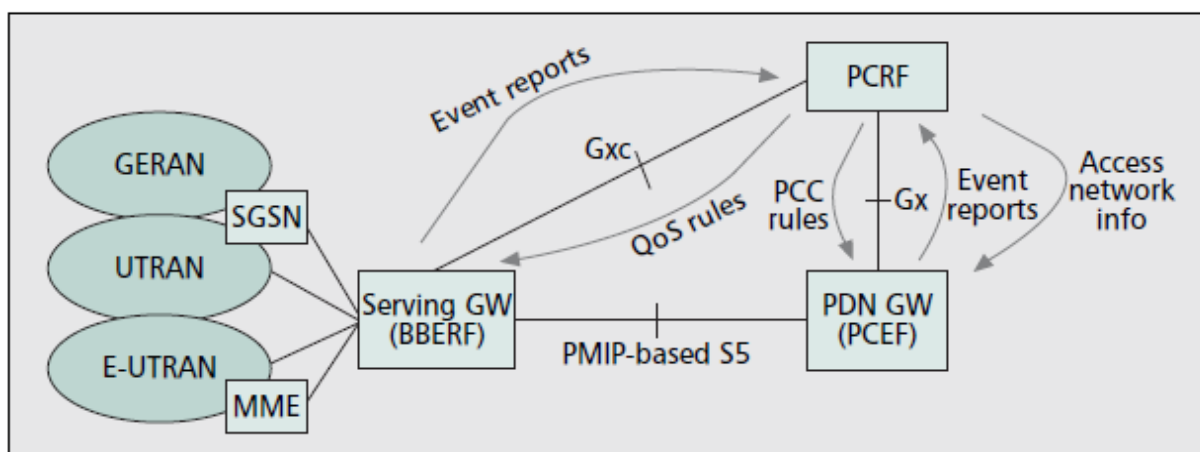
Εικόνα 16: Ανίχνευση SDF και δέσμευση bearer στην κατερχόμενη ζεύξη [22]

Εκτός από τη δυναμική παροχή κανόνων, η PCEF μπορεί να οδηγηθεί από την PCRF ώστε να λάβει προκαθορισμένους κανόνες χρέωσης κατά τη διαδικασία αξιολόγησης. Ο προσδιορισμός των φίλτρων για τον προσδιορισμό των κανόνων δεν είναι συγκεκριμένος. Αυτά τα φίλτρα μπορούν να λάβουν παραμέτρους από τα ανώτερα επίπεδα και αναφέρονται ως φίλτρα DPI.

### 3.3.3.4 Ανανεωμένες πολιτικές αποφάσεις συνόδου και έναρξη γεγονότων

Κατά τη διάρκεια της συνόδου, οι συνθήκες πρόσβασης στο δίκτυο μπορεί να αλλάξουν. Για παράδειγμα, ο χρήστης μπορεί να μετακινηθεί μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης. Επίσης, μπορεί να υπάρχουν περιπτώσεις όπου η εξουσιοδοτημένη QoS δεν μπορεί να διατηρηθεί πάνω από την ραδιοζεύξη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η PCRF μπορεί να επαναξιολογήσει τις πολιτικές τις αποφάσεις και να παρέχει νέους ή ανανεωμένους κανόνες PCC στην PCEF. Η PCRF προσδιορίζει τις συνθήκες όταν η PCEF (κατά περίπτωση και η BBERF) αλληλεπιδρά με την PCRF. Αυτό συμβαίνει όταν ορίζονται νέα γεγονότα στην PCEF/BBERF. Όταν συμβαίνει ένας γεγονός και έχει οριστεί η αντίστοιχη έναρξη του γεγονότος, οι PCEF/BBERF αναφέρουν το γεγονός στην PCRF και επιτρέπουν στην PCRF να επανεξετάσει τις προηγούμενες πολιτικές αποφάσεις.

Όταν τα κινητά IP πρωτόκολλα χρησιμοποιούνται στο EPC, η πρόσβαση συγκεκριμένων bearers καταλήγει στην BBERF αντί στην PCEF. Αυτό συνεπάγεται ότι μεγάλο μέρος των πληροφοριών που σχετίζονται με την πρόσβαση στο δίκτυο είναι διαθέσιμες μόνο στην BBERF. Σε αυτή την περίπτωση, η BBERF ανιχνεύει γεγονότα και τα αναφέρει μέσω των σημείων αναφοράς Gxa/Gxc. Στο μοντέλο off-path, οι Gxa/Gxc και Gx διεπαφές χρησιμοποιούνται για τη ευρύτερη μεταφορά πληροφοριών. Για παράδειγμα, μερικές από τις πληροφορίες παρέχονται από την BBERF και απαιτούνται από την P-GW/PCEF, ώστε να επιτραπεί η σωστή χρέωση στην PCEF. Συγκεκριμένα, η P-GW μπορεί να απαιτήσει να μάθει ποια τεχνολογία χρησιμοποιείται (E-UTRAN). Αυτή η πληροφορία μπορεί να μην παρέχεται από το κινητό IP πρωτόκολλο, τότε θα πρέπει να παρέχεται από την BBERF στην P-GW/PCEF προς την PCRF, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 18.

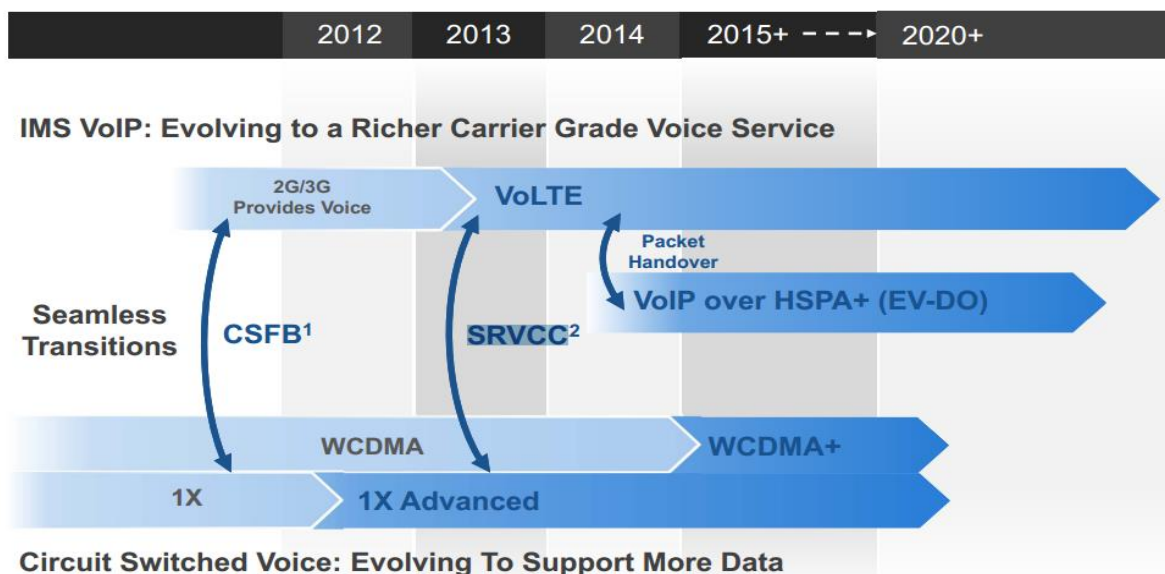


Εικόνα 17: Η ροή πληροφοριών για το μοντέλο off-path [22]

Όπως φαίνεται παραπάνω, οι περισσότερες λειτουργίες της PCEF είναι κοινές και στα δύο μοντέλα on-path και off-path. Για παράδειγμα, το επίπεδο χρέωσης της υπηρεσίας, ο έλεγχος της πύλης και η εφαρμογή της QoS πραγματοποιούνται στην PCEF και για τα δύο μοντέλα. Ωστόσο, οι λειτουργίες που σχετίζονται με τον bearer και ορισμένα γεγονότα πρέπει να εκτελούνται από την BBERF στην περίπτωση του off-path.

### 3.4 Volte

Αρχικά, πολλοί διαχειριστές ήταν αντίθετοι με την ιδέα για ένα σύστημα που θα υποστήριζε φωνή και SMS πάνω στο LTE χρησιμοποιώντας το IMS, λόγω της πολυπλοκότητας του IMS. Οι διαχειριστές θεώρησαν ότι η ιδέα ήταν υπερβολικά δαπανηρή, δύσκολο να εισαχθεί και να διατηρηθεί. Ωστόσο, το One Voice profile για το Voice over LTE (Volte) αναπτύχθηκε από μια συνεργασία μεταξύ περισσότερων από σαράντα διαχειριστών όπως, AT&T, Verizon Wireless, Nokia και Alcatel-Lucent. Στο συνέδριο GSM Association (GSMA) Mobile World του 2010, το GSMA ανακοίνωσε ότι οι παραπάνω διαχειριστές θα υποστήριζαν τη λύση One Voice για την παροχή του Volte [15]. Έτσι λοιπόν, το 2010 εισήχθη η πρώτη γενιά των Circuit-Switched (CS) για τις υπηρεσίες τηλεφωνίας μέσω του (CDMA) σε συνδυασμό με το LTE PS. Το 2011 οι συσκευές LTE χρησιμοποιούσαν το CDMA ώστε να υποστηριχθούν τα GSM/WCDMA. Από τα μέσα του 2012, όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 19, επικρατεί η εμπορική διάθεση υπηρεσιών που παρέχονται μέσω του LTE.



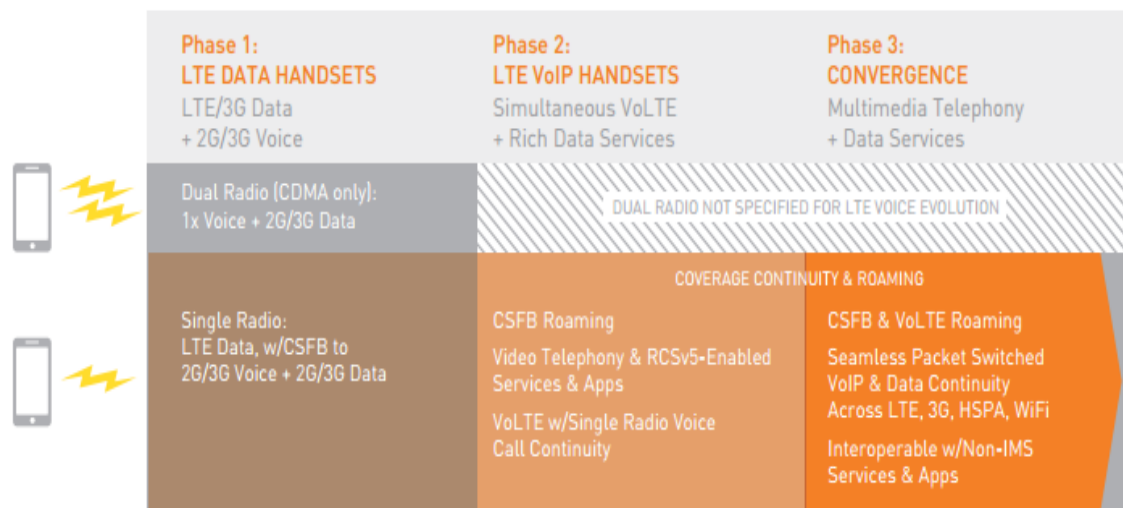
Εικόνα 18: Η χρονική εξέλιξη του Volte [16]

Η μετάδοση φωνής σε συσκευές LTE εξελίσσεται καθώς εξελίσσεται η κινητή βιομηχανία. Η εξέλιξη της μετάδοσης της φωνής χαρακτηρίζεται από τρεις φάσεις, οι οποίες απεικονίζονται στην Εικόνα 20. Στην πρώτη φάση, η μετάδοση φωνής πραγματοποιείται από τα CS δίκτυα, ενώ η κίνηση δεδομένων πραγματοποιείται από LTE Packet Switched (PS) δίκτυα και από τα μη LTE δίκτυα (δίκτυα κληρονομιάς). Παρά το γεγονός ότι το LTE σχεδιάστηκε αρχικά ως ένα δίκτυο δεδομένων, παρέχει οφέλη QoS και χωρητικότητα στους χρήστες και στους διαχειριστές αλλά και πρόσθετα σημαντικά οφέλη για υπηρεσίες φωνής όπως υψηλής ποιότητας φωνή και βελτιωμένα βίντεο.

Η δεύτερη φάση για την εξέλιξη της μετάδοσης φωνής στο LTE είναι η εισαγωγή του Volte. Το Volte έχει ευρεία υποστήριξη στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών και αποτελεί την προτιμώμενη λύση για την τηλεφωνία. Το Volte περιλαμβάνει το IMS και την multimedia telephony (MMTel). Η MMTel μπορεί να αξιοποιήσει το Mobile Station International Subscriber Directory Number (MSISDN) καθώς και τις παραδοσιακές αρχές των τηλεπικοινωνιών, όπως το εγγυημένο από άκρο σε άκρο QoS, υποστηρίζοντας υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, τη παγκόσμια διαλειτουργικότητα και κινητικότητα καθώς και την υποστήριξη της Quality of Experience (QoE) που ανταποκρίνεται στις ανάγκες του σύγχρονου καταναλωτή. Με βάση τα IMS/MMTel, οι υπηρεσίες φωνής εμπλουτίστηκαν με βίντεο (GSMA IR.94) και συνδυάστηκαν με άλλες βελτιωμένες υπηρεσίες βασισμένες στην IP όπως υψηλής ποιότητας φωνή και η Rich Communication Suite (RCS) όπως μηνύματα και διαμοιραζόμενο βίντεο. Η φάση αυτή χρησιμοποιεί μια απλή ραδιοφωνική λύση με πλεονεκτήματα για τους UEs ως προς το κόστος, το μέγεθος και την απόδοση της μπαταρίας, η οποία καλείται Single Radio Voice Call Continuity (SRVCC). Η SRVCC διατηρεί τις κλήσεις καθώς οι UEs μετακινούνται από LTE σε μη LTE δίκτυο. Μια Volte κλήση χωρίς την SRVCC θα πέσει καθώς ο UE κινείται εκτός LTE δικτύου, δεδομένου ότι κανένας διαχειριστής δεν υποστηρίζει VoIP μέσω 3G.



Η τρίτη φάση της εξέλιξης της μετάδοσης φωνής στο all-IP δίκτυο συμπίπτει με τη μητρική δύναμη της IP προκειμένου να βελτιωθεί η χωρητικότητα, οι υπηρεσίες επικοινωνίας και η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαχειριστών και δικτύου (LTE, HSPA, WiFi) [17].

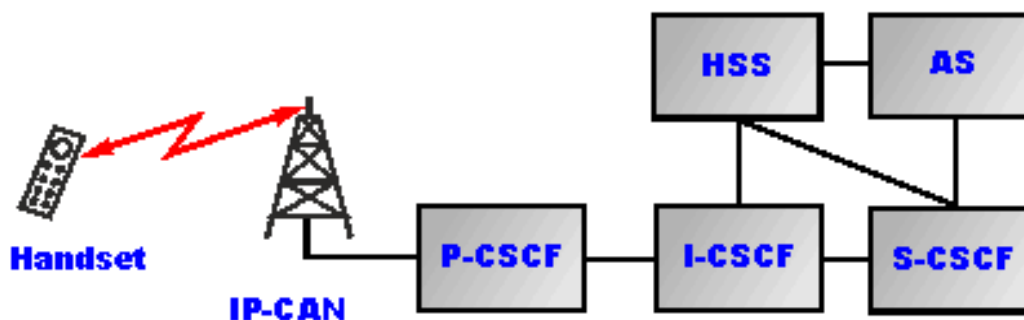


**Εικόνα 19:** Οι φάσεις που χαρακτηρίζουν την εξέλιξη της μετάδοσης φωνής [17]

### 3.4.1 Αρχιτεκτονική του δικτύου για τη διαδικασία Volte

Το Volte βασίζεται σε δυο ξεχωριστά πρότυπα της 3GPP το IMS και το LTE, ώστε να δημιουργήσει κατάλληλο περιβάλλον για την υποστήριξη της μετάδοσης της φωνής σε κοινόχρηστο δίκτυο πακετοδοδεμένων. Το IMS καλείται «αφεντικό» καθώς το IMS αναγνώρισε την ανάγκη ειδικών συνθηκών του δικτύου που απαιτούνται για την μετάδοση της φωνής. Το LTE μπορεί να θεωρηθεί ως «υπάλληλος» που ευθύνεται για την εκτέλεση των εντολών του IMS. Το IMS κατευθύνει το LTE για να δημιουργήσει το επιθυμητό περιβάλλον QoS προκειμένου να ξεκινήσει η φωνητική κλήση. Το IMS ειδοποιεί το LTE, όταν η φωνητική κλήση έχει ολοκληρωθεί και το διευθύνει για να καταστρέψουν το ειδικό περιβάλλον φωνής.

Στην εικόνα 21 απεικονίζονται οι βασικοί κόμβοι που συμμετέχουν στο δίκτυο IMS για την διαδικασία Volte μεταξύ αυτών είναι ο HSS ,που έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω και οι εξής:

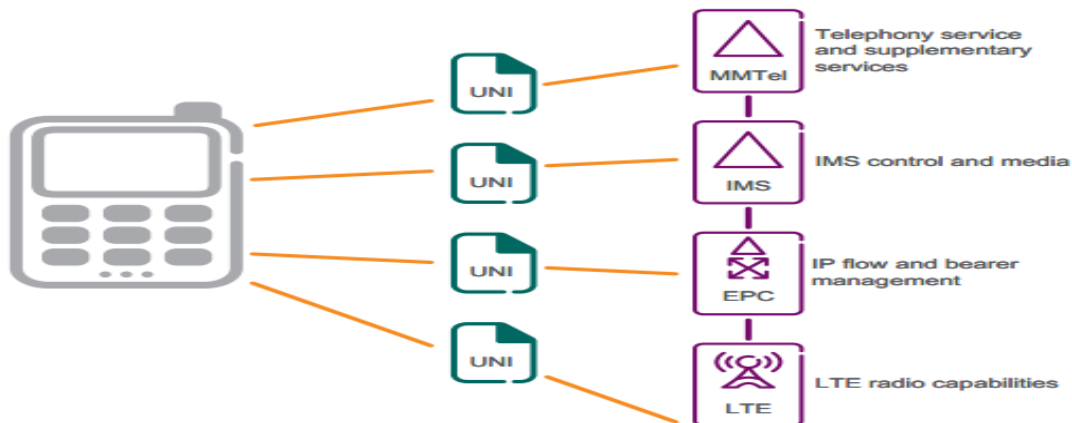


**Εικόνα 20:** Οι κόμβοι που απαρτίζουν το IMS δίκτυο για τη διαδικασία Volte [15]

- Connectivity Access Network, (IP-CAN IP): Αποτελείται από το E-UTRAN και την MME.
- Serving Call Session Control Function (S-CSCF): Ο κόμβος με τον οποίο ο UE εγγράφεται για την IMS υπηρεσία. Η S-CSCF πιστοποιεί τον UE και αναλαμβάνει την ευθύνη της σύνδεσης του UE με τον καλούμενο του VoIP αιτήματος.
- Proxy Call Session Control Function (P-CSCF): Ο κόμβος αυτός αποτελεί τον «διοικητικό βοηθό» της S-CSCF. Όλα τα αιτήματα που αναφέρονται στο IMS και υποβάλλονται από τον UE πρέπει πρώτα να ληφθούν από την P-CSCF πριν προωθηθούν στην S-CSCF. Η P-CSCF θα ανοίξει την αίτηση SIP και θα εκτελέσει τις απαραίτητες διοικητικές εργασίες πριν την αποστολή του αιτήματος στην S-CSCF.
- Interrogating Call State Control Function (I-CSCF): Η I-CSCF προωθεί το αρχικό SIP μήνυμα στην S-CSCF.
- AS (Application Server): Ο AS διαχειρίζεται τη φωνή ως μια εφαρμογή.

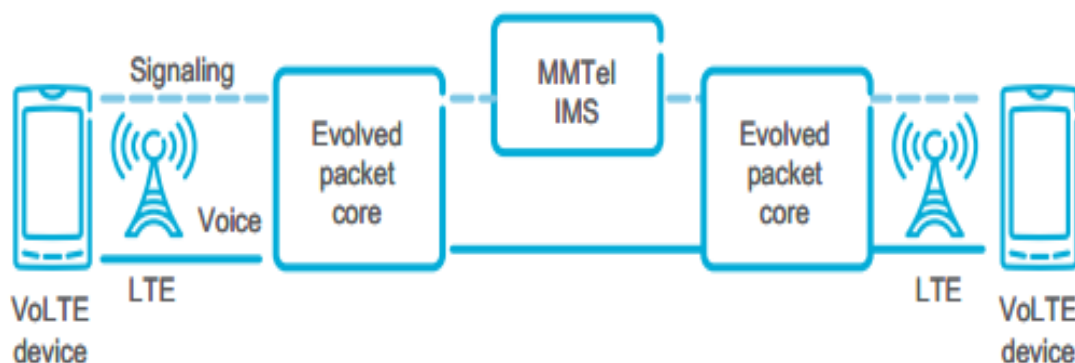
Αν και η MMTel αποτελεί τη βασική λύση για το Volte, το EPC (με τη ροή των IP και τη διαχείριση bearer) και το LTE (με τους radio bearers) αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της. Μαζί διασφαλίζουν την διαλειτουργικότητα σε όλες τις διασυνδέσεις μεταξύ συσκευών και δικτύων. Η εικόνα 22 απεικονίζει μια από άκρο σε άκρο προσέγγιση με την εφαρμογή της τηλεφωνίας πάνω στο LTE, ώστε να επιβεβαιώσει τις κλασικές τηλεπικοινωνιακές αρχές, όπως η εξαιρετική QoS στην ομιλία (LTE), τη διαχείριση της κινητικότητας (EPC), η επαναχρησιμοποίηση του MSISDN για την παγκόσμια διαλειτουργικότητα φωνής καθώς και διάφορα είδη ρυθμίσεων και συμπληρωματικών υπηρεσιών [15].





**Εικόνα 21:** Οι διασυνδέσεις Volte στο User Network Interface (UNI) μεταξύ συσκευής και δικτύου [18]

Το Volte υποστηρίζει την τηλεφωνία είτε με τη μορφή επικοινωνίας από άκρο σε άκρο είτε με την μορφή one-to-many. Η εικόνα 23 απεικονίζει μια απλοποιημένη εκδοχή της αρχιτεκτονικής Volte.



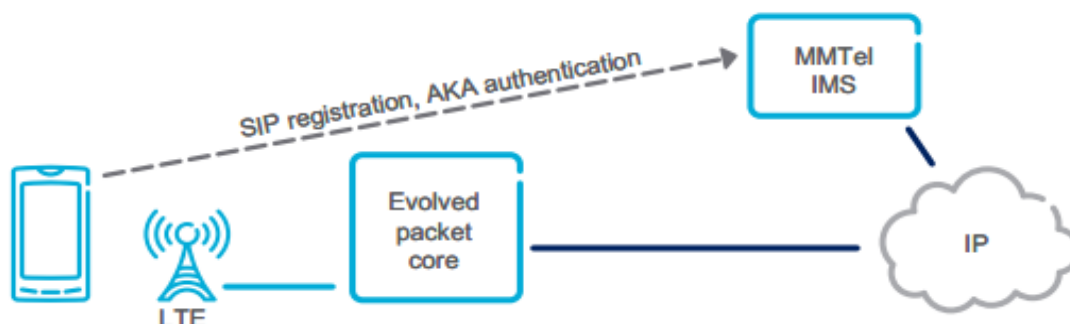
**Εικόνα 22:** Volte end-to-end [18]

### 3.4.2 Τα στάδια της διαδικασίας Volte

Η διαδικασία της τηλεφωνίας ξεκινά με έναν ασύρματο UE εκφράζοντας την επιθυμία του στο LTE για να πραγματοποιήσει μια VoIP κλήση. Το LTE ξέρει ότι θα πρέπει να πραγματοποιήσει σύνδεση με το IMS. Στο πλαίσιο της προετοιμασίας, το LTE προσδιορίζει την P-GW, που προσφέρει σύνδεση στο IMS δίκτυο και εγκαθιδρύει έναν default EPS bearer από τον UE προς την επιλεγμένη P-GW.

Η γλώσσα που ομιλείται από το IMS είναι η SIP. Ο default EPS bearer είναι εγκατεστημένος με QCI τιμής 5 και χρησιμοποιείται για την για SIP σηματοδότηση. Ο EPS bearer μπορεί να μην υποστηρίξει την απαιτούμενη QoS, όποτε μπορεί να χρειαστεί και δεύτερος EPS bearer. Ο UE μιλάει την ίδια γλώσσα με το IMS, έτσι εγγράφεται στο IMS δίκτυο και πραγματοποιεί αίτημα VoIP.

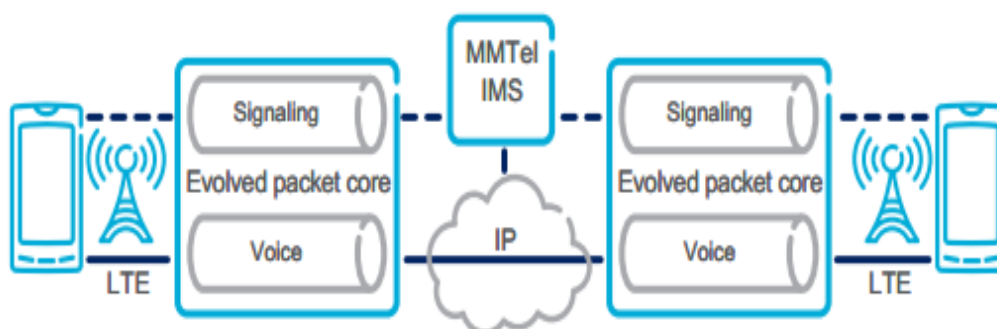
Θα υποθέσουμε ότι ο UE έχει πιστοποιηθεί τόσο από το δίκτυο IMS όσο και από το δίκτυο LTE, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 24. Ο default EPS bearer έχει εγκαθιδρυθεί μεταξύ του UE και της κατάλληλης P-GW, τότε ο UE είναι έτοιμος να ζητήσει εγκαθίδρυση μιας VoIP συνόδου.



**Εικόνα 23:** Η εγγραφή του UE και πιστοποίηση του από IMS και LTE [18]

Ο UE αρχίζει την αποστολή ενός SIP μηνύματος «Πρόσκληση» προς την S-CSCF. Στο SIP μήνυμα περιέχεται το Session Description Protocol (SDP), το οποίο μεταφέρει την QoS απαίτηση. Το SIP μήνυμα μεταφέρεται μέσω του LTE, αλλά το LTE δεν γνωρίζει το περιεχόμενο του μηνύματος. Η πρώτη επαφή του IMS είναι με την P-CSCF. Η P-CSCF ανοίγει το SIP μήνυμα και εξάγει την QoS απαίτηση. Το SIP μήνυμα στέλνεται στην S-CSCF μέσω της I-CSCF, ενώ οι QoS απαιτήσεις αποστέλλονται μέσω της διεπαφής Rx στην PCRF. Η PCRF δημιουργεί πραγματοποιήσιμους κανόνες χρέωσης και QoS και τα προωθεί μέσω της Gx στην PCEF [19]. Αυτή είναι η πρώτη φορά που το LTE ενημερώνεται ότι πρέπει να υποστηρίξει την μετάδοση φωνής.

Η P-GW αναλαμβάνει να προωθήσει αίτημα για την εγκαθίδρυση dedicated bearer με QCI τιμής 1 προς τον UE. Ο UE είναι ο μοναδικός στο LTE δίκτυο που επικοινωνεί τόσο στη γλώσσα του LTE όσο και στη SIP. Αφού ο UE αναγνωρίζει ότι το LTE μπορεί να υποστηρίξει έναν νέο dedicated bearer, ο UE στέλνει ένα SIP μήνυμα «Ενημέρωση» στο IMS δίκτυο, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 25. Αυτό είναι ένα σήμα για την IMS ώστε να ολοκληρώσει τη διαδικασία εγκατάστασης και να εγκαθιδρύσει την κλήση. Αν και η VoIP κλήση διέρχεται μέσω του LTE στην P-GW, τα πακέτα φωνής δεν διέρχονται μέσω των στοιχείων του IMS δικτύου.



**Εικόνα 24:** Bearer σηματοδότησης και dedicated bearer για την τηλεφωνία [18]

Το IMS επανέρχεται σε δράση όταν η κλήση ολοκληρώνεται. Ο τερματισμός της κλήσης αποδίδεται σε άλλο SIP μήνυμα, ονομάζεται «Γεια» και διέρχεται από την S-CSCF και την P-CSCF. Η P-CSCF ανιχνεύει το γεγονός ότι η κλήση έχει τελειώσει και ξεκινά την συλλογή IMS εγγραφών χρέωσης. Η P-CSCF ειδοποιεί την PCRF για τον τερματισμό της κλήσης που με τη σειρά του ενημερώνει την PCEF για να τερματίσει την χρέωση LTE και την P-GW για να καταστρέψει τον dedicated EPS bearer, ο οποίος είχε εγκαθιδρυθεί αποκλειστικά για την υποστήριξη της VoIP κλήσης [19].

## 4. ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ QOE ΣΤΟ LTE-A

Η Quality of Experience (QoE) είναι ένας όρος που πρόεκυψε από τη εξέλιξη της QoS. Η QoE αποτελεί μέτρο επιτυχίας της υπηρεσίας. Αντίθετα, με την QoS προσπαθεί να προβλέψει την εμπειρία που έχει αποκομίσει ο UE για την υπηρεσία με βάση την υποκειμενική ή αντικειμενική του αξιολόγηση. Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον για την QoE έχει αυξηθεί σημαντικά σαν μια φυσική προέκταση της QoS, δεδομένου ότι δεν στηρίζεται στις παραδοσιακές μετρήσεις της απόδοσης αλλά στοχεύει στην αξιολόγηση της απόδοσης με βάση την εμπειρία του UE. Δηλαδή, η τελική άποψη του UE για την ποιότητα της συγκεκριμένης υπηρεσίας είναι αυτή που θα καθορίσει αν θα τη χρησιμοποιήσει [20].

Σε αντίθεση με την QoS, όπου οι δείκτες απόδοσης μπορούν να καθορίζονται αντικειμενικά και να μετρηθεί, η QoE βασίζεται σε υποκειμενικές αξιολογήσεις και εξαρτάται περισσότερο από την εφαρμογή που χρησιμοποιείται. Το 2000, ο Engeldrum πρότεινε την αξιολόγηση της ποιότητας της εικόνας στις εφαρμογές κάτι που είναι πολύ δύσκολο ή μπορεί να μην είναι εφικτό να προβλεφθεί απευθείας από τις μεταβλητές της τεχνολογίας, όπως είναι η ανάλυση. Έτσι, πρότεινε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις από φυσικές μεταβλητές, όπως είναι η φωτεινότητα. Τέλος, η κατανόηση της QoE είναι απαραίτητη για την βελτιστοποίηση των στόχων τόσο στο επίπεδο του δικτύου όσο και στο επίπεδο της εφαρμογής.

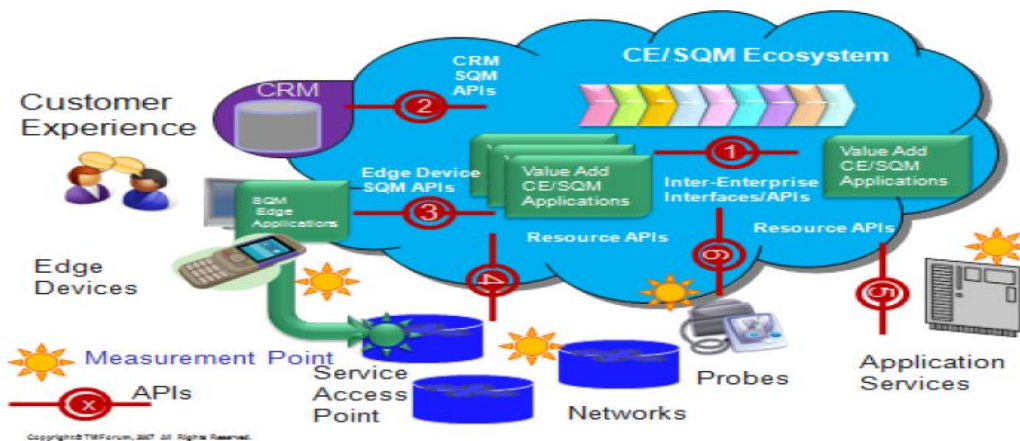
### 4.1. User experience (UX)

Η User experience (UX) αποτελεί βασική συνιστώσα για την αξιολόγηση της QoE. Ο UE αλληλεπιδρά με το δίκτυο για να χρησιμοποιήσει την υπηρεσία και η επιτυχία ή η αποτυχία της υπηρεσίας εξαρτάται από την εμπειρία του UE. Δηλαδή, μια άσχημη εμπειρία έχει αρνητικές συνέπειες στις παραμέτρους όπως είναι η απόδοση και η ευχρηστία. Η UX περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τη σχέση μεταξύ ενός τελικού UE και ενός οργανισμού. Η σωστή σύμπτυξη της UX οδηγεί στον προσδιορισμό της QoE.

### 4.2 QoE οικοσύστημα

Το QoE οικοσύστημα περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που μπορούν να συμβάλουν στην QoE. Η σωστή διαχείριση της QoE απαιτεί να καθορισθεί ένα κοινό πλαίσιο διαχείρισης. Δηλαδή, θα λαμβάνονται όλες οι από άκρο σε άκρο QoE μετρήσεις για τον τελικό UE, σύμφωνα με τα κριτήρια που καθορίζονται από την SLA. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα περιβάλλον στο οποίο διάφοροι παράγοντες που εμπλέκονται θα παρέχουν QoE μετρήσεις σε διάφορα μέρη του οικοσυστήματος, όμοιο με αυτό που απεικονίζεται στην Εικόνα 26. Οι διεπαφές που περιλαμβάνονται είναι οι εξής:

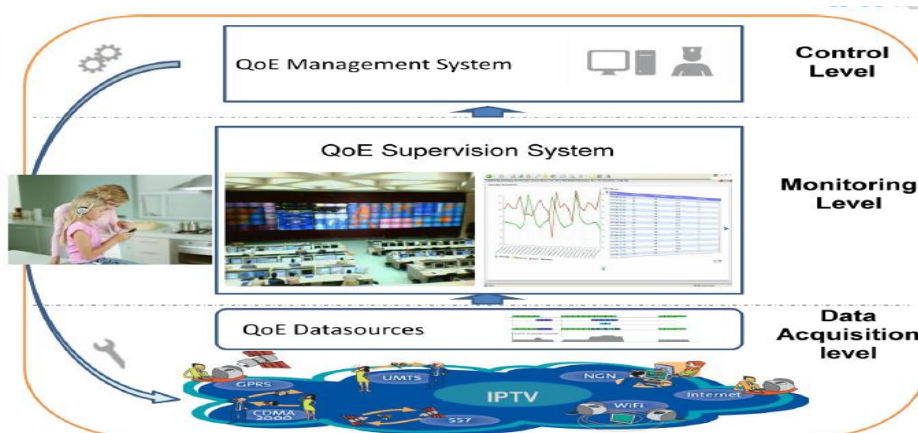
- Διεπαφή μεταξύ των διαχειριστών: Αυτή η διεπαφή περιλαμβάνει SLA επικοινωνία μεταξύ δυο συνεργαζόμενων διαχειριστών και την ανταλλαγή των τυποποιημένων μέτρων, των γεγονότων και των εκθέσεων της QoE
- Διεπαφή της customer relationship management (CRM): Αυτή παρέχει πληροφορίες σχετικά με τους UEs και τη σχέση τους με τον Service Provider (SP), όπως για παράδειγμα η σχέση της ομάδας ή συμβάντα και παράπονα σχετικά με τις υπηρεσίες.
- Διεπαφές με τις τερματικές συσκευές. Επιτρέπει την προληπτική παρακολούθηση της QoE στο τερματικό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προληπτικό έλεγχο της υπηρεσίας. Επίσης, παρέχει τα σχόλια των UE που προέκυψαν από έρευνες και ερωτηματολόγια για να αξιολογήσουν την UX εφόσον μια σύνοδος έχει τελειώσει. Η συμπεριφορά του τερματικού έχει μεγάλη επιρροή στην τελική UX, έτσι είτε η απόδοση του θα πρέπει να μετρηθεί ή διαφορετικά να προβλεφθεί.
- Διεπαφή σε πόρους του δικτύου:
  - Πόροι για την παροχή υπηρεσιών
  - Μετρήσεις για την απόδοση του δικτύου
  - Ορισμός πολιτικών και SLA
  - Ενημερωτικές εκδηλώσεις
  - Ικανότητα σχεδιασμού και διαστασιολόγησης
- Εφαρμογή πόρων: Επιτρέπει τη μέτρηση της απόδοσης των information technology (IT) πόρων, των διακομιστών των εφαρμογών και των υποδομών του δικτύου.
- Διεπαφές ανιχνευτών: Παρέχει ένα σύνολο δυνατοτήτων ελέγχου, δηλαδή περιλαμβάνει ενεργητικούς και παθητικούς ανιχνευτές.



Εικόνα 25: QoE οικοσύστημα [20]

### 4.3 Customer Experience Management System (CEMS)

Αυτή η ενότητα περιγράφει τη συνολική αρχιτεκτονική για τη διαχείριση της UX, η οποία καλείται Customer Experience Management System (CEMS). Στην Εικόνα 27 απεικονίζονται τα τρία διαφορετικά επίπεδα της αρχιτεκτονικής και καθένα αποτελείται από διαφορετικά συστατικά. Αυτά είναι το Data Acquisition Level, το Monitoring Level και το Control Level. Η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική ορίζει την επόμενη γενιά CEMS.



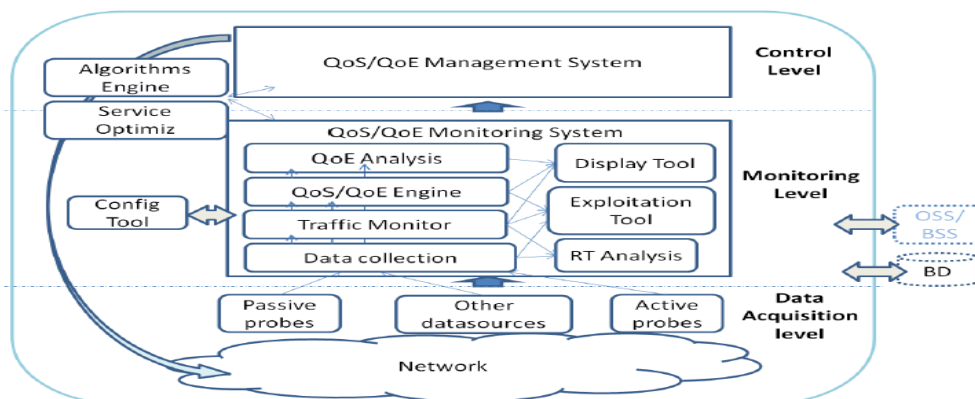
Εικόνα 26: Υψηλού επιπέδου αρχιτεκτονική CEMS [20]

Η αρχιτεκτονική CEMS απεικονίζεται στην Εικόνα 28 με περισσότερες λεπτομέρειες και είναι «ανοιχτή» για να επιτρέψει την προσθήκη ή την αφαίρεση εξαρτημάτων, παραμέτρων του συστήματος και χαρακτηριστικά.

Στη συνέχεια, ακολουθεί περιγραφή των τριών επιπέδων της αρχιτεκτονικής:

- Data Acquisition Level: Αυτό το επίπεδο συγκεντρώνει πληροφορίες από διάφορες πηγές δεδομένων: ενεργητικοί και παθητικοί ανιχνευτές και συσκευές ανίχνευσης όπως Deep Packet Inspectors.

- **Monitoring Level:** Η είσοδος από τις πηγές δεδομένων έχει εξουσιοδοτηθεί ώστε να εποπτεύει τόσο την QoS όσο και την QoE. Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που μετατρέπουν τους βασικούς δείκτες κατά τη μέτρηση της UX. Από την άλλη πλευρά, ένα σύνολο εργαλείων graphical user interface (GUI) λαμβάνονται υπόψη σε αυτό το επίπεδο.
- **Control Level:** Το επίπεδο αυτό χειρίζεται την QoE που παραδίδεται στους UEs και λαμβάνει ανατροφοδότηση από το Monitoring Level προκειμένου να δρα προληπτικά στο δίκτυο και να βελτιώνει την ικανοποίηση των UEs [20].



Εικόνα 27: Λεπτομερής αρχιτεκτονική CEMS [20]

#### 4.4 QoE στο LTE-A

Μια από τις βασικές αρχές για την υποστήριξη της QoE στο LTE/LTE-A είναι η εκτίμηση και η παρακολούθηση της QoE των UEs. Όλες οι πληροφορίες που σχετίζονται με την QoS ή την QoE θα διαχειρίζονται σε ένα κεντρικό σημείο το οποίο θα συλλέγει δείκτες επιδόσεων από διαφορετικά στοιχεία του δικτύου και θα δρα για τη βελτίωση της QoE.

Ιδανικά, η PCRF θα ήταν κύρια υποψήφια για αυτό το ρόλο. Ωστόσο, οι προδιαγραφές των διεπαφών της PCRF δεν έχουν την κατάλληλη ευελιξία ώστε να λαμβάνονται οι σχετικές πληροφορίες από κάθε στοιχείο του δικτύου. Έτσι, προτείνεται η ανάπτυξη ενός ad-hoc QoE διακομιστή με τυποποιημένη διεπαφή την PCRF. Η σωστή δυναμική σύνδεση μεταξύ του QoE διακομιστή και της PCRF συνιστάται με στόχο την επίτευξη ενός δυναμικού έλεγχου της QoS που βασίζεται στην αντίληψη του UE. Σύμφωνα με το πρότυπο, η PCRF μπορεί να λάβει QoS που σχετίζεται με πληροφορίες από διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως P-GW, S-GW, AF, και SPR. Κάθε είδους αλληλεπίδραση μεταξύ του QoE διακομιστή και PCRF λαμβάνεται υπόψη προκειμένου να παραχθεί ένα ευρύτερο όραμα της ποιότητας που γίνεται αντιληπτή από τους UEs. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η PCRF οντότητα περιλαμβάνει μόνο τυπικές διεπαφές, η επικοινωνία μεταξύ των δύο οντοτήτων θα μπορούσε να επιτευχθεί με τις ακόλουθες εναλλακτικές λύσεις, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 29.

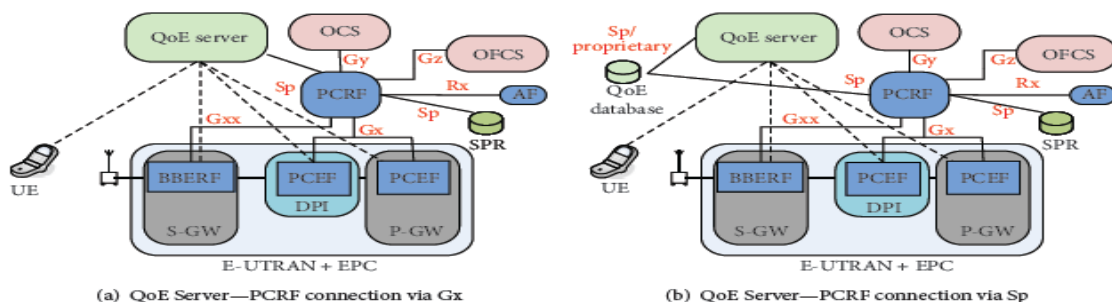
- Μέσω του σημείου αναφοράς Gx: Αυτή η επιλογή απαιτεί από την QoS πλατφόρμα να είναι εφικτή η εναλλαγή των εντολών με την PCRF. Αξίζει να τονιστεί ότι PCRF κατασκευαστές χρησιμοποιούν την Gx διεπαφή για τη

διαχείριση των κανόνων πολιτικής μεταξύ των εφαρμογών και των σημείων επιβολής της πολιτικής όπως πύλες, DPIs, και ούτω καθεξής. Έτσι, προτείνεται η επαναχρησιμοποίηση της Gx ώστε να συνδεθεί η PCRF με τον εξυπηρετητή πολιτικής, ο οποίος ενεργεί ως PCEF. Η QoE μηχανή δεν απαιτείται να περιλαμβάνει όλη την PCEF λειτουργικότητα (όπως την παρακολούθηση κλπ), καθώς οι εργασίες πρέπει να εκτελούνται στο επίπεδο του χρήστη. Αντίθετα, αυτή η πλατφόρμα πρέπει να περιλαμβάνει τη δυνατότητα αποστολής/λήψης ορισμένων πληροφοριών προς/από την PCRF. Αυτή η επιλογή έχει μεγαλύτερη ευελιξία για την ενημέρωση της PCRF για συγκεκριμένα γεγονότα που σχετίζονται με την QoS.

- Μέσω του σημείου αναφοράς Sp: Αυτή η επιλογή στηρίζεται στην αποθήκευση του μέσου όρου των δεικτών QoE/QoS σε μια βάση δεδομένων, η οποία μπορεί να προσεγγιστεί μέσω Sp από την PCRF, όπως έχει ήδη γίνει με την SPR. Αυτό το σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται για την ανάκτηση πληροφοριών σχετικά με τον UE, όπως επιτρεπόμενες υπηρεσίες, την προτίμηση και την διαμόρφωση του προφίλ, το επίπεδο προτεραιότητας, την λίστα των επιτρεπόμενων QCI, και ούτω καθεξής. Μια πιθανή χρήση της βάσης δεδομένων είναι να παρέχει δυναμικές πληροφορίες σχετικές με τον UE, σύμφωνα με τους δείκτες απόδοσης που συλλέγονται από την QoE μηχανή.

Ο QoE διακομιστής θα είναι υπεύθυνος για τα παρακάτω καθήκοντα:

- συλλογή δεικτών απόδοσης από διαφορετικά στοιχεία του δικτύου
- την εκτίμηση της QoE για συγκεκριμένα δεδομένα υπηρεσιών από τους προηγούμενους δείκτες απόδοσης
- την ενεργοποίηση πιθανών δράσεων



Εικόνα 28: Η QoE αρχιτεκτονική [3]

#### 4.4.1. Η συλλογή των Δεικτών Απόδοσης.

Πολλά στοιχεία του δικτύου μπορούν να συμβάλλουν στην παρακολούθηση της διαδικασίας της απόδοσης. Τα στατιστικά στοιχεία των επιδόσεων από τον διαχειριστή του network management subsystem (NMS) ήταν η κύρια πηγή ανατροφοδότησης



πληροφοριών για την αξιολόγηση της QoS [11]. Ωστόσο, δεν θεωρείται πολύ χρήσιμο για την αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων των υπηρεσιών, όπως τα NMS στατιστικά που είναι κατά μέσο όρο για τις διαφορετικές υπηρεσίες και για μεγάλο χρονικό διάστημα (τυπικά 1 ώρα). Αντίθετα, οι διαχειριστές των κινητών δικτύων συνήθως αναπτύσσουν κάποιο είδος πλατφόρμας παρακολούθησης που βασίζεται σε DPIs. Ένας DPI είναι ένας εξοπλισμός δικτύου που ίσως επιτρέπει σε πάροχους δικτύου την παρακολούθηση, τη συλλογή και την ανάλυση των δεδομένων της ταυτόχρονης επικοινωνίας εκατομμύρια χρηστών. Οι DPIs καθιστούν δυνατή την αναγνώριση εφαρμογών που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο που αποτελεί πολύτιμη πληροφορία για πολλούς σκοπούς, όπως η διαχείριση της πολιτικής QoS. Εάν ένας DPI είναι διαθέσιμος, θα παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την QoS που παρέχεται σε κάθε ροή δεδομένων. Η τοποθεσία ενός τέτοιου DPI πιθανότατα να είναι κοντά στην P-GW (ή ακόμη και εντός της P-GW ως κάρτα). Το πλεονέκτημα της ύπαρξης ενός DPI είναι ότι έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί ανωτέρα IP στρώματα, όπως το Transmission Control Protocol (TCP). Επίσης, όλοι οι EPS bearers χειρίζονται από έναν DPI (ή P-GW), κάθε EPS bearer συνδέεται με ένα συγκεκριμένο QoS προφίλ. Στην πραγματικότητα, το πλήρες προφίλ QoS που σχετίζεται με κάθε EPS bearer (δηλαδή, QCI, ARP, GBR, MBR, κλπ.) είναι γνωστό. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να ελεγχθεί αν η παρεχόμενη QoS είναι σε συμφωνία με την διαπραγμάτευση του QoS προφίλ. Διαφορετικά, πραγματοποιείται επαναδιαπραγμάτευση της δράσης του EPS bearer, ο οποίος μπορεί να είναι ενεργοποιημένος μέσω της PCRF. Όλα τα στατιστικά στοιχεία θα πρέπει να λαμβάνονται ανά EPS bearer και να υπολογίζονται με γρήγορο ρυθμό (π.χ. 1 δευτερόλεπτο) έτσι ώστε η QoE για κάθε υπηρεσία δεδομένων να υπολογίζεται ξανά κάθε δευτερόλεπτο και οι δράσεις πραγματικού χρόνου να μπορούν να ενεργοποιηθούν [3].

#### 4.5 Key performance indicators (KPIs) Monitoring

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί key performance indicators (KPIs) που συλλέγονται από διάφορα στοιχεία του δικτύου, οι DPIs και τα κινητά τερματικά τα πιο σημαντικά από αυτά. Αυτό το τμήμα περιγράφει ένα σύνολο πιθανών KPIs που θα μπορούσαν να παρακολουθηθούν στα εν λόγω στοιχεία του δικτύου.

##### 4.5.1 Οι KPIs παρακολουθούνται από τον DPI.

Υφιστάμενοι DPI είναι σε θέση να παρακολουθούν ένα ευρύ σύνολο των παραμέτρων και δεικτών απόδοσης σε διαφορετικά επίπεδα του δικτύου και συνδέονται σε διαφορετικά δεδομένα υπηρεσιών. Θα πραγματοποιηθεί αναφορά σε τρεις βασικούς δείκτες απόδοσης του δικτύου που αποτελούν το κλειδί για τον χαρακτηρισμό του δικτύου σε στιγμιαία κατάσταση. Αυτοί είναι χρήσιμοι για την εκτίμηση QoE συνδεδεμένοι με οποιαδήποτε υπηρεσία δεδομένων.

- IP level *throughput* (ρυθμαπόδοση): μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση της παρεχόμενης *throughput* με τις GBR και MBR τιμές διαπραγμάτευσης κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης συνόδου. Στο UL, αυτός ο KPI παρέχει ένα καλό δείκτη απόδοσης που σχετίζεται με τον EPS bearer, δεδομένου ότι τα στατιστικά λαμβάνονται στον output proxy του διαχειριστή του δικτύου. Ωστόσο, η

εισερχόμενη DL throughput μετριέται στον DPI και μπορεί να μην είναι ο κατάλληλος KPI για την εκτίμηση της QoE, όταν η radio διαεπαφή προκαλεί την συμφόρηση του δικτύου. Στην προκειμένη περίπτωση, η μετρημένη IP level throughput δεν ανταποκρίνεται στην IP level throughput την οποία έχει βιώσει το κινητό τερματικό. Ωστόσο, το πρόβλημα εμφανίζεται μόνο όταν User Datagram Protocol (UDP) χρησιμοποιείται ως πρωτόκολλο μεταφοράς και μπορεί να συμβούν απώλειες μεταξύ του DPI και του τερματικού. Στην περίπτωση αυτή, η λύση βασίζεται στην απόκτηση του IP level throughput που μετράται απευθείας στο τερματικό. Όταν το TCP χρησιμοποιείται, δεν δημιουργείται πρόβλημα καθώς η IP level throughput ρυθμίζεται από τον TCP μηχανισμό ελέγχου συμφόρησης και κατά συνέπεια, η μετρημένη throughput θα είναι (ιδανικά) παρόμοια με την throughput που περιήλθε στο τερματικό.

- IP packet loss rate: Η μελέτη του ρυθμού απώλειας πακέτων είναι μια πρόκληση, καθώς απώλειες πακέτων μπορεί να προκύψουν σε οποιοδήποτε στοιχείο δικτύου στο οποίο περνούν δεδομένα. Η διαδικασία της μέτρησης του ρυθμού απώλειας πακέτων βασίζεται στην ανάλυση πρωτόκολλων ανώτερου επιπέδου. Συγκεκριμένα, η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται σε υπηρεσίες που βασίζονται στο πρωτόκολλο TCP (π.χ. web περιήγηση, HTTP YouTube προοδευτική λήψη) ή στο real-time transport protocol (RTP), όπως και στο real-time streaming protocol (RTSP) με βάση το streaming video. Στην περίπτωση των RTP πακέτων, η ανίχνευση απώλειας πακέτου βασίζεται με τον αριθμό ακολουθίας του πεδίου που περιλαμβάνεται στην RTP κεφαλίδα, ο έλεγχος για πιθανούς αριθμούς που λείπουν στην εισερχόμενη ροή RTP. Στην περίπτωση των TCP-based υπηρεσιών, ένα απλός τρόπος για την ανίχνευση TCP απωλειών στην P-GW είναι να αναλύσει τις αναμεταδόσεις των πακέτων από το διακομιστή, υπολογίζοντας τον διπλό αριθμό της ακολουθίας στο DL. Αν το χαρακτηριστικό της selective acknowledgment (SACK) χρησιμοποιείται στην σύνδεση TCP, ο αριθμός των αναμεταδιδόμενων πακέτων θα είναι το ίδιο με αυτόν των χαμένων πετυχαίνοντας μια ακριβής από άκρο σε άκρο μέτρηση του ρυθμού απώλειας. Αντίθετα, εάν το χαρακτηριστικό SACK δεν χρησιμοποιείται, όταν ο διακομιστής ανιχνεύει μια νέα απώλεια πακέτων, όλα τα πακέτα με τον υψηλότερο αριθμό ακολουθίας θα αναμεταδοθούν, υπολογίζοντας όλα αυτά ως πακέτα απωλειών. Στην περίπτωση αυτή, ο εκτιμώμενος ρυθμός απώλειας θα είναι υψηλότερος από τον πραγματικό ρυθμό απώλειας. Αξίζει να τονιστεί ότι η εκτίμηση του ρυθμού απώλειας πρέπει να είναι ο μέσος όρος για ένα μεγάλο αριθμό πακέτων. Διαφορετικά, το αποτέλεσμα θα μπορούσε να παραμορφωθεί. Άλλος ένας τρόπος για να υπολογίσουμε τις απώλειες TCP θα είναι η εφαρμογή ενός μέρους του πρωτοκόλλου TCP στον DPI. Συγκεκριμένα, οι μηχανισμοί ελέγχου TCP θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της απώλειας πακέτων. Θα ήταν απαραίτητο να υπολογιστούν οι διπλές ACKs από το UL, καθώς και οι απώλειες που οφείλονται στην retransmission timeout (RTO). Η προσαρμογή της αρχικής RTO πρέπει να τεθεί ως η τιμή της αρχικής RTO του διακομιστή μείον τον χρόνο που δαπανάται από την P-GW στον διακομιστή (υπολογίζεται εύκολα εκτελώντας μια εντολή PING). Αλλά η RTO είναι μια παράμετρος που υπολογίζεται δυναμικά, γι 'αυτό θα είναι επίσης αναγκαίο να εφαρμοστεί ο αντίστοιχος αλγόριθμος Jacobson στην P-GW για την δυναμική εκτίμηση της τιμής RTO σύμφωνα με round trip time (RTT) και την RTT διακύμανση. Τα αποτελέσματα αυτού του δυναμικού υπολογισμού μπορεί να μην είναι ίδια στην P-GW και στον διακομιστή λόγω των γνωστών καθυστερήσεων στο εξωτερικό δίκτυο. Η μέθοδος έχει το πλεονέκτημα για την ανίχνευση απώλειας πακέτων

πριν από το διακομιστή αλλά είναι πολύ ακριβή υπολογιστικά, λόγω του τεράστιου αριθμού των TCP συνδέσεων που διαχειρίζεται η P-GW.

- End-to-end IP RTT: μια πιθανή μέθοδος για τη μέτρηση της RTT βασίζεται στην ανάλυση της εγκατάστασης της TCP σύνδεσης μιας συγκεκριμένης υπηρεσίας δεδομένων σε μια συγκεκριμένη κυψέλη. Είναι γνωστό, η εγκατάσταση TCP σύνδεσης χρησιμοποιεί μια τριμερή χειραψία, όπου το bit SYN είναι ενεργό. Τα παρακάτω βήματα θα πρέπει να ακολουθηθούν.
  - Όταν η DPI/P-GW λαμβάνει ένα TCP/IP πακέτο (από ένα τερματικό) με το bit SYN ενεργό, θα πρέπει να ξεκινήσει ένα χρονόμετρο υπολογισμού του RTT.
  - Η συμβολή του εξωτερικού RTT θα υπολογιστεί μετά τη λήψη ενός νέου TCP/IP πακέτου με το SYN bit που είναι ενεργό (από το διακομιστή) αναγνωρίζοντας το προηγούμενο. Η μέτρηση της συμβολής είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς οι συνθήκες του φορτίου στο εξωτερικό δίκτυο είναι άγνωστες για την παροχή μιας θεωρητικής εκτίμησης.
  - Τέλος, το από άκρο σε άκρο RTT θα ολοκληρωθεί όταν μια νέα acknowledgment από το τερματικό ληφθεί στο DPI/P-GW. Αυτή η μέτρηση πρέπει να γίνεται για κάθε διαδικασία εγκατάστασης TCP σύνδεσης που ανιχνεύεται στο DPI/P-GW. Το πιο σημαντικό στατιστικό στοιχείο που σχετίζονται με το RTT είναι το μέσο RTT, το οποίο έχει πολύ σημαντική επίδραση στα ανώτερα στρώματα απόδοσης και ειδικά για το TCP. Υπό αυτή την έννοια, η μέση τιμή RTT θα πρέπει να δοθεί για κάθε QCI, ως πιθανές δράσεις για τη βελτίωση της QoE σε αυτό το σενάριο και θα πρέπει να λαμβάνονται ανά QCI.

#### 4.5.2 KPIs που παρακολουθούνται στα τερματικά

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης πραγματικών μετρήσεων στη τερματική πλευρά είναι ότι έχουν υψηλή συσχέτιση με την πραγματική λαμβανομένη QoE. Έτσι, η συλλογή συγκεκριμένων στατιστικών στοιχείων για κάθε υπηρεσία και τερματικό θα επιτρέψει την καλύτερη ανάλυση των επιδόσεων της κάθε υπηρεσίας. Η διαδικασία αξιολόγησης QoE απλοποιείται σε μεγάλο βαθμό μέσω των περιοδικών εκθέσεων των μετρήσεων. Αρχικά, η διαθεσιμότητα απόκτηση ορισμένων δεικτών απόδοσης ή παραμέτρων εξαρτάται από τον κατασκευαστή του τερματικού. Η ενότητα αυτή εστιάζει στην αναφορά και την περιγραφή των κύριων KPIs που πρέπει να μετρηθούν στην τερματική πλευρά για συγκεκριμένα δεδομένα υπηρεσιών.

Μια τέτοια διαδικασία παρακολούθησης θα πρέπει να πραγματοποιείται από μια ad hoc εφαρμογή εγκατεστημένη σε κινητά τερματικά. Το λογισμικό χρέωσης για τη συλλογή τερματικών KPIs θα πρέπει να είναι χαμηλής κατανάλωσης σχετικά με το radio bit rate και το φορτίο επεξεργασίας, προκειμένου να μην επηρεάζουν την ποιότητα των άλλων εφαρμογών. Το εν λόγω λογισμικό θα είναι υπεύθυνο για τη μέτρηση και την έκθεση ενός συνόλου KPIs για την ενίσχυση του θεωρητικού μοντέλου που υπολογίζει την QoE. Τα κινητά τερματικά που δεν περιλαμβάνουν δυνατότητες παρακολούθησης, το

θεωρητικό μοντέλο θα χρησιμοποιήσει προκαθορισμένες τιμές ή μέσες τιμές από τα τερματικά που βρίσκονται στην ίδια κυψέλη.

Οι κύριοι KPIs που μετριοούνται σε κάθε επίπεδο πρωτοκόλλου παρατίθενται στον Πίνακα 8. Οι πιθανές μετρήσεις στη τερματική πλευρά διακρίνονται ως εξής.

- Signaling KPIs: Σχετίζεται με τη σηματοδότηση καθυστερήσεων κατά τη διάρκεια της εγκαθίδρυσης υπηρεσίας ή της σύνδεσης στο EPS δίκτυο, η οποία επηρεάζει μόνο την αρχική εγκατάσταση των υπηρεσιών και πιθανές επαναδιαπραγματεύσεις των bearers.
- Network level KPIs: Θα μπορούσε να υπάρξει μερική επικάλυψη με το network level KPIs η οποία είναι μετρημένη σε έναν DPI. Είναι πάντα προτιμότερο να χρησιμοποιούνται KPIs που συλλέγονται από τα τερματικά (αν υπάρχουν), δεδομένου ότι εκπροσωπούν το τελικό QoS που λήφθηκε από τον εξοπλισμό του χρήστη. Παραδείγματα των τέτοιων KPIs είναι IP level *throughput*, IP packet loss rate, IP packet sizes, RTT από το τερματικό στον διακομιστή ή από τερματικό σε τερματικό
- Transport level KPIs: Οι κύριοι KPIs σε αυτό το επίπεδο είναι οι παράμετροι TCP, όπως το TCP advertised window (ADWN) ή το maximum segment size (MSS). Το ADWN αντιπροσωπεύει το μέγεθος του παραθύρου του δέκτη και περιλαμβάνεται από το δέκτη σε κάθε τμήμα ACK, υποδεικνύοντας τη μέγιστη ποσότητα των δεδομένων που είναι σε θέση να λάβει. Η τιμή του ADWN πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσο μεγάλη όσο το bandwidth-delay product (BDP). Διαφορετικά, ο δέκτης του TCP στρώματος θα περιορίσει το εφικτό bandwidth. Για παράδειγμα, ας εξετάσουμε ένα LTE τερματικό με 10 Mbps χωρητικότητα μετάδοσης στο DL. Υποθέτοντας ότι ένα τυπικό LTE RTT των 10 ms για 40 bytes πακέτων, το BDP μπορεί να υπολογιστεί ως  $ADWN \geq BDP = \text{Bandwidth} * RTT = 10 \text{ Mbit} / \text{s} * 10 \text{ ms} = 12,5 \text{ kbytes}$ . Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της εγκαθίδρυσης σύνδεσης TCP, τα δύο άκρα συμφωνούν με το μέγεθος του μεγαλύτερου τμήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσα σε αυτή τη σύνδεση, που καλείται MSS. Η τιμή του MSS έχει επίσης μια σημαντική επίδραση στην απόδοση του TCP. Όσο μεγαλύτερο είναι το MSS τόσο μικρότερη είναι η αργή φάση εκκίνησης που θα χρειαστεί για να γεμίσει το σωλήνα, εξαιτίας του ότι κατά τη διάρκεια της αργής εκκίνησης η αύξηση των μεταδιδόμενων bytes είναι σε μοναδιαία τμήματα. Σε περίπτωση μεγαλύτερων τμημάτων, η χρησιμοποίηση bandwidth κατά τη διάρκεια της πρώτης αργής κυκλικής εκκίνησης είναι υψηλότερη και το BDP μπορεί να επιτευχθεί πιο γρήγορα. Επιπλέον, το MSS έχει επίσης ένα αντίκτυπο στη συνολική υπερχείλιση πακέτων που εισήχθησαν από τα διάφορα πρωτόκολλα. Ένα άλλο μειονέκτημα της χρήσης τμημάτων TCP μικρού μεγέθους είναι η αύξηση του αριθμού των ACKs που στέλνονται πίσω στον πομπό. Εμείς προτείνουμε την απόκτηση αυτών των δύο τιμών των παραμέτρων από το τερματικό, προκειμένου να προσαρμοστεί το μοντέλο TCP αναλόγως.
- Application level KPIs: Επικεντρώνεται στην εξασφάλιση ορισμένων παραμέτρων που απαιτούνται για την εκτίμηση του QoE. Ένα από τα βασικά θέματα κατά την εκτίμηση του QoE είναι μια ορθή ταυτοποίηση των κύριων μετρικών απόδοσης εφαρμογής που επηρεάζουν την QoS. Για παράδειγμα, ο αριθμός των

rebufferings για το streaming ή η από άκρο σε άκρο καθυστέρηση για VoIP. Η γνώση αυτών των μετρικών απόδοσης εφαρμογής μπορεί να μην είναι απλή, αλλά μπορεί να απαιτήσει να πάρει χαμηλότερου επιπέδου μετρικές QoS προκειμένου να εκτιμηθεί. Σημειώστε ότι η διαδικασία της απεικόνισης της QoS της εφαρμογής με την QoE του χρήστη μπορεί να απαιτήσει τη γνώση ορισμένων παραμέτρων διαμόρφωσης που δεν μπορούν να εκτιμηθούν αναλυτικά. Αυτοί οι δείκτες/παράμετροι απόδοσης είναι μια ειδική υπηρεσία (web browsing, το YouTube, και VoIP) [3]. Ο τρόπος για να μετρηθεί κάποια από αυτές τις παραμέτρους εξηγείται παρακάτω.

- Web page downloading time (D): Υπάρχουν δύο επιλογές για να υπολογίσουμε αυτήν τη μετρική. Η πιο ακριβής επιλογή βασίζεται στην παρακολούθηση και αναλύοντας Hypertext Transfer Protocol (HTTP) πακέτα. Είναι σημαντικό να προσδιοριστούν όλες οι HTTP συναλλαγές που ανήκουν στην ίδια ιστοσελίδα έκτοτε τα δευτερεύοντα αντικείμενα που περιέχονται σε μια ιστοσελίδα μπορεί να βρίσκονται σε εξωτερικούς διακομιστές. Οι πληροφορίες που σχετίζονται με τις συνδέσεις, όπου βρίσκονται αυτά τα αντικείμενα, περιλαμβάνονται στο κύριο αντικείμενο. Έτσι, ένας πιθανός τρόπος για να γνωστοποιηθούν όλες οι TCP συνδέσεις που σχετίζονται με την πραγματική ιστοσελίδα είναι αναζητώντας όλες τις συνδέσεις που περιλαμβάνονται στον κώδικα της κεντρικής σελίδας HyperText Markup Language (HTML). Μόλις όλα τα τμήματα που ανήκουν στην ίδια συναλλαγή εντοπιστούν, ο χρόνος λήψης της ιστοσελίδας μπορεί να υπολογιστεί ως ο χρόνος που πέρασε από τη στιγμή που πραγματοποιήθηκε το αίτημα της ιστοσελίδας μέχρι τη λήψη του τελευταίου τμήματος δεδομένων. Μια άλλη απλούστερη επιλογή είναι να εκτιμηθεί ο χρόνος λήψης της ιστοσελίδας από το κατώτερο στρώμα της throughput και το μέγεθος της σελίδας, τα οποία θα μπορούσαν να είναι γνωστά εκ των προτέρων από την ανάγνωση του περιεχομένου και του μήκους της HTTP header απόκρισης.
- End-to-end delay (d): Υπάρχουν δύο επιλογές προκειμένου να υπολογιστεί η άκρο σε άκρο καθυστέρηση. Η πρώτη επιλογή είναι η ανάλυση των χρονικών ετικετών (αν είναι διαθέσιμες) που περιλαμβάνονται σε ορισμένα πακέτα. Αυτή η πληροφορία περιλαμβάνεται, για παράδειγμα, σε πακέτα real time Control Protocol (RTCP), τα οποία συνήθως χρησιμοποιούνται στο πρότυπο της υπηρεσίας VoIP. Επιπλέον, αυτή η λύση απαιτεί ο αποστολέας και ο παραλήπτης να συγχρονίζονται μέσω network time protocol (NTP). Ένα άλλο μειονέκτημα αυτής της λύσης είναι ότι τα μεγέθη πακέτων RTCP μπορεί να διαφέρουν από το μέγεθος των πακέτων που περιέχουν τα δεδομένα του χρήστη, οδηγώντας σε μία διαφορά μεταξύ της μετρημένης καθυστέρησης (χρησιμοποιώντας RTCP πακέτα) και της πραγματικής καθυστέρησης (που αντιστοιχούν σε πακέτα δεδομένων). Η δεύτερη επιλογή προσεγγίζει την άκρο σε άκρο καθυστέρηση ως το μισό ενός RTT, η οποία μπορεί να μετρηθεί μόνο στο επίπεδο μεταφοράς κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης σύνδεσης TCP, ή σε επίπεδο δικτύου, όπως περιγράφηκε πριν.
- Loss probability at application level: Για RTP υπηρεσίες φωνής, η ανίχνευση απώλειας μπορεί να βασίζεται στο πεδίο του αριθμού

ακολουθίας που περιλαμβάνεται στην RTP κεφαλίδα, ελέγχοντας για πιθανούς αριθμούς απώλειας στην εισερχόμενη RTP ροή.

- Video buffer size: Αυτή η παράμετρος περιλαμβάνει το αίτημα που στέλνει ο ενσωματωμένος παίχτης στον διακομιστή πολυμέσων για τη λήψη του επιλεγμένου βίντεο. Η «έκρηξη» πεδίο (εντός της "Videoplayback" λίστας των παραμέτρων) δείχνει το μέγεθος του buffer σε δευτερόλεπτα, το οποίο πολλαπλασιάζεται με τον ρυθμό δεδομένων του βίντεο και παρέχει το μέγεθος του buffer σε bytes.
- Video bitrate and video length: Αυτές οι παράμετροι αποστέλλονται ως μεταδεδομένα στο αρχείο που κατεβαίνει από YouTube. Το αρχείο αυτό είναι Flash Video (FLV) για την πλειοψηφία των clip που δεν έχουν υψηλή ευκρίνεια και MP4 clip υψηλής ευκρίνειας.

Layer	KPI / parameter
Signaling	Attach delay EPS bearer establishment delay
Transport	TCP advertised window (ADWN) TCP maximum segment size (MSS)
Network	Average RTT RTT variance IP packet loss rate IP packet sizes
Application	Average throughput at application layer (r)
Web browsing	Web page downloading time (d) DNS resolution time
VoIP (E-model)	End-to-end delay application level (d) Loss probability at application level (e) Video buffer size ( $B_{full}$ )
Video YouTube (HTTP/TCP)	Buffer length when the player paused ( $B_{empty}$ ) Video bitrate ( $\lambda$ ) Video length (l) Average TCP goodput ( $\beta$ ) Number of empty-buffer events ( $n_{rebuf}$ )

**Πίνακας 8:** Οι KPIs που μετριοούνται σε κάθε επίπεδο πρωτοκόλλου [3]

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ**

<b>Ξενόγλωσσος όρος</b>	<b>Ελληνικός όρος</b>
End-to-end	Από άκρο σε άκρο
Loss	Απώλεια
Generation	Γενιά
Video	Βίντεο
Release	Έκδοση
Off-path	Εκτός διαδρομής
Network	Διαδίκτυο
Jitter	Διακύμανση καθυστέρησης
Level	Επίπεδο
Bandwidth	Εύρος ζώνης
Application	Εφαρμογή
Web page	Ιστοσελίδα
Bearer	Κομιστής
Cell	Κυψέλη
Delay	Καθυστέρηση
Transport	Μεταφορά
Length	Μήκος
Probability	Πιθανότητα
Five-tuple	Πεντάδα
Initiated	Πυροδοτούμενο
Radio signal	Ραδιοσήμα
Throughput	Ρυθμαπόδοση
Rate	Ρυθμός
Signaling	Σηματοδότηση
On-path	Στη διαδρομή
Streaming	Συνεχής ροή
Time	Χρόνος

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
4G	Forth Generation
ADWN	Advertised Window
AF	Application Function
AM	Aknowledged Mode
AMPS	Advanced Mobile Phone Service
ANS	Advanced Network
APN	Access Point Name
APN_AMBR	APN Aggregate Maximum Bit Rate
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARP	Allocation and Retention Priority
API	Application Programming Interface
AS	Application Server
AUC	Authentication Center
BBF	Bearer-binding Function
BBERF	Event Reporting Function
BDP	Bandwidth-delay Product
BW	Operating Bandwidth
CA	Carrier Aggregation
CA: Carrier Aggregation	China Communications Standards Association
CCSA	
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
	Charging Data Record
CDR	
CEMS	Customer Experiesnce Management System
CF	Carrier Frequency
CN:	Core Network
CoMP	Coordinated Multipoint
CRM	Customer relationship management
CSCF	Call-state Control Function
D-AMPS	Dual-mode AMPS
DHCP	Dynamic Configuration Protocol
DL	Down Load
DPI	Deep Packet Inspector
DSCP	Different Service Code Point
DSL	Digital Subscriber Line
DSL	Digital Subscriber Line
EDGE	Enhanced Data rates for GSM and TDMA Evolution



eHRPD	Enhanced High Rate Packet Data
eNodeB	Evolved Node B
EPC	Evolved Packet Core
EPDCCH	Enhanced Physical Control Channel
EPS	Evolved Packet System
ETSI	European Telecommunications Standardization Institute
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
FDD:	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FeICIC	Further enhanced Inter-Cell Interference Coordination
FLV	Flash Video
GBR	Guaranteed Bit Rate
GERAN	GSM EDGE Radio Access Network
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile communications
GSMA	GSM Association
GTP	GPRS Tunneling Protocol
GUI	Graphical user interface
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HeNBs	Home eNodeBs
HNB	HNodeB
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSPA+	High Speed Packet Access Evolution
HSGW	High Rate Packet Data Serving Gateway
HSS	Home subscriber server
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access
HTML	HyperText Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICIC	Inter-cell interference coordination
I-CSCF	Interrogating Call State Control Function
IETF	Internet Engineering Task Force
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMT-2000	International Mobile Telecommunications 2000
IP	Internet Protocol
IP-CAN IP	Connectivity Access Network
IPV4	Internet Protocol version 4
IPV6	Internet Protocol version 6
IS-95	Interim Standard 95
ISD	Inter-site Distance
IT	Information technology
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
LTE-A	LTE-Advanced
MAC	Medium Access Control

MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MBR	Maximum Bit Rate
MBSFN	Multicast Broadcast Single Frequency Network
MIMO	Multiple Input and Multiple Output
MME	Mobile Management Entity
MMTel	Multimedia telephony
MSISDN	Mobile Station International Subscriber Directory Number
MSS	Maximum Segment Size
NMT	Nordic Mobile Telephony
NMS	Network Management Subsystem
Non-GBR	Non-Guaranteed Bit Rate
NTP	Network Time Protocol
OCS	Online Charging System
OFCS	Offline Charging System
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
O&M	Operation and Maintenance
PCC	Policy and Charging Control
PCRF	Policy control and charging rules function
PDC	Personal Digital Communications
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
P-GW	Packet Data Network Gateway
PLoss	Penetration Loss
PMIP	Proxy Mobile IPv6
PS	Packet Switched
QCI	QoS Class Identifier
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RCS	Rich Communication Suite
RLC:	Radio Link Control
RRM	Radio Resource Management
RTCP:	Real Time Control Protocol
RTO	Retransmission Timeout
RTP	Real-time transport Protocol
RTSP	Real-time Streaming Protocol
RTT	Round Trip Time
SACK	Acknowledgment
SAE	System Architecture Evolution
S-CSCF	Serving Call Session Control Function
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
SDF	Service Data Flow
S-GW	Serving Gateway
SIP	Session Initiation Protocol
SLA:	Service Level Agreement
SON	Self Organizing Networks
SPR	Subscription Profile Repository

SRVCC	Single Radio Voice Call Continuity
TACS	TOTAL Access Communication System
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDF	Traffic Detection Function
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TFT:	Traffic Flow Template
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee
TTI	Transmission Time Interval
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UE-AMBR	User Equipment Aggregate Maximum Bit Rate
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UL	Up Load
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UNI	User Network Interface
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UX	User experience
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VoIP	Voice over IP
Volte	Voice over LTE
WARC	World Administrative Radio Conference
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] “LTE- an Introduction”, White paper, Ericsson, J. Buschman, April 2011, <http://www.comlab.uniroma3.it/ens/LTE2.pdf>, [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [2] E. Seidel, “LTE-A Standardisation in Release 12 and Beyond, 3GPP”, January 2013, Germany
- [3] G. Gomez-Javier, Lorca-Raquel Garcia and Q. Perez, “Towards a QoE-Driven Resource Control in LTE and LTE-A Networks”, Journal of Computer Networks and Communications, vol. 2013
- [4] S. Sesia, I. Toufik and M. Baker, “LTE The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”, Wiley, 2011, [http://www.aldradi.com/download/The\\_UMTS\\_Long\\_Term\\_EvolutionB.pdf](http://www.aldradi.com/download/The_UMTS_Long_Term_EvolutionB.pdf) , [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [5] “Quality of Service (QoS) in LTE”, BEC Technologies, [http://www.bectechnologies.net/main/newsletter\\_images/QoS.pdf](http://www.bectechnologies.net/main/newsletter_images/QoS.pdf), [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [6] “Quality of Service (QoS) and Policy Management in Mobile Data Networks”, White paper, December 2013, [http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white\\_papers/policy\\_management.pdf](http://www.ixiacom.com/pdfs/library/white_papers/policy_management.pdf), [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [7] “Quality of Service (QoS) in LTE, Third Generation Partnership Project”, <http://4g-lte-world.blogspot.gr/2013/01/quality-of-service-qos-in-lte.html>, [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [8] “LTE”, White paper, S. Kumar Dornal, <http://www.scribd.com/doc/20786641/LTE-Whitepaper>, [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [9] M. Sauter, “From GSM to LTE, An introduction to mobile networks and mobile broadband”, Wiley, February 2011
- [10] 3GPP TR 36.913, “Requirements for further advancements for E-UTRA (LTE-A)”, version 9.0.0, Release 9, Etsi, 2010-02
- [11] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, “4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”, Academic Press, 2011
- [12] 3GPP TS 23.401, “3GPPq; Technical Specification Group Services and System Aspects; General Packet Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access”, v10.4.0, Release 10, 2011-06.
- [13] Jie Zhang, “Femtocells: Technologies and Deployment”, Wiley, November 2009
- [14] ITU\_T Recommendation Y.1291, “An architectural framework for support of QoS in packet networks”, May 2004
- [15] “Voice over LTE- VoLTE Tutorial”, Radio-Electronics, <http://www.radio-electronics.com/info/cellular/telecomms/lte-long-term-evolution/voice-over-lte-volte.php>, [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [16] “The Voice Evolution”, Qualcomm, April 2012, <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/wireless-networks-the-voice-evolution-volte-vohspa-wcdma-and-quality.pdf>, [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [17] “VoLTE with SRVCC: The second phase of voice evolution for mobile LTE devices”, White Paper, October 2012
- [18] “Voice and video calling over LTE”, White Paper, Ericsson, February 2012
- [19] “The VOLTE ‘Conversation’ Between IMS and LTE”, LTE University powered by Award Solutions, [http://lteuniversity.com/get\\_trained/expert\\_opinion1/b/bbest/archive/2012/12/17/the-volte-conversation-between-ims-and-lte.aspx](http://lteuniversity.com/get_trained/expert_opinion1/b/bbest/archive/2012/12/17/the-volte-conversation-between-ims-and-lte.aspx), [Προσπελάστηκε 1/11/14]
- [20] “Deliverable D2.2 – Definition of requirements of the management systems to keep up with QoE expectations based on QoS and traffic monitoring” IPNQSIS - IP NETWORK MONITORING FOR QOS INTELLIGENT SUPPORT, Celtic project, October 2011
- [21] H. Ekstrom, “QoS Control in the 3GPP Evolved Packet System”, Ericsson, February 2009
- [22] S. Rommer and J. Stenfelt, “Policy and Charging Control in the Evolved Packet System”, Ericsson, February 2009