

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών  
(service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network  
Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς**

**Γρηγόριος Β. Γκιώνης**

**Επιβλέπων: Δρ. Νικόλαος Πασσάς, ΕΔΙΠ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2024**

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

**Γρηγόριος Β. Γκιώνης**

**A.M.: M1569**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Δρ. Νικόλαος Πασσάς, ΕΔΙΠ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ** Δρ. Νικόλαος Πασσάς, ΕΔΙΠ  
Δρ. Δημήτριος Τσόλκας, ΕΔΙΠ  
Δρ. Παντελής Μπαλαούρας, ΕΔΙΠ

Οκτώβριος 2024

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά εμμέσους τρόπους επικοινωνίας στο Δίκτυο-πυρήνα (Core Network) για την 6<sup>η</sup> γενιά επικοινωνιών (6G) με την χρήση του μοντέλου κατανεμημένης διαχείρισης υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) και παρουσιάζει την πρακτική εφαρμογή του μοντέλου σε τρέχουσες, ανοιχτού κώδικα υλοποιήσεις του Core Network.

Στην 5<sup>η</sup> γενιά επικοινωνιών (5G), η αρχιτεκτονική επικοινωνίας ανάμεσα στις λειτουργικές δικτυακές οντότητες, βασίστηκε στον μετασχηματισμό του παραδοσιακού τρόπου λειτουργίας των δικτυακών οντοτήτων ώστε η επικοινωνία τους να γίνεται με τρόπο παρεμφερή και εφάμιλλο με αυτόν που χρησιμοποιείται στον τομέα ανάπτυξης λογισμικού και στα σύγχρονα συστήματα πληροφορικής. Με αυτή την σημαντική αλλαγή σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές, η νέα αρχιτεκτονική που υιοθετήθηκε ορίζει τις επικοινωνίες μεταξύ των δικτυακών οντοτήτων με την χρήση HTTP-based κλήσεων όπου κάθε οντότητα προσφέρει υπηρεσίες στις άλλες οντότητες και καταναλώνει υπηρεσίες των άλλων οντοτήτων μέσω APIs (Application Programming Interfaces). Η νέα αυτή οριζόντια αρχιτεκτονική ονομάστηκε SBA (Service Based Architecture) και προσφέρει στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών εύκολη επεκτασιμότητα, ενώ διασφαλίζει παράλληλα το χαμηλό κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών. Επιπρόσθετα, η υλοποίηση των λειτουργιών του δικτύου ως ένα σύνολο υπηρεσιών έχει οδηγήσει στην μετεξέλιξη των παραδοσιακών οντοτήτων - network elements σε αυτόνομες λειτουργικές οντότητες - Network Functions, τα οποία πλέον μπορούν να εγκαθίστανται στο υπολογιστικό νέφος (cloud).

Παρόλα αυτά η αρχιτεκτονική SBA επιτρέπει την any-to-any συνδεσιμότητα, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα για την διασφάλιση μίας αποδοτικής σηματοδοσίας στο Core Network. Πιο συγκεκριμένα, η αξιοπιστία της σηματοδοσίας καθώς και η διαχείρισή της είναι πιο απαιτητική πλέον. Συνεπώς, η εφαρμογή ενοποιημένων τρόπων κατανομής φόρτου, δρομολόγησης και προτεραιοτήτων κίνησης, καθώς και ενός ενοποιημένου πλαισίου παρατήρησής, θεωρείται αναγκαία. Για αυτούς τους σκοπούς, το 3GPP εισήγαγε με την Release 16 μία νέα δικτυακή οντότητα, το SCP (Service Communication Proxy), το οποίο υλοποιεί τις βασικές λειτουργίες ενός proxy εξυπηρετητή. Η εισαγωγή του SCP είναι το πρώτο βήμα προς την κατεύθυνση χρήσης ενός service mesh μοντέλου για την επικοινωνία στα πλαίσια του Core Network και ένα πεδίο έντονης έρευνας για την αξιοποίηση των λογικών λειτουργιών του SCP ως το βασικό δομικό κομμάτι του service mesh για το μελλοντικό 6G Core Network.

Στη διπλωματική αυτή εργασία, πραγματοποιείται συγκριτική μελέτη των μοντέλων επικοινωνίας καθώς και περιγραφή των τεχνολογιών για την εφαρμογή ενός service mesh μοντέλου αξιοποιώντας τις βασικές λειτουργίες ενός SCP, αναδεικνύοντας τις δυνατότητές και τα πλεονεκτήματα του προτεινόμενου μοντέλου. Στο πειραματικό επίπεδο της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το Open5GS και το εργαλείο προσομοίωσης UERANSIM για την ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης διάταξης δοκιμών 5G σε ένα Kubernetes cluster, το οποίο επεκτάθηκε με το Istio για την δημιουργία μίας service mesh υλοποίησης. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραπάνω διάταξη και αναφέρονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Δίκτυα Κινητών Επικοινωνιών

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** 5G, 6G, SCP, service mesh, 3GPP indirect communication

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

## ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the theoretical study of indirect communication methods in the 6G Core Network using a service mesh model and presents the practical application of that model in current, open-source implementations of the Core Network.

The new 5G Core Network communication architecture has led to the transformation of the traditional mode of operation of the network entities so that their communication is accomplished in a way like that used in the field of software development and modern IT systems. With this significant change compared to previous generations, the new architecture defines communications between network entities using HTTP-based calls where each entity offers services towards other entities and consumes services that are provided by other entities through APIs (Application Programming Interfaces). This new horizontal architecture was named SBA (Service Based Architecture) and offers easy scalability, while ensuring the low cost of deploying and operating a mobile network. Additionally, the implementation of network functions as a set of services has led to the evolution of traditional entities - network elements into autonomous functional entities - Network Functions, which can now be installed in the cloud.

However, the SBA architecture allows for any-to-any connectivity, thus increasing the complexity to ensure efficient signaling in the Core Network. More specifically, the reliability of signaling as well as its management is more demanding now. Therefore, the implementation of unified modes of load distribution, routing and traffic priorities, as well as a unified observation framework, is considered necessary. As such, 3GPP introduced with Release 16 a new network entity, the SCP (Service Communication Proxy), which implements the basic functions of a proxy server. The introduction of SCP is the first step in the direction of using a service mesh model for communication within the Core Network and an area of intense research for the use of SCP logical functionalities as the structural part of the service mesh in 6G Core Network.

In this thesis, a comparative study of communications models is carried out, as well as a description of the technologies for the implementation of a service mesh model using the logical functionalities of the SCP. Its capabilities and advantages are also demonstrated. At the experimental level of the following work, Open5GS and the UERANSIM tool were used to develop a complete 5G test setup in a Kubernetes cluster, which was extended with Istio to create a service mesh solution. Subsequently, the results obtained from the test bench are presented, and the conclusions reached are reported.

**SUBJECT AREA:** Mobile Networks

**KEYWORDS:** 5G, 6G, SCP, service mesh, 3GPP indirect communication

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>16</b>
<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>17</b>
<b>2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....</b>	<b>21</b>
2.1 Πρωτόλειο σύστημα Zero-Generation .....	21
2.2 Δίκτυα πρώτης γενιάς - 1G .....	22
2.3 Δίκτυα δεύτερης γενιάς - 2G .....	23
2.3.1 Το σύστημα GSM .....	24
2.4 Δίκτυα τρίτης γενιάς - 3G .....	36
2.4.1 Η κοινοπραξία 3GPP .....	36
2.4.2 Το σύστημα UMTS.....	40
<b>3. ΔΙΚΤΥΑ ΤΕΤΑΡΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ – 4G .....</b>	<b>47</b>
3.1.1 Το σύστημα EPS .....	48
3.1.2 Το τερματικό του χρήστη - UE.....	51
3.1.3 Το δίκτυο πρόσβασης - E-UTRAN.....	52
3.1.4 Το Δίκτυο-πυρήνα - EPC.....	54
3.1.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στα δίκτυα 4G.....	60
3.1.6 Διασφάλιση ποιότητας επικοινωνίας με Bearers.....	65
<b>4. ΔΙΚΤΥΑ ΠΕΜΠΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ - 5G ΚΑΙ 5G-ADVANCED.....</b>	<b>67</b>
4.1 Δίκτυα πρόσβασης 5G NR και LTE μέσω πολλαπλής συνδεσιμότητας .....	73
4.2 Το σύστημα 5G System - 5GS.....	77
4.2.1 Το τερματικό του χρήστη - 5G UE .....	78
4.2.2 Δίκτυο πρόσβασης - NG-RAN.....	78
4.2.3 Το δίκτυο πυρήνα - 5GC.....	82
4.2.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στο δίκτυο 5G .....	87
4.2.5 Διασφάλιση ποιότητας επικοινωνίας με QoS Flow .....	90
4.2.6 Τμηματοποίηση Δικτύου - Network Slicing .....	94
<b>4.3 5G-Advanced.....</b>	<b>95</b>

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

<b>4.4</b>	<b>IMT-2030 και 6G.....</b>	<b>97</b>
<b>5.</b>	<b>ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΟΝΤΟΤΗΤΩΝ .....</b>	<b>99</b>
<b>5.1</b>	<b>Άμεσα και έμμεσα μοντέλα επικοινωνίας λειτουργικών οντοτήτων .....</b>	<b>100</b>
<b>5.2</b>	<b>Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών - Service Mesh .....</b>	<b>107</b>
5.2.1	Istio mesh network.....	108
5.2.2	Service Mesh μέσω MOSN .....	115
5.2.3	Service Mesh μέσω eBPF .....	115
5.2.4	Service Mesh μέσω gRPC .....	116
5.2.5	Καταναεμημένος εξυπηρετητής SCP μέσω service mesh .....	118
<b>6.</b>	<b>ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ SERVICE MESH.....</b>	<b>123</b>
<b>6.1</b>	<b>Open5GS.....</b>	<b>123</b>
<b>6.2</b>	<b>UERANSIM .....</b>	<b>126</b>
<b>6.3</b>	<b>Εγκατάσταση διάταξης δοκιμών .....</b>	<b>127</b>
6.3.1	Εγκατάσταση open5GS ως CNF.....	128
6.3.2	Εγκατάσταση UERANSIM .....	133
6.3.3	Εκκίνηση διάταξης δοκιμών.....	137
6.3.4	Αποκοπή συγκεκριμένης κίνησης από το SCP Pod προς τη NRF .....	139
6.3.5	Αποκοπή συγκεκριμένης κίνησης από οποιοδήποτε NF προς τη NRF .....	140
<b>6.4</b>	<b>Αποτελέσματα προσομοίωσης.....</b>	<b>142</b>
<b>7.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>148</b>
	<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....</b>	<b>151</b>
	<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>154</b>
	<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>164</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική συστήματος GSM .....	26
Εικόνα 2: Χρονοθυρίδες (timeslots) στο GSM για downlink και uplink.....	28
Εικόνα 3: Μορφότυπο IMSI.....	30
Εικόνα 4: Μορφότυπο MSISDN .....	31
Εικόνα 5: Μορφότυπο IMEI.....	33
Εικόνα 6: Μορφότυπο IMEISV .....	33
Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική συστήματος GPRS .....	35
Εικόνα 8: Η εξέλιξη των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας από τη 2G έως και τη 3G ....	37
Εικόνα 9: Ομάδες PCGs και TSGs στην κοινοπραξία 3GPP .....	38
Εικόνα 10: Ομάδες TSG και οι αντίστοιχες ομάδες εργασίας WG .....	39
Εικόνα 11: 3GPP Releases ανά έτος .....	39
Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική UMTS μαζί με GERAN .....	40
Εικόνα 13: Επίπεδα AS και NAS στο σύστημα UMTS.....	42
Εικόνα 14: Πολυπλεξία WCDMA και ακολουθίες μικροστοιχείων (chip sequences).....	43
Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική συστήματος UMTS μαζί με GERAN και BICN.....	46
Εικόνα 16: Γράφημα ανάπτυξης της κίνησης υπηρεσιών φωνής και δεδομένων .....	47
Εικόνα 17: Συστήματα GSM\GPRS, UMTS και η εξέλιξη προς το σύστημα EPS.....	49
Εικόνα 18: Εξέλιξη πακετομεταγωγής από το GPRS/UMTS μέχρι το σύστημα EPS ....	50
Εικόνα 19: Διαχωρισμός τερματικού UE σε συσκευή ME και κάρτα UICC .....	51
Εικόνα 20: Δίκτυο πρόσβασης στο σύστημα EPS .....	52
Εικόνα 21: Διεπαφή X2 μέσω φυσικών μονοπατιών με δρομολογητή.....	53
Εικόνα 22: Διεπαφές στο Δίκτυο-πυρήνα EPC .....	54
Εικόνα 23: Συσχέτιση μεταξύ MME pool area, SGW serving area και TA.....	56
Εικόνα 24: Μορφότυπο GUMMEI .....	57
Εικόνα 25: Μορφότυπο GUTI.....	59

Εικόνα 26: Οικογένειες πρωτοκόλλων στο σύστημα EPS .....	60
Εικόνα 27: Επίπεδο AS και NAS στο σύστημα EPS .....	60
Εικόνα 28: Στοιβά πρωτοκόλλων στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN.....	62
Εικόνα 29: Στοιβά πρωτοκόλλων στο επίπεδο ελέγχου και χρήστη στο σύστημα EPS.	63
Εικόνα 30: Επίπεδο χρήστη στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN και το EPC .....	64
Εικόνα 31: Επίπεδο ελέγχου στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN και το EPC .....	64
Εικόνα 32: EPS bearer από άκρο σε άκρο.....	66
Εικόνα 33: IMT-2000, IMT-Advanced και IMT-2020 .....	69
Εικόνα 34: Περιπτώσεις χρήσης που ορίζονται από το IMT-2020 .....	70
Εικόνα 35: Βελτιώσεις από το IMT-Advanced προς το IMT-2020.....	70
Εικόνα 36: Συσχέτιση λειτουργιών με τις περιπτώσεις χρήσης για το δίκτυο 5G.....	71
Εικόνα 37: Χρονοδιάγραμμα για τις Release 13 και 14 του 3GPP.....	72
Εικόνα 38: Χρονοδιάγραμμα για τις Release 15 και 16 του 3GPP.....	73
Εικόνα 39: 3GPP options για συνύπαρξη 5G/NR και LTE .....	74
Εικόνα 40: Μετάβαση από το σύστημα EPS προς το σύστημα 5G SA .....	75
Εικόνα 41: Μετάβαση από το σύστημα EPS προς το σύστημα 5G NSA.....	75
Εικόνα 42: 5G NSA Option 3, 3a και 3x.....	76
Εικόνα 43: Τα 3GPP options και οι χρόνοι έκδοσής τους με βάση Releases .....	76
Εικόνα 44: Μορφότυπο SUCI.....	77
Εικόνα 45: Αρχιτεκτονική δικτύου πρόσβασης NG-RAN.....	79
Εικόνα 46: Οι διάφορες λειτουργίες στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN και στο 5GC .....	79
Εικόνα 47: Στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου χρήστη στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN..	80
Εικόνα 48: Στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου ελέγχου στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN.	80
Εικόνα 49: Αρχιτεκτονική αποδόμησης του gNB στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN.....	81
Εικόνα 50: Σύστημα 5GS με service-based απεικόνιση.....	82
Εικόνα 51: Σύστημα 5GS με reference point απεικόνιση.....	83
Εικόνα 52: Service Registration, Service Discovery και Service Request .....	84

Εικόνα 53: Σηματοδότηση στο επίπεδο NAS μεταξύ του τερματικού UE και του 5GC.....	88
Εικόνα 54: Στοιβά πρωτοκόλλων στο επίπεδο χρήστη του συστήματος 5GS .....	90
Εικόνα 55: Τα τρία διαφορετικά είδη SSC mode για τις συνεδρίες PDU .....	92
Εικόνα 56: Συνεδρία PDU και ροές QoS flow από άκρο σε άκρο .....	93
Εικόνα 57: Network slicing στο σύστημα 5GS .....	95
Εικόνα 58: Δυνατότητες που ορίζονται στη σύσταση IMT-2030 .....	98
Εικόνα 59: Χρονοδιάγραμμα της κοινοπραξίας 3GPP για την εξέλιξη του δικτύου 6G ..	98
Εικόνα 60: Request-Response στην άμεση επικοινωνία .....	100
Εικόνα 61: Subscribe-Notify στην άμεση επικοινωνία.....	100
Εικόνα 62: Subscribe-Notify για άλλο Service Consumer στην άμεση επικοινωνία.....	101
Εικόνα 63: Άμεση και έμμεση επικοινωνία .....	102
Εικόνα 64: Request-Response στην έμμεση επικοινωνία.....	102
Εικόνα 65: Subscribe-Notify στην έμμεση επικοινωνία .....	102
Εικόνα 66: Subscribe-Notify για άλλο Service Consumer στην έμμεση επικοινωνία ...	102
Εικόνα 67: Μοντέλα επικοινωνίας A, B, C και D από την κοινοπραξία 3GPP.....	106
Εικόνα 68: Αρχιτεκτονική mesh network με την τεχνική sidecar .....	108
Εικόνα 69: Sidecar pattern .....	110
Εικόνα 70: Istio σε sidecar mode .....	111
Εικόνα 71: Ασφάλεια μέσω Istio mesh network .....	112
Εικόνα 72: Εμφάνιση distributed traces στο ZipKin .....	114
Εικόνα 73: Αρχιτεκτονική επεκτάσεων WASM.....	114
Εικόνα 74: Αρχιτεκτονική Istio με MOSN proxy.....	115
Εικόνα 75: Αρχιτεκτονική Istio χωρίς sidecar proxy .....	116
Εικόνα 76: Καθυστέρηση μεταξύ του Istio με gRPC και του Istio με sidecar proxy.....	118
Εικόνα 77: Κατανεμημένος SCP agent .....	119
Εικόνα 78: Κατανεμημένο SCP μέσω service mesh .....	119
Εικόνα 79: Πολλαπλά πλέγματα SCP .....	120

Εικόνα 80: NF Service και κατανεμημένος SCP .....	120
Εικόνα 81: Ενσωματωμένο Service mesh-based SCP .....	121
Εικόνα 82: Αρχιτεκτονική open5GS .....	125
Εικόνα 83: Τα Pods του open5GS και UERANSIM Kubernetes applications .....	137
Εικόνα 84: Περιγραφή HTTP 500 από το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 29.510 .....	139
Εικόνα 85: Λειτουργία NFStatusSubscribe της υπηρεσίας Nnrf_NFManagement.....	139
Εικόνα 86: Σύνδεση RRC μεταξύ τερματικού UE και σταθμού βάσης .....	142
Εικόνα 87: Διαδικασία NAS Registration από την οπτική του 5GC.....	142
Εικόνα 88: Επιλογή της AUSF μέσω επικεφαλίδας 3gpp-sbi-target-apiroot HTTP .....	143
Εικόνα 89: Μεταφορά του 5G Authentication Vector μέσα στο 5GC .....	143
Εικόνα 90: Διαδικασία NAS Authentication και ενημέρωση της AUSF .....	143
Εικόνα 91: Επιτυχής ενημέρωση από τη AMF για την ταυτοποίηση του συνδρομητή. 143	
Εικόνα 92: Διαδικασία NAS Security mode control .....	144
Εικόνα 93: Επικοινωνία μεταξύ της AMF και της UDM .....	144
Εικόνα 94: Ολοκλήρωση διαδικασίας NAS registration με το 5GC .....	144
Εικόνα 95: Εκκίνηση από το τερματικό UE για την ενεργοποίηση της συνεδρίας PDU145	
Εικόνα 96: Επικοινωνία μεταξύ της AMF και της SMF .....	145
Εικόνα 97: Η SMF στέλνει τα μηνύματα N1 N2 προς την AMF.....	145
Εικόνα 98: Μεταφορά μηνυμάτων από τη SMF διαμέσου της AMF προς N1 και N2... 146	
Εικόνα 99: Fault injection όπως παρατηρήθηκε στο Wireshark.....	146
Εικόνα 100: Έλεγχος αποκοπής κίνησης από το καταγραφικό του AMF Pod .....	147
Εικόνα 101: Διαδικασία Service Discovery από το SCP Pod.....	147
Εικόνα 102: Απάντηση από τη NRF προς το SCP Pod .....	147

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Συσχέτιση έννοιας Registration Area με περιοχή TA, RA και LA .....	57
Πίνακας 2: Διαθέσιμες τιμές SST από το 3GPP TS 23.501 .....	95
Πίνακας 3: Σύνολο διαθέσιμων μετρικών Istio .....	113
Πίνακας 4: Σύγκριση χρήσης πόρων μνήμης και επεξεργαστή.....	117
Πίνακας 5: Συνδρομές των οντοτήτων του Open5GS στη NRF .....	137

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς» εκπονήθηκε από τον Μάρτιο του 2024 ως τον Οκτώβριο του 2024. Τα κριτήρια επιλογής του συγκεκριμένου θέματος βασίστηκαν στο έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον γύρω από την έμμεση επικοινωνία μέσω service mesh στο CN (Core Network) της νέας αρχιτεκτονικής της 6<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών (6G).

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα που με βοήθησαν στον Πανεπιστημιακό χώρο, καθώς και έξω από αυτόν, ο καθένας με τις δικές του συμβουλές και παρεμβάσεις.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα επίσης να απευθύνω ιδιαίτερες ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Νικόλαο Πασσά καθώς και στον κ. Δημήτριο Τσόλκα για την βοήθεια, την εμπιστοσύνη και την καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, οι οποίοι, με στήριξαν στις σπουδές μου μέχρι σήμερα παρέχοντάς μου αμέριστη συμπαράσταση όποτε την χρειαζόμουν.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κινητή τηλεφωνία έχει αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο επικοινωνούμε στη σημερινή ημέρα. Τεχνολογίες όπως το Global System for Mobile Communications<sup>1</sup> σε συνδυασμό με το General Packet Radio Service<sup>2</sup>, το Universal Mobile Telecommunications System<sup>3</sup>, το Long Term Evolution<sup>4</sup> και πιο πρόσφατα τα δίκτυα 5<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών<sup>5</sup> (5<sup>th</sup> generation networks), αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο αυτής της δυνατότητας. Αν και γενικότερα οι ασύρματες μεταδόσεις έχουν εμφανιστεί εδώ και πολλές δεκαετίες, εντούτοις η απήχηση που είχε το GSM, το πρώτο ψηφιακό δίκτυο κινητής την δεκαετία του 1990 καθώς και η καθολική του αποδοχή από κυβερνητικούς οργανισμούς και φορείς κινητής τηλεφωνίας μπορεί να θεωρηθεί το πρώτο ορόσημο για την κινητή τηλεφωνία όπως την γνωρίζουμε στις μέρες μας.

Ξεκινώντας μία ανασκόπηση μέχρι την εμφάνιση του GSM, τα πρώτα δίκτυα κινητών επικοινωνιών μπορούν να θεωρηθούν ως ο προπομπός των κυψελοειδών δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Οι συνδρομητές τους ήταν συγκεκριμένες ομάδες όπως κυβερνητικές και κρατικές υπηρεσίες, επιχειρήσεις, διασημότητες, δημοσιογράφοι κ.α. Η διαθέσιμη υπηρεσία επικοινωνίας αυτών των δικτύων ήταν οι φωνητικές κλήσεις, στην πιο βασική μορφή τους. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται ως γενιά μηδέν<sup>6</sup> (zero generation networks).

Η έννοια των δικτύων κινητής χρησιμοποιώντας κυψέλες εξερευνήθηκε για πρώτη φορά στα Bell Laboratories της American Telephone and Telegraph<sup>7</sup> τη δεκαετία του 1950. Όπως και παλαιότερα, αναπτύχθηκαν πολλά διαφορετικά συστήματα ανά χώρα, τα οποία ήταν ασύμβατα μεταξύ τους. Για αυτόν τον λόγο, ένα κύριο μειονέκτημά τους ήταν η έλλειψη ενός καθολικά αποδεκτού συστήματος. Το κάθε δίκτυο επεκτεινόταν μέχρι τα όρια της χώρας με τους συνδρομητές του ενός συστήματος να μην μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα άλλο, οπότε η έννοια της περιαγωγής ήταν σχεδόν ανύπαρκτη, εκτός από τις Βόρειες χώρες στις οποίες εφαρμόστηκε η δυνατότητα περιαγωγής μεταξύ τους. Η μικρή αυτή χωρητικότητα των δικτύων 1<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών<sup>8</sup> (1<sup>st</sup> generation networks), σε συνδυασμό με την ασυμβατότητα των συστημάτων μεταξύ τους, καθώς και η ανάγκη για βελτίωση της ασφάλειας των επικοινωνιών εξαιτίας της αναλογικής μετάδοσης, οδήγησαν στην πλήρως ψηφιακή εξέλιξη των δικτύων ως κυψελοειδή.

---

<sup>1</sup> Στο εξής: GSM

<sup>2</sup> Στο εξής: GPRS

<sup>3</sup> Στο εξής: UMTS

<sup>4</sup> Στο εξής: LTE

<sup>5</sup> Στο εξής: 5G

<sup>6</sup> Στο εξής: 0G

<sup>7</sup> Στο εξής: AT&T

<sup>8</sup> Στο εξής: 1G

Μία βασική διαφορά των δικτύων 2<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών<sup>9</sup> (2<sup>nd</sup> generation networks) σε άμεση σύγκριση με τη 1G είναι το γεγονός ότι πλέον, εκτός από την σηματοδότηση που είχε μετατραπεί ήδη σε ψηφιακή, και η μετάδοση της φωνής πραγματοποιείται με ψηφιακό τρόπο. Χρησιμοποιούνται δηλαδή ψηφιακά σήματα μετάδοσης για την επικοινωνία των χρηστών του δικτύου. Ως φυσικό επακόλουθο αυτής της αλλαγής, έχουμε την βελτίωση στην ποιότητα των κλήσεων, δεδομένου ότι ο ήχος της κλήσης δεν επηρεάζεται άμεσα από τις παρεμβολές στο μέσο. Η ανάπτυξη των δικτύων κινητής άρχισε να επεκτείνεται πλέον εκτός ορίων κάθε χώρας και έτσι αναπτύχθηκαν συστήματα που μπορούσαν να είναι συμβατά μεταξύ τους και να υπάρχει δυνατότητα περιαγωγής. Συνεπώς, ο συνολικός αριθμός των διαφορετικών συστημάτων κινητής που αναπτύχθηκαν ήταν μικρότερος από ότι στην 1G.

Καθώς η διάδοση της κινητής μετά την εμφάνιση των δικτύων 2G ήταν ταχύτατη, ο αριθμός των συνδρομητών αυξανόταν πάρα πολύ γρήγορα και η ζήτηση παρέμενε μεγάλη, η ανάπτυξη των νέων δικτύων 3<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών<sup>10</sup> (3<sup>rd</sup> generation networks) ξεκίνησε πολύ νωρίς. Στην Ιαπωνία, η Nippon Telegraph and Telephone<sup>11</sup> πίεζε για την γρήγορη μετάβαση στη 3G, η οποία άρχισε να εμφανίζεται στις αρχές του 2000, μετά από σχεδόν μια δεκαετία στην φάση ανάπτυξης. Το πιο γνωστό δίκτυο στη 3G είναι το UMTS, όπου πλέον πέρα από τις φωνητικές κλήσεις και τα μηνύματα, προωθήθηκε και η κατανάλωση πολυμεσικού περιεχομένου καθώς και οι κλήσεις μέσω βίντεο.

Από το 2007, η ραγδαία ανάπτυξη της μεταφοράς δεδομένων σε σχέση με τις φωνητικές κλήσεις οφείλεται κυρίως στην εμφάνιση του iPhone, καθώς και αντίστοιχων κινητών με λειτουργικό Android, τα γνωστά και ως έξυπνα κινητά. Με αυτού του νέου τύπου συσκευών ήταν δυνατή η αξιοποίηση πιο εξελιγμένων εφαρμογών, οι οποίες χρησιμοποιούσαν όλο και περισσότερο όγκο δεδομένων για τη λειτουργία τους. Σε σχέση με παλαιότερα, ήταν πολύ πιο εύχρηστες για τον τελικό χρήστη και καλύτερες από οποιαδήποτε προηγούμενη υλοποίηση είχε γίνει στα υπάρχοντα κινητά. Συνεπώς, η εμφάνιση των δικτύων 4<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών<sup>12</sup> (4<sup>th</sup> generation networks) ξεκίνησε το 2008, με σκοπό την επαρκή κάλυψη της νέας τάσης κατανάλωσης δεδομένων. Από το 2010 και μετέπειτα, με την ύπαρξη της 4G και των έξυπνων κινητών, η κατανάλωση δεδομένων γνώρισε εκθετική αύξηση.

Με τις ανάγκες των χρηστών των δικτύων κινητής να είναι ολοένα και πιο αυξημένες όσον αφορά τον όγκο των δεδομένων εξαιτίας και του νέου τύπου συσκευών, σε συνδυασμό με τις πλατφόρμες παροχής ροών βίντεο και ταινιών, η ανάπτυξη του διαδόχου της 4G δεν άργησε να υλοποιηθεί. Η επίσημη ονομασία που επιλέχθηκε ήταν 5G. Μέχρι και τη 4G η συσκευή των συνδρομητών ήταν το κινητό, όμως πλέον στη 5G δεν θα υπάρχει μόνο ένας τύπος συσκευής, αλλά πολλές διαφορετικού τύπου όπως συνδεδεμένα αυτοκίνητα, ρομπότ, μετρητές, μηχανήματα σε εργοστάσια, έξυπνα ρολόγια, οικιακές συσκευές, ιατρικά μηχανήματα, κ.α.

---

<sup>9</sup> Στο εξής: 2G

<sup>10</sup> Στο εξής: 3G

<sup>11</sup> Στο εξής: NTT

<sup>12</sup> Στο εξής: 4G

Αυτό θα οδηγήσει σε πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών με κυριότερες περιπτώσεις χρήσης για το 5G να είναι η παροχή ροών βίντεο και ταινιών υπερύψηλης ποιότητας, καθώς επίσης η επαυξημένη πραγματικότητα<sup>13</sup> (augmented reality) και η εικονική πραγματικότητα<sup>14</sup> (virtual reality). Η έλευση της 5G άλλαξε και την αρχιτεκτονική του Δίκτυου-πυρήνα (Core Network), όπου πλέον έχουν ανακύψει ζητήματα για την διαχείριση του αυξημένου φόρτου σηματοδοσίας στα πλαίσια αυτής της οριζόντιας αρχιτεκτονικής. Η ενοποιημένη δρομολόγηση των αιτημάτων και των απαντήσεων, η κατανομή του φόρτου και η δυνατότητα μηχανισμών αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρεία είναι πιο αναγκαία από ποτέ. Επιπρόσθετα, η παρατήρηση της σηματοδοσίας είναι επιθυμητή για λόγους ελέγχου και διασφάλισης των προτεραιοτήτων και της ποιότητας της σηματοδοσίας. Το πρώτο βήμα για την διασφάλιση της απρόσκοπτης λειτουργίας της σηματοδοσίας έγινε με την εμφάνιση του Service Communication Proxy<sup>15</sup> και της αντικατάστασης του άμεσου τρόπου επικοινωνίας (direct communication) από τον έμμεσο τρόπο επικοινωνίας (indirect communication). Για την περαιτέρω εξέλιξη όμως, έχει προταθεί η χρήση των λειτουργιών και δυνατοτήτων του SCP στα πλαίσια μίας καταναεμημένης διαχείρισης υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) για την επικοινωνία μεταξύ των λειτουργικών οντοτήτων (Network Functions) στην εξέλιξη του Core Network στη 6G.

Στην παρούσα διπλωματική, μελετώνται διεξοδικά οι παραπάνω τεχνολογίες και τα χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου επικοινωνίας μεταξύ των Network Functions στο Core Network. Σε πειραματικό στάδιο, χρησιμοποιείται το Open5GS και το UERANSIM, τα οποία εγκαθίστανται σε μία συστάδα (cluster) Kubernetes, η οποία επεκτάθηκε με την χρήση του Istio για την δημιουργία μίας service mesh υλοποίησης.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία ανασκόπηση της ιστορίας των δικτύων κινητής, και πιο συγκεκριμένα στις γενιές 0G, 1G, 2G και 3G, καθώς και των κύριων γνωρισμάτων κάθε γενιάς, με τις σημαντικότερες τεχνολογίες να περιγράφονται.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται τα βασικά στοιχεία και χαρακτηριστικά του κυριότερου εκπροσώπου της 4G, που είναι το Evolved Packet System<sup>16</sup>. Αντίστοιχα, στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται περιγραφή του 5G System<sup>17</sup> καθώς και του 5G Advanced και της τρέχουσας έρευνας και ανάπτυξης για τον διάδοχό του, τα δίκτυα 6<sup>ης</sup> γενιάς επικοινωνιών<sup>18</sup> (6<sup>th</sup> generation networks).

Το κεφάλαιο 5 καταπιάνεται με τα μοντέλα επικοινωνίας στο 5G Core<sup>19</sup>, και τη χρήση του service mesh στα πλαίσια του Core Network. Στο κεφάλαιο 6 περιγράφεται το Open5GS, το UERANSIM και το Istio, ενώ παρουσιάζονται αναλυτικές πληροφορίες για τους τρόπους εγκαθίδρυσής και ρύθμισής τους. Δημιουργείται έτσι μία πειραματική

---

<sup>13</sup> Στο εξής: AR

<sup>14</sup> Στο εξής: VR

<sup>15</sup> Στο εξής: SCP

<sup>16</sup> Στο εξής: EPS

<sup>17</sup> Στο εξής: 5GS

<sup>18</sup> Στο εξής: 6G

<sup>19</sup> Στο εξής: 5GC

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

διάταξη δοκιμών και εξάγονται τα αποτελέσματα και συμπεράσματα για την χρήση του service mesh ως βασικό κομμάτι του SCP.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται μια σύντομη ανασκόπηση των προηγούμενων κεφαλαίων, καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν τόσο από τη θεωρητική όσο και από την πρακτική έρευνα και σημειώνονται βελτιώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν μελλοντικά για την χρήση του service mesh στη 6G.

## 2. Ιστορική αναδρομή και τεχνικό υπόβαθρο

### 2.1 Πρωτόλειο σύστημα Zero-Generation

Τα πρώτα δίκτυα την λεγόμενη γενιάς μηδέν - 0G [1] πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940, μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, και διαφέρουν αρκετά από τα σημερινά σύγχρονα κυψελοειδή δίκτυα, τόσο στον τρόπο χρήσης τους όσο και στο πλήθος των χρηστών που εξυπηρετούσαν.

Θεωρούνται μεν ο προπομπός των κυψελοειδών δικτύων κινητής, αλλά όχι κομμάτι της ιστορίας τους, και ο λόγος για αυτό είναι στην ουσία και το βασικό τους χαρακτηριστικό γνώρισμα. Η αρχιτεκτονική τους βασίζεται σε αυτόνομες, μη επικαλυπτόμενες γεωγραφικές περιοχές μετάδοσης και λήψης. Καθεμία από αυτές τις περιοχές είχε ως επί το πλείστον ένα σταθμό βάσης με έναν μεγάλο ενισχυτή ισχύος, ο οποίος εξυπηρετούσε τους χρήστες της εκάστοτε περιοχής. Κάθε τέτοια περιοχή κάλυπτε μία μεγάλη γεωγραφική έκταση, σε αντίθεση με ένα κυψελοειδή δίκτυο, όπου κάθε περιοχή της κυψέλης είναι αρκετά μικρότερη. Το βασικό μειονέκτημα αυτού του τρόπου ανάπτυξης ενός δικτύου κινητής ήταν η αδυναμία της κινητικότητας των συνδρομητών από μία γεωγραφική περιοχή σε μία άλλη, καθώς και η μη υποστήριξη οποιασδήποτε μορφής περιαγωγής. Η κλήση μπορούσε να διατηρηθεί μόνο για όσο το κινητό τερματικό ήταν στην κάλυψη του σταθμού βάσης στην ευρύτερη περιοχή. Ακόμη, ο μικρός αριθμός ενεργών συνδρομητών σε μία μεγάλη περιοχή, λόγω του γεγονότος ότι κάθε κλήση καταλάμβανε ένα ολόκληρο κανάλι από τα λίγα που υπήρχαν, οδηγούσε συχνά στην συμφόρηση του δικτύου.

Όπως είναι φυσικό, λόγω της διαθέσιμης τεχνολογίας την περίοδο που αναπτύχθηκαν, όλα αυτά τα δίκτυα βασίζονταν στον αναλογικό τρόπο μετάδοσης, σε αντίθεση με τα σημερινά πλήρως ψηφιακά δίκτυα και ως φυσικό επακόλουθο ήταν επιρρεπή στις παρεμβολές από άλλα τερματικά που ήταν ποιο κοντά στον σταθμό βάσης και το σήμα των οποίων ήταν ισχυρότερο και καταλάμβανε το κανάλι. Ακόμη, η υποκλοπή των συνομιλιών ήταν εύκολη και συχνή, χωρίς να υπάρχει οποιαδήποτε είδους προστασία της ιδιωτικότητας των χρηστών.

Η πρώτη δοκιμαστική εξ αποστάσεως κλήση από ένα από τα πρώτα δίκτυα 0G έγινε στις 17 Ιουνίου του 1946 μέσα από ένα αυτοκίνητο. Το εν λόγω σύστημα βρισκόταν στην φάση ανάπτυξης για πάνω από μία δεκαετία από τους Alton Dickieson και D. Mitchell, μέλη του ερευνητικού τμήματος Bell Labs της AT&T, και του H. I. Romnes από το τμήμα ανάπτυξης Western Electric της AT&T. Εγκαινιάστηκε από την Southwestern Bell, που ήταν μία εκ των εταιριών που ανήκαν στην AT&T [2].

Άλλα παρεμφερή συστήματα κινητών επικοινωνιών ήταν το Advanced Mobile Telephone System<sup>20</sup>, το Offentlig Landmobil Telefoni<sup>21</sup> στην Νορβηγία στα τέλη της δεκαετίας του 1960, το Mobile Telephony system D<sup>22</sup> στην Σουηδία στις αρχές της δεκαετίας του 1970, το Altai στην Σοβιετική ένωση, το AMR radiotelephone network, το Autoradioruhelin στην Φινλανδία από το 1971 και το B-Netz στην Γερμανία. Αξίζει να αναφερθεί πως κάποια από αυτά τα συστήματα συναντώνται στην βιβλιογραφία ως

---

<sup>20</sup> Στο εξής: AMTS

<sup>21</sup> Στο εξής: OLT

<sup>22</sup> Στο εξής: MTD

0.5G, λόγω βελτιωμένων χαρακτηριστικών από τους προκατόχους τους, όπως το ARP και το B-Netz που αναφέρθηκαν.

Όλα αυτά τα δίκτυα λειτουργούσαν στην ζώνη συχνοτήτων των υπερβραχέων κυμάτων<sup>23</sup> (very high frequency) και πάρα πολύ υψηλών συχνοτήτων<sup>24</sup> (ultra high frequency), και η επικοινωνία ήταν ως επί το πλείστον ημι-αμφίδρομη και πιο συγκεκριμένα, για να μιλήσει ο κάθε συνδρομητής, πίεζε το κατάλληλο κουμπί στην κινητή συσκευή και έτσι αξιοποιούσε το διαθέσιμο κανάλι, ενώ για να ακούσει έπρεπε να απελευθερώσει το εν λόγω κουμπί. Συνεπώς ήταν ένα σύστημα διακόπτη ομιλίας (Push-to-Talk).

Ο αριθμός των συνδρομητών ήταν περιορισμένος, με μέγιστο τις δεκάδες χιλιάδες. Προσμετρώντας επίσης την έλλειψη κινητικότητας και περιαγωγής, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα κινητά τερματικά ήταν πάρα πολύ ακριβά καθώς και πολύ μεγάλα σε όγκο και βάρος, καθιστώντας τα δύσκολα για οποιαδήποτε φορητή χρήση πέρα από την εγκατάσταση και χρήση τους σε ένα αυτοκίνητο, αυτό οδήγησε στην αναζήτηση ενός νέου τρόπου πραγματοποίησης των κινητών επικοινωνιών.

## 2.2 Δίκτυα πρώτης γενιάς - 1G

Ο W. Rae Young και ο Donald H. Ring ανέπτυξαν την ιδέα ενός κυψελωτού δικτύου [2][3] με πολλαπλούς σταθμούς βάσης σκορπισμένους στις περιοχές και τους αυτοκινητόδρομους. Σε αντίθεση με τη 0G, που είχε ως κύριο γνώρισμα τις αυτόνομες, μη επικαλυπτόμενες γεωγραφικές περιοχές, κάθε τέτοιος σταθμός κάλυπτε μία πιο μικρή περιοχή, που ονομαζόταν κυψέλη, και έτσι εξοπλίζονταν με πομποδέκτες μικρότερης ισχύος. Σε γειτονικές κυψέλες γινόταν χρήση διαφορετικών συχνοτήτων, και υποστηριζόταν η κινητικότητα από μία κυψέλη σε μία άλλη, μία διαδικασία η οποία ονομάζεται μεταπομπή. Με αυτόν τον τρόπο υποστηρίχθηκε η κινητικότητα των συνδρομητών σε όλη την περιοχή κάλυψης του δικτύου. Πιο αναλυτικά, στην ύπαιθρο οι κυψέλες είχαν μεγαλύτερη ακτίνα κάλυψης αλλά μικρότερη χωρητικότητα, αξιοποιώντας χαμηλότερο φάσμα συχνοτήτων, ενώ στις πόλεις και τις περιοχές με υψηλή πυκνότητα πληθυσμού, η ακτίνα κάλυψης ήταν μικρότερη αλλά παρείχε μεγαλύτερη χωρητικότητα συνδρομητών, με την αξιοποίηση υψηλότερων συχνοτήτων. Η διαθέσιμη τεχνολογία εκείνης της εποχής όμως καθώς και το περιορισμένο φάσμα συχνοτήτων καθιστούσε αδύνατη την εμπορική του υλοποίηση.

Η αρχή έγινε τελικά το 1973. Πιο συγκεκριμένα, στις 3 Απριλίου του 1973 πραγματοποιήθηκε η πρώτη κλήση από τον Martin Cooper [3] της Motorola μέσω ενός πιλοτικού κυψελωτού δικτύου. Το κινητό τερματικό ήταν το Dynamic Adaptive Total Area Coverage<sup>25</sup>, ένα πρωτότυπο κινητό τερματικό το οποίο εμφανίστηκε το 1983 στην εμπορική του μορφή ως το Motorola DynaTAC 8000x. Όλες αυτές οι προσπάθειες, από τα Bell Labs και την Motorola, οδήγησαν στην εγκαθίδρυση του συστήματος στο Σικάγο το 1979, το γνωστό ως Advanced Mobile Phone System<sup>26</sup>. Επίσημα άρχισε να διατίθεται εμπορικά το 1983.

---

<sup>23</sup> Στο εξής: VHF

<sup>24</sup> Στο εξής: UHF

<sup>25</sup> Στο εξής: DynaTAC

<sup>26</sup> Στο εξής: AMPS

Το πρώτο όμως εμπορικά διαθέσιμο σύστημα κυψελοειδών δικτύων ξεκίνησε το 1979 στην Ιαπωνία, βασιζόμενο στην τεχνολογία του AMPS. Η NTT παρουσίασε το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο δίκτυο 1G, ξεκινώντας αρχικά από το Τόκυο, με το κινητό τερματικό να είναι κατασκευασμένο από την Panasonic και το σύστημα να χρησιμοποιεί φάσμα συχνοτήτων στα 800 μεγαχέρτζ<sup>27</sup> (megahertz), με το κάθε κανάλι να έχει εύρος φάσματος στα 25 κιλοχέρτζ<sup>28</sup> (kilohertz). Η ονομασία του ήταν Mobile Cellular System<sup>29</sup>, γνωστό και ως MCS-L1. Το 1988 εμφανίστηκε μία βελτιωμένη έκδοσή του, το MCS-L2, μειώνοντας το εύρος ζώνης του καναλιού στο μισό από ότι στο MCS-L2, δηλαδή από τα 25 στα 12,5 kHz, διπλασιάζοντας έτσι την χωρητικότητα σε πλήθος συνδρομητών στο ίδιο εύρος φάσματος.

Το αμέσως επόμενο ήταν το Nordic Mobile Telephony<sup>30</sup>, που άρχισε να διατίθεται από το 1981, αρχικά στην Σουηδία και την Νορβηγία και από το 1982 στην Δανία και Φινλανδία, αντικαθιστώντας τα αντίστοιχα συστήματα όπως το ARP στην Φινλανδία, το MTD στην Σουηδία και Δανία και το OLT στην Νορβηγία. Όπως και στη 0G, έτσι και σε αυτή την γενιά οι Σκανδιναβικές χώρες ήταν από τους πρωτοπόρους στον τομέα των κινητών επικοινωνιών. Άλλα παρεμφερή κυψελοειδή δίκτυα αυτής της γενιάς που εμφανίστηκαν το 1985 ήταν το Total Access Communication System<sup>31</sup> στο Ηνωμένο Βασίλειο, και το C-450 στην Γερμανία. Από το 1986 έχουμε και το Radiocom 2000 στην Γαλλία.

Τα δίκτυα 1G, όπως και στη 0G, βασίζονταν σε αναλογικές μεθόδους και τεχνικές μετάδοσης της φωνής, η σηματοδότηση όμως είχε αναβαθμιστεί σε ψηφιακή σε ορισμένα εξ αυτών. Η ιδιωτικότητα των συνομιλιών ήταν και πάλι αδύνατη στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, αν και υπήρξαν κάποιες τεχνικές για την αποφυγή της υποκλοπής συνομιλιών. Επιπρόσθετα, η διασφάλιση της ταυτότητας του συνδρομητή ήταν δύσκολη. Η συνολική χωρητικότητα τους ήταν μικρή, καθώς ένα κανάλι αξιοποιούνταν από μία μόνο κλήση, αλλά βελτιωμένη σε σχέση με τα προηγούμενα κινητά δίκτυα λόγω της επαναχρησιμοποίησης συχνοτήτων μεταξύ των κυψελών. Και πάλι όμως δεν είχαν σχεδιαστεί με γνώμονα την ταχεία ανάπτυξη και διάδοση της κινητής τηλεφωνίας, και έτσι δεν μπορούσαν να εξυπηρετήσουν το σύνολο των απαιτούμενων συνδρομητών. Τα περισσότερα από τα δίκτυα που χαρακτηρίζονται ως 1G αποσύρθηκαν γύρω στο 2000, και το φάσμα τους παραχωρήθηκε για τις νεότερες κινητές τεχνολογίες, στις οποίες θα αναφερθούμε στην συνέχεια.

### 2.3 Δίκτυα δεύτερης γενιάς - 2G

Η ανάπτυξη των δικτύων κινητής σε αυτή την γενιά δεν περιορίστηκε στα πλαίσια μίας χώρας και για αυτό τον λόγο ο αριθμός των συστημάτων που ανήκουν στη 2G ήταν μικρότερος από την 1G, καθώς πλέον η ανάπτυξή τους στηριζόταν σε πολλές χώρες.

---

<sup>27</sup> Στο εξής: MHz

<sup>28</sup> Στο εξής: kHz

<sup>29</sup> Στο εξής: MCS

<sup>30</sup> Στο εξής: NMT

<sup>31</sup> Στο εξής: TACS

Το Digital Advanced Mobile Phone System<sup>32</sup> είναι η εξέλιξη του AMPS δικτύου 1G. Το Personal Digital Cellular<sup>33</sup>, είναι το «ιαπωνικό» δίκτυο 2G, το οποίο αρχικά ήταν γνωστό ως Japanese Digital Cellular<sup>34</sup>. Το integrated Dispatch Enhanced Network<sup>35</sup> αναπτύχθηκε από την Motorola και παρείχε υπηρεσίες φωνής, δεδομένων και Push-To-Talk. Ακόμη ένα δίκτυο 2G είναι το cdmaOne το οποίο ξεκίνησε από την Αμερική και πιο συγκεκριμένα από την Qualcomm. Είναι το μοναδικό δίκτυο 2G που δεν απαιτούσε την επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων καθώς οι γειτονικές κυψέλες μπορούσαν να έχουν τις ίδιες συχνότητες. Αυτό έδινε την δυνατότητα της ταυτόχρονης σύνδεσης και επικοινωνίας με δύο σταθμούς βάσης από το κινητό τερματικό για πιο ομαλή μεταπομπή. Το πρώτο cdmaOne δίκτυο ξεκίνησε την λειτουργία του στο Hong Kong το 1995. Οι επόμενες εκδόσεις ήταν το Interim Standard 95A<sup>36</sup> και Interim Standard 95B<sup>37</sup>, και εν συνεχεία το Single-Carrier Radio Transmission Technology<sup>38</sup>, το οποίο ανήκει στην οικογένεια δικτύων 3G.

### 2.3.1 Το σύστημα GSM

Το σύστημα GSM, το οποίο ξεκίνησε στην Ευρώπη αρχικά με την ονομασία Groupe Spécial Mobile, θεωρείται το πιο πετυχημένο δίκτυο 2G και χρησιμοποιείται ακόμη στις μέρες μας. Είναι το σύστημα με την μεγαλύτερη πληθυσμιακή κάλυψη, και αναπτύχθηκε την δεκαετία του 1990 από τον οργανισμό European Telecommunication Standards Institute<sup>39</sup> και προορίστηκε αρχικά για χρήση στην Ευρώπη. Διαδόθηκε εν συνεχεία σε όλον τον κόσμο με εξαίρεση την Ιαπωνία, και αποτέλεσε το πρώτο καθολικό σύστημα κινητών επικοινωνιών, όπου έχουμε παγκόσμια περιαγωγή των χρηστών. Το GSM περιγράφεται από ένα μεγάλο πλήθος τεχνικών εγγράφων και προδιαγραφών, που περιγράφουν αναλυτικά κάθε πτυχή του συστήματος. Στις μέρες μας αυτά τα τεχνικά έγγραφα υποστηρίζονται και αναπτύσσονται από την κοινοπραξία 3rd Generation Partnership Project<sup>40</sup>.

Το σύστημα GSM άρχισε να σχεδιάζεται το 1983 ως ένα δίκτυο κυκλωματομεταγωγής, παρόμοιο με την σταθερή τηλεφωνία. Για αυτό τον λόγο, πολλές από τις υπάρχουσες τεχνολογίες που υπήρχαν εκείνη την εποχή αξιοποιήθηκαν αυτούσιες ή με μικρές αλλαγές, όπως για παράδειγμα τα κέντρα μεταγωγής, και τα συστήματα μετάδοσης

---

<sup>32</sup> Στο εξής: D-AMPS

<sup>33</sup> Στο εξής: PDC

<sup>34</sup> Στο εξής: JDC

<sup>35</sup> Στο εξής: iDEN

<sup>36</sup> Στο εξής: IS-95A

<sup>37</sup> Στο εξής: IS-95B

<sup>38</sup> Στο εξής: 1xRTT

<sup>39</sup> Στο εξής: ETSI

<sup>40</sup> Στο εξής: 3GPP



πληροφορίας, όπως ο Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς<sup>41</sup> (Asynchronous Transfer Mode) κ.α.

Λόγω του σχεδιασμού του ως ένα δίκτυο κυκλωματομεταγωγής, το GSM πραγματοποιεί στην αρχή κάθε κλήσης κατανομή των πόρων και εγκαθίδρυση των μονοπατιών από άκρο σε άκρο για την σύνδεση δύο απομακρυσμένων σημείων, ακριβώς όπως στην σταθερή τηλεφωνία. Η ουσιώδης διαφορά όμως είναι ότι το GSM έπρεπε να υποστηρίξει την κινητικότητα των συνδρομητών και έτσι υπήρξε η ανάγκη για την εξέλιξη των κλασικών κέντρων μεταγωγής (switching centers) με νέα χαρακτηριστικά.

Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε το Mobile Switching Center<sup>42</sup>, καθώς υπήρξε η ανάγκη για την διαχείριση της κινητικότητας των συνδρομητών και η δυνατότητα δυναμικής δρομολόγησης στα πλαίσια του MSC. Στην πραγματικότητα, λόγω των μικρών διαφορών ενός κέντρου MSC και ενός κλασικού κέντρου μεταγωγής, οι κατασκευαστές είχαν μόνο ένα κέντρο που ήταν τόσο για το GSM όσο και για σταθερή τηλεφωνία. Επιπρόσθετα, το πρωτόκολλο σηματοδότησης που χρησιμοποιούνταν στην σταθερή, το Signaling System 7<sup>43</sup>, χρησιμοποιήθηκε και αυτό στο GSM.

Το σύστημα GSM είναι ένα πλήρως ψηφιακό δίκτυο, διευκολύνοντας την χρήση κρυπτογραφικών μεθόδων και με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται το αδιάβλητο και η ιδιωτικότητα των επικοινωνιών. Η ψηφιοποίηση αυτή καθιστούσε επίσης πιο εύκολη την αξιοποίηση πιο περίπλοκων τεχνικών πολυπλεξίας χρόνου καθώς και συχνοτήτων για την πρόσβαση στο μέσο και κατ' επέκταση την υποστήριξη μεγαλύτερου αριθμού συνδρομητών, με την δυνατότητα αξιοποίησης ενός καναλιού από πολλούς συνδρομητές ταυτόχρονα.

Η πρώτη μορφή του συστήματος GSM χρησιμοποιούσε συχνότητες στα 900 MHz. Μετέπειτα, στην Αμερική χρησιμοποιήθηκε φάσμα στα 850 και 1900 MHz, και στην Ευρώπη στα 1800 MHz. Δεσμεύτηκε επίσης και φάσμα στα 450 MHz για την αντικατάσταση του NMT-450, αλλά δεν γνώρισε ευρεία διάδοση. Το πρώτο GSM δίκτυο εγκαινιάστηκε στην Φινλανδία το 1991.

Ένα δίκτυο κινητής GSM απαρτίζεται από τα κάτωθι υποσυστήματα [4][5]:

- Mobile Station<sup>44</sup>, που είναι η κινητή συσκευή - τερματικό με την οποία συνδέεται ο χρήστης με το δίκτυο κινητής GSM,
- Base-Station Subsystem<sup>45</sup>, το οποίο είναι το σύνολο των κυψελοειδών σταθμών βάσης μαζί με τους ελεγκτές τους.
- Network and Switching Subsystem<sup>46</sup>, το οποίο είναι το δίκτυο όπου μέσω αυτού πραγματοποιείται η σύνδεση με άλλα δίκτυα, όπως το σταθερό τηλεφωνικό δίκτυο κ.α.

---

<sup>41</sup> Στο εξής: ATM

<sup>42</sup> Στο εξής: MSC

<sup>43</sup> Στο εξής: SS7

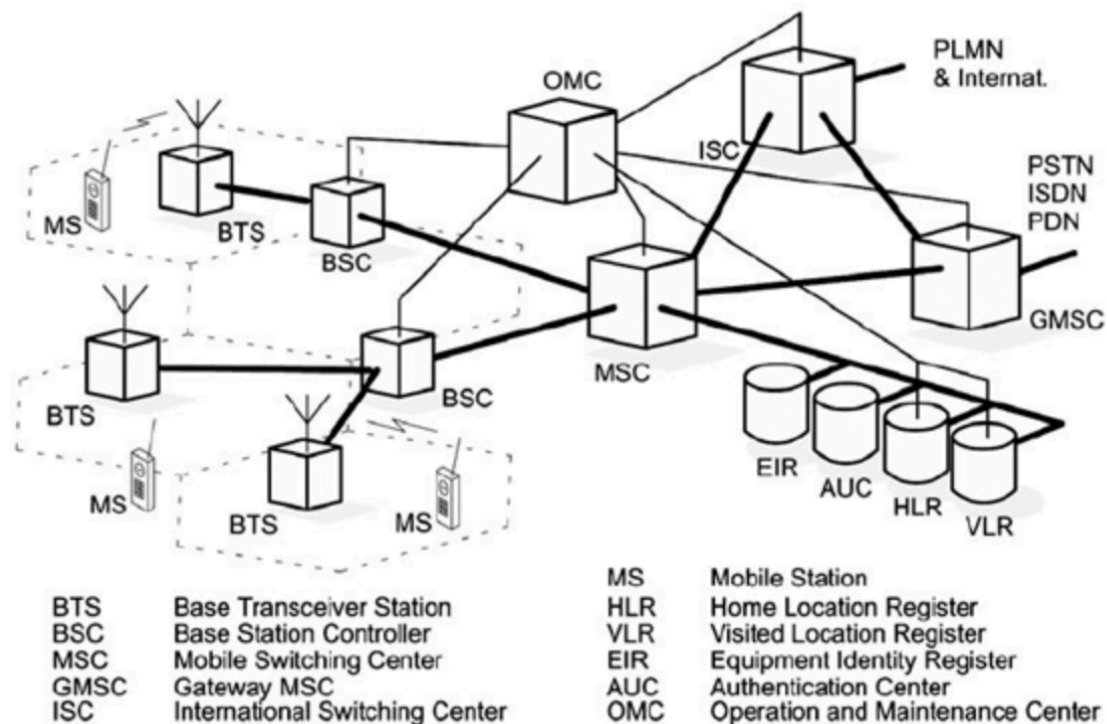
<sup>44</sup> Στο εξής: MS

<sup>45</sup> Στο εξής: BSS

<sup>46</sup> Στο εξής: NSS

- Operation and Support Subsystem<sup>47</sup>, όπου υπάρχουν συστήματα που βοηθούν την λειτουργία ενός δικτύου κινητής, όπως π.χ. συστήματα χρέωσης κ.α.

Ένα δίκτυο κινητής βασισμένο στο GSM και το οποίο λειτουργεί ένας φορέας κινητής τηλεφωνίας στα γεωγραφικά πλαίσια μίας χώρας, ονομάζεται Public Land Mobile Network<sup>48</sup>. Κάθε PLMN χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές οι οποίες αναλογούν σε ένα MSC. Κάθε περιοχή ενός MSC χωρίζεται σε επιμέρους περιοχές, με την ονομασία Location Area<sup>49</sup>. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι ένα σταθμός βάσης μπορεί να διαχειριστεί παραπάνω από μία περιοχή LA. Εν συνεχεία, η μικρότερη μονάδα περιοχής είναι η κυψέλη.



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική συστήματος GSM

Το MS απαρτίζεται από το Mobile Equipment<sup>50</sup> και το Subscriber Identity Module<sup>51</sup> [6]. Το ME είναι ουσιαστικά η κινητή συσκευή. Για να συνδεθεί ο συνδρομητής με τη συσκευή ME στο δίκτυο θα πρέπει να έχει την SIM, που είναι πρακτικά μια προσωποποιημένη κάρτα που περιέχει όλες εκείνες τις πληροφορίες που χαρακτηρίζουν τον συνδρομητή. Ο διαχωρισμός της σύνδεσης του συνδρομητή και της συσκευής του στα πλαίσια του MS γίνεται για λόγους ευελιξίας. Η αλλαγή της συσκευής ME είναι πολύ

<sup>47</sup> Στο εξής: OSS

<sup>48</sup> Στο εξής: PLMN

<sup>49</sup> Στο εξής: LA

<sup>50</sup> Στο εξής: ME

<sup>51</sup> Στο εξής: SIM

εύκολη καθώς απαιτεί μόνο την τοποθέτηση της κάρτας SIM του συνδρομητή, χωρίς να είναι απαραίτητη η παρέμβαση του φορέα κινητής τηλεφωνίας. Επιπλέον, και η περιαγωγή είναι εφικτή ανεξάρτητα της συσκευής ME που χρησιμοποιείται.

Η κάρτα SIM είναι στην πραγματικότητα ένας μικροελεγκτής (microcontroller), καθώς έχει επεξεργαστή, μνήμη τυχαίας προσπέλασης<sup>52</sup> (random access memory), μνήμη μόνο ανάγνωσης<sup>53</sup> (read only memory) και ηλεκτρικά εξαλείψιμη προγραμματίσιμη μνήμη μόνο ανάγνωσης<sup>54</sup> (electronically erasable programmable read only memory). Στη SIM υπάρχει η δυνατότητα για αποθήκευση μηνυμάτων καθώς και επαφών. Ακόμη υπάρχουν οι απαραίτητες ρυθμίσεις τις οποίες χρησιμοποιεί η συσκευή ME για να συνδεθεί με το δίκτυο GSM, και επίσης αποθηκεύει προσωρινές παραμέτρους λειτουργίας του δικτύου. Τέλος, να σημειωθεί ότι όλες οι κρυπτογραφικές λειτουργίες τρέχουν μόνο εντός της κάρτας SIM, έτσι ώστε τα σημαντικά τμήματα των κλειδιών κρυπτογράφησης να μην βρίσκονται εκτός της κάρτας SIM και αξιοποιηθούν από τρίτους για κακόβουλες ενέργειες εναντίον του δικτύου.

Πιο συγκεκριμένα, όλες οι ευαίσθητες πληροφορίες οι οποίες πρέπει να παραμείνουν στην κάρτα SIM αποθηκεύονται στην EEPROM και δεν μπορούν να διαβαστούν από την συσκευή ME. Η αξιοποίηση αυτών των τιμών γίνεται μέσω εντολών προς την ίδια την κάρτα SIM. Η προστασία χρήσης μιας κάρτας SIM από έναν μη εξουσιοδοτημένο χρήστη επιτυγχάνεται μέσω του κωδικού Personal Identification Number<sup>55</sup>.

Το BSS, γνωστό και ως GSM Radio Access Network<sup>56</sup>, περιλαμβάνει τα υποσυστήματα εκείνα τα οποία έρχονται σε άμεση επικοινωνία με το τερματικό MS και παρέχουν την ασύρματη σύνδεση και κινητικότητα των χρηστών στον γεωγραφικό χώρο κάλυψης του GSM δικτύου. Αποτελείται από τον σταθμό βάσης Base Transceiver Station<sup>57</sup>, τους ελεγκτές των BTS γνωστούς με την ονομασία Base Station Controller<sup>58</sup> και τον trans-coder sub-multiplexer<sup>59</sup>.

Ο σταθμός βάσης BTS είναι και το πιο αναγνωρίσιμο κομμάτι ενός δικτύου κινητής, καθώς ένα μέρος τους είναι οι κεραιές σε διάφορες περιοχές για την κάλυψη των συνδρομητών, οι οποίες συνδέονται με τους ραδιοπομποδέκτες. Είναι επίσης και το πιο πολυπληθές στοιχείο του δικτύου, δεδομένου ότι κάθε σταθμός βάσης BTS καλύπτει μία συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, και έτσι για την παροχή ευρείας κάλυψης αυτό συνεπάγεται ότι ο αριθμός των σταθμών βάσης BTS είναι αντίστοιχος.

Κάθε σταθμός βάσης BTS στα πλαίσια του GSM υποχρεούται να εκπέμπει σε διαφορετική ζώνη συχνοτήτων για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών μεταξύ

---

<sup>52</sup> Στο εξής: RAM

<sup>53</sup> Στο εξής: ROM

<sup>54</sup> Στο εξής: EEPROM

<sup>55</sup> Στο εξής: PIN

<sup>56</sup> Στο εξής: GRAN

<sup>57</sup> Στο εξής: BTS

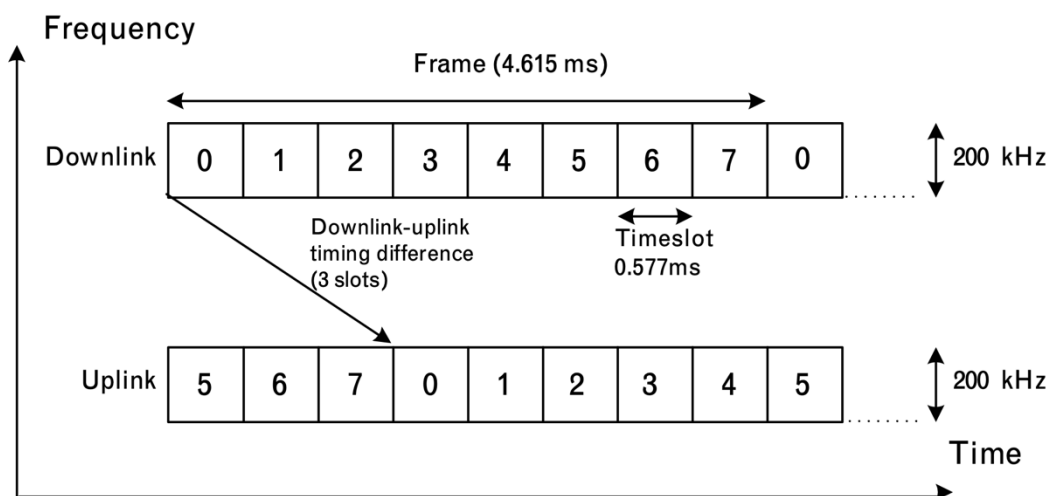
<sup>58</sup> Στο εξής: BSC

<sup>59</sup> Στο εξής: TCMSM

γειτονικών σταθμών. Συνήθως κάθε σταθμός βάσης BTS χωρίζεται σε επιμέρους τομείς, συνήθως από 1 έως 3, όπου κάθε τομέας είναι και μία κυψέλη που εκπέμπει σε συγκεκριμένη συχνότητα. Με αυτόν τον τρόπο μεγαλώνει η χωρητικότητα σε ένα σταθμό BTS και επιτυγχάνεται αποδοτικότερη επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων, δεδομένου ότι ο κάθε φορέας κινητής τηλεφωνίας κατέχει ένα συγκεκριμένο αδειοδοτημένο φάσμα. Το ασύρματο κανάλι μέσω του οποίου υλοποιείται η επικοινωνία μεταξύ του τερματικού MS και του σταθμού βάσης BTS, ονομάζεται ραδιοδιεπαφή, το γνωστό ως διεπαφή Um με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές. Δεδομένου ότι το διαθέσιμο φάσμα δεν είναι άπειρο και ένα κομμάτι του είναι αδειοδοτημένο για το δίκτυο GSM, η πολυπλεξία των χρηστών στο μέσο γίνεται με πολυπλεξία τόσο στο επίπεδο των συχνοτήτων όσο και χρονικά. Δηλαδή έχουμε Frequency Division Multiple Access<sup>60</sup>, και Time Division Multiple Access<sup>61</sup>.

Πιο αναλυτικά, το φάσμα διαιρείται σε κανάλια εύρους 200 kHz. Κάθε τέτοιο κανάλι μπορεί να αξιοποιηθεί ταυτόχρονα από 8 χρήστες μέσω TDMA, χωρίζοντας το κανάλι σε 8 χρονοθυρίδες. Σε κάθε χρονοθυρίδα μπορούν να μεταφερθούν 114 δυφία (bit) πληροφορίας, παραβλέποντας τα όποια bit αφορούν τη σηματοδότηση. Η τεχνική κωδικοποίησης στο κανάλι είναι gaussian minimum-shift keying<sup>62</sup>.

Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης έχει δύο διαφορετικές χρονοθυρίδες σε διαφορετική συχνότητα. Για παράδειγμα, αν ο χρήστης έχει τη χρονοθυρίδα 0 για την καθοδική ζεύξη (downlink), τότε έχει τη χρονοθυρίδα 3 στην ανοδική ζεύξη (uplink). Αυτό γίνεται για να μπορεί να αλλάζει κανάλι ο μοναδικός ραδιοπομποδέκτης κάθε φορά και έτσι να επιτύχουμε πλήρως αμφίδρομη επικοινωνία.



Εικόνα 2: Χρονοθυρίδες (timeslots) στο GSM για downlink και uplink

Ο ελεγκτής BSC διαχειρίζεται όλα αυτά τα κανάλια και αναθέτει πόρους. Κάθε ελεγκτής BSC ελέγχει πολλούς σταθμούς βάσης BTS και είναι υπεύθυνος για την κατανομή των

<sup>60</sup> Στο εξής: FDMA

<sup>61</sup> Στο εξής: TDMA

<sup>62</sup> Στο εξής: GMSK

καναλιών στους συνδρομητές στο σύνολο των σταθμών που διαχειρίζεται άμεσα. Είναι επίσης ο ενδιάμεσος κρίκος ανάμεσα στους σταθμούς BTS και στο σύστημα NSS. Είναι υπεύθυνο και για τη σηματοδότηση με το τερματικό MS μέσω της διεπαφής Um και διαχειρίζεται επίσης το επίπεδο ισχύος που χρησιμοποιούν τα τερματικά MS στην επικοινωνία τους με το σταθμό βάσης BTS. Η απόφαση και η διαχείριση των μεταπομπών μεταξύ των κυψελών ανήκει στις αρμοδιότητες του ελεγκτή BSC, όπως επίσης και η διαχείριση των περιοχών LA.

Το TCSM τοποθετείται συνήθως κοντά στα κέντρα MSC, όμως οι λειτουργίες του ελέγχονται από το BSC. Η βασική του λειτουργία είναι η μετατροπή του σήματος από 64 kilobit per second<sup>63</sup> σε 16 kbps. Επειδή ένα κανάλι φωνής στην σταθερή τηλεφωνία έχει εύρος δειγματοληψίας στα 64 kbps, και τα κανάλια στο GSM είναι πολύ μικρότερα, η ψηφιοποιημένη φωνή υφίσταται συμπίεση στα 12,2 kbps. Αυτός ο αλγόριθμος κωδικοποίησης ονομάστηκε Full Rate<sup>64</sup>. Το 1990 εμφανίστηκε ο αλγόριθμος Enhanced Full Rate<sup>65</sup>, με βελτιωμένη ποιότητα φωνής στις κλήσεις. Επίσης υπάρχει και ο Half Rate, ο οποίος πραγματοποιεί συμπίεση στα 7 kbps, αλλά με αισθητά χειρότερη ποιότητα. Στην πράξη σήμερα χρησιμοποιείται ο Adaptive Multi-Rate<sup>66</sup>, όπου επιλέγεται δυναμικά ο καταλληλότερος κωδικοποιητής ανάλογα τις περιστάσεις, όπως η ποιότητα του σήματος, ο φόρτος του σταθμού BTS κ.α. Η εξέλιξη του AMR είναι ο Adaptive Multi-Rate Wideband<sup>67</sup>, όπου χρησιμοποιεί δειγματοληψία στα 7 kHz αντί για 4 kHz, με αποτέλεσμα την βελτίωση της ποιότητας.

Το σύστημα NSS είναι το κομμάτι του δικτύου GSM που ενασχολείται με την διαχείριση των συνδρομητών, την επαλήθευση της ταυτότητάς τους, την εγκαθίδρυση των κλήσεων καθώς και την σύνδεση με άλλα δίκτυα, όπως η σταθερή, εταιρικά δίκτυα καθώς και με το διαδίκτυο. Η διασύνδεση του συστήματος NSS με τα διάφορα BSS τα οποία διαχειρίζεται γίνεται μέσω της διεπαφής A.

Στο NSS εμπεριέχεται επίσης η κύρια βάση συνδρομητών που ονομάζεται Home Location Register<sup>68</sup> και περιέχει πληροφορίες σχετικά με του συνδρομητές και τις υπηρεσίες στις οποίες είναι εγγεγραμμένοι. Το πρωτεύων κλειδί αυτής της βάσης συνδρομητών είναι το International Mobile Subscriber Identity<sup>69</sup> [7][8], το οποίο είναι μοναδικό παγκοσμίως και είναι αποθηκευμένο και στην κάρτα SIM του κάθε συνδρομητή.

---

<sup>63</sup> Στο εξής: kbps

<sup>64</sup> Στο εξής: FR

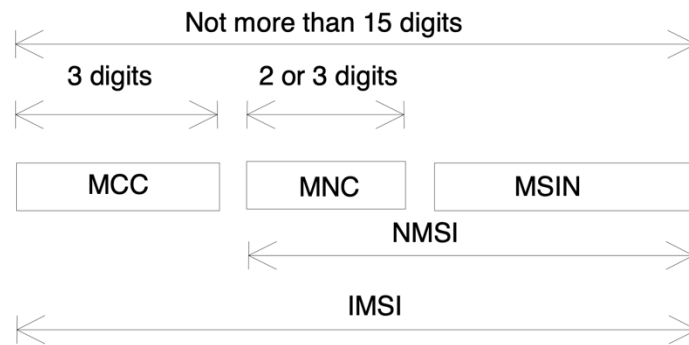
<sup>65</sup> Στο εξής: EFR

<sup>66</sup> Στο εξής: AMR

<sup>67</sup> Στο εξής: AMR-WB

<sup>68</sup> Στο εξής: HLR

<sup>69</sup> Στο εξής: IMSI



**Εικόνα 3: Μορφότυπο IMSI**

Το IMSI, το οποίο μπορεί να έχει το μέγιστο 15 ψηφία, απαρτίζεται από τρία τμήματα:

- Τον κωδικό Mobile Country Code<sup>70</sup>, το οποίο αποτελείται από 3 ψηφία και υποδεικνύει την χώρα στην οποία ανήκει ο συνδρομητής. Η επίσημη λίστα με τους κωδικούς MNC ανά χώρα δημοσιεύεται δύο φορές το μήνα από την κοινοπραξία International Telecommunication Union<sup>71</sup>.
- Τον κωδικό Mobile Network Code<sup>72</sup>, το οποίο αποτελείται από 2 ή 3 ψηφία και αντικατοπτρίζει ένα συγκεκριμένο δίκτυο στα πλαίσια μίας χώρας. Η ανάθεση των κωδικών αυτών ανά δίκτυο πραγματοποιείται από την εκάστοτε αρχή τηλεπικοινωνιών της αντίστοιχης χώρας, εξαιρώντας το εύρος 90x. Ο κωδικός MNC σε συνδυασμό με τον κωδικό MCC, γνωστό και ως αναγνωριστικό του PLMN, υποδεικνύει το πάτριο δίκτυο (home network).
- Τον αριθμό Mobile Subscriber Identification Number<sup>73</sup>, ο οποίος είναι ο μοναδικός προσωπικός αριθμός του συνδρομητή στα πλαίσια ενός συγκεκριμένου δικτύου PLMN. Ο μέγιστος αριθμός ψηφίων είναι μέχρι και 10.

Ο τηλεφωνικός αριθμός του χρήστη είναι το Mobile Station International Subscriber Directory Number<sup>74</sup>. Αποτελείται από:

- Τον κωδικό Country Code<sup>75</sup>, ο οποίος είναι μέχρι και 3 ψηφία, τα οποία ακολουθούν την σύσταση E.164 [9] της κοινοπραξίας ITU-T
- Τον αριθμό National (significant) number, ο οποίος απαρτίζεται από:
  - Τον κωδικό National Destination Code<sup>76</sup>, που είναι 2 ή 3 ψηφία
  - Τον αριθμό Subscriber Number<sup>77</sup> με μέγιστο τα 10 ψηφία

<sup>70</sup> Στο εξής: MCC

<sup>71</sup> Στο εξής: ITU

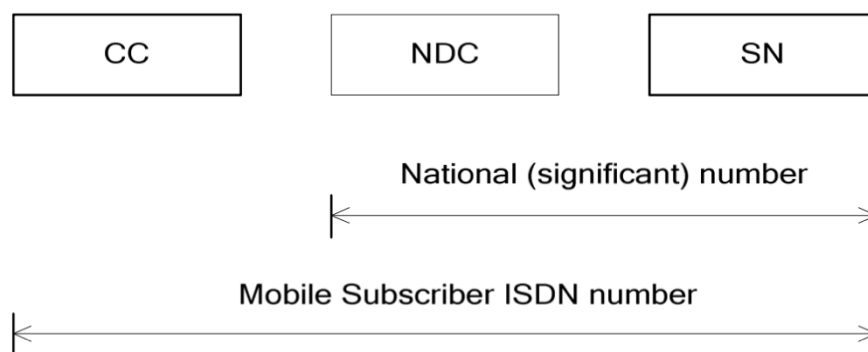
<sup>72</sup> Στο εξής: MNC

<sup>73</sup> Στο εξής: MSIN

<sup>74</sup> Στο εξής: MSISDN

<sup>75</sup> Στο εξής: CC

<sup>76</sup> Στο εξής: NDC



**Εικόνα 4: Μορφότυπο MSISDN**

Επίσης, στην βάση HLR υπάρχουν πληροφορίες για υπηρεσίες όπως η προώθηση κλήσεων, η φραγή κλήσεων, η αναγνώριση κλήσεων και άλλες. Ακόμη, στην βάση HLR εμπεριέχεται και το κέντρο ταυτοποίησης - Authentication Center<sup>78</sup>, όπου αποθηκεύεται το κρυπτογραφικό κλειδί του συνδρομητή. Αυτό το κλειδί υπάρχει και στην κάρτα SIM του συνδρομητή, αλλά η τιμή του δεν μπορεί να διαβαστεί απευθείας παρά μόνο να χρησιμοποιηθεί από τον ίδιο τον επεξεργαστή της κάρτας SIM για την δημιουργία των κλειδιών κρυπτογράφησης για κάθε συνεδρία.

Ο κεντρικός ελεγκτής όμως στο σύστημα NSS και στο δίκτυο GSM γενικότερα, είναι το κέντρο MSC. Όπως αναφέρθηκε ήδη, το κέντρο MSC αποτελεί μία εξέλιξη των κέντρων μεταγωγής που προϋπήρχαν στην σταθερή τηλεφωνία, δηλαδή συνδέει δύο συνδρομητές για να επικοινωνήσουν μεταξύ τους μέσω ενός μονοπατιού. Εκτός από τις κλήσεις, είναι υπεύθυνο και για την μεταφορά των μηνυμάτων, τα οποία είναι μία ειδική περίπτωση καθώς ενώ είναι δεδομένα των συνδρομητών, μεταφέρονται μέσω καναλιών σηματοδότησης. Αρχικά η σύνδεση των συνδρομητών με το δίκτυο γίνεται μεταξύ του τερματικού MS και του κέντρου MSC, το οποίο είναι ο μεσάζοντας για την επαλήθευση της ταυτότητας του συνδρομητή προς όφελος της βάσης HLR. Αν ο συνδρομητής είναι έγκυρος και η διαδικασία ταυτοποίησης ολοκληρωθεί επιτυχώς, τότε μπορεί να εγγραφεί με το δίκτυο για να το χρησιμοποιήσει με βάση τις υπηρεσίες τις οποίες έχει εγγραφωμένες στην βάση HLR. Αξίζει να αναφερθεί ότι μόνο το δίκτυο πραγματοποιεί επαλήθευση της ταυτότητας του συνδρομητή, και όχι το ανάστροφο, δηλαδή ο συνδρομητής δεν επαληθεύει το δίκτυο με το οποίο συνδέεται, κάτι που θα βελτιωθεί από τη 3G και μετέπειτα.

Επιπρόσθετα, το κέντρο MSC διαχειρίζεται και την κινητικότητα των χρηστών στα πλαίσια του δικτύου και στα σημεία κάλυψης του. Πιο συγκεκριμένα, δέχεται ενημερώσεις τοποθεσίας από το τερματικό MS κάθε φορά που αλλάζει περιοχή LA, έτσι ώστε σε μία εισερχόμενη κλήση να μπορεί να εντοπίσει γρήγορα το συνδρομητή, μέσω της διαδικασίας τηλεειδοποίησης. Αν η αλλαγή περιοχής LA συμβεί κατά την διαδικασία που το κινητό είναι σε ενεργή κλήση, τότε είναι υπεύθυνο και για την διαδικασία μεταπομπής της κλήσης από ένα σταθμό βάσης BTS σε ένα άλλο σταθμό.

<sup>77</sup> Στο εξής: SN

<sup>78</sup> Στο εξής: AuC

Οι παραπάνω διαδικασίες μπορούν να συνοψιστούν στις έννοιες του ελέγχου κλήσης και της διαχείρισης της κινητικότητας. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η επικοινωνία του κέντρου MSC με την βάση HLR, είναι συχνή, και ότι η βάση των συνδρομητών είναι ένα κεντρικό σημείο του συστήματος NSS, αυτό συνεπάγεται ότι είναι επιρρεπής για συμφόρηση σε περιόδους που το δίκτυο είναι φορτωμένο, Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται μία επιπλέον βάση είδωλο, η Visitor Location Register<sup>79</sup>. Κάθε MSC έχει τη δικιά της βάση VLR, η οποία εμπεριέχει το σύνολο των συνδρομητών που εξυπηρετεί το κέντρο MSC. Τα δεδομένα που έχει μια βάση VLR για έναν συνδρομητή είναι αντίγραφο από την κεντρική βάση HLR. Αν ο συνδρομητής μετακινηθεί σε άλλο κέντρο MSC, τότε τα στοιχεία μεταφέρονται στην άλλη βάση VLR, και η παλιά διαγράφει τα στοιχεία του συνδρομητή που δεν διαχειρίζεται πλέον. Στην πραγματικότητα, η βάση VLR είναι ενσωματωμένη στο κέντρο MSC, και έτσι συναντάται συχνά ως MSC/VLR.

Για την λειτουργία των γραπτών μηνυμάτων - Short Message Service<sup>80</sup>, υπάρχει το Short Messaging Service Center<sup>81</sup>. Το κέντρο SMSC παρεμβάλλεται μεταξύ των κέντρων MSC και επικοινωνεί και με την βάση HLR. Ένας συνδρομητής που στέλνει ένα γραπτό μήνυμα, αποστέλλει το μήνυμα και αυτό καταλήγει αρχικά στο κέντρο MSC που είναι υπεύθυνο για τον συνδρομητή που είναι αποστολέας. Εν συνεχεία το μήνυμα προωθείται στο κέντρο SMSC. Σε αυτό το σημείο ο αποστολέας ενημερώνεται για την επιτυχή αποστολή του μηνύματος SMS, αν και πρακτικά δεν έχει φθάσει το μήνυμα στον παραλήπτη. Μετά, το κέντρο SMSC επικοινωνεί με την βάση HLR και βρίσκει το κέντρο MSC το οποίο διαχειρίζεται τον τηλεφωνικό αριθμό του παραλήπτη, στο οποίο θα καταλήξει το μήνυμα. Αν ο συνδρομητής είναι ενεργός στο δίκτυο, τότε προωθείται στο κέντρο MSC, το οποίο το στέλνει στο BSS και έτσι φθάνει στο τερματικό MS του παραλήπτη. Με την επιτυχή λήψη, το κέντρο MSC ενημερώνει το κέντρο SMSC για την επιτυχή παράδοση. Αν όμως ο συνδρομητής είναι εκτός κάλυψης, το μήνυμα παραμένει στο κέντρο SMSC, και μεταφέρεται όταν ο συνδρομητής είναι εκ νέου ενεργός.

Κάθε συσκευή ME έχει ένα μοναδικό αναγνωριστικό, το International Mobile Equipment Identity<sup>82</sup>, ο οποίος είναι 15 ψηφία και ορίζεται ως εξής:

- Τον κωδικό Type Allocation Code<sup>83</sup>, που είναι 8 ψηφία
- Τον αριθμό Serial Number<sup>84</sup>, που είναι 6 ψηφία και αναγνωρίζει τη συσκευή ME στα πλαίσια ενός TAC
- Το ψηφίο Check Digit<sup>85</sup> - Spare Digit<sup>86</sup>, όπου είναι είτε 0 είτε υπολογίζεται η τιμή του με βάση την φόρμουλα Luhn και χρησιμοποιείται για έλεγχο πιθανών σφαλμάτων κατά την μεταφορά του αναγνωριστικού IMEI.

---

<sup>79</sup> Στο εξής: VLR

<sup>80</sup> Στο εξής: SMS

<sup>81</sup> Στο εξής: SMSC

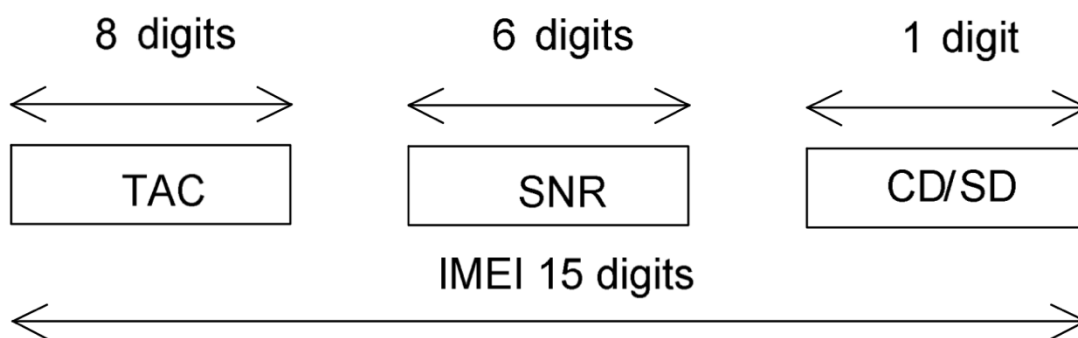
<sup>82</sup> Στο εξής: IMEI

<sup>83</sup> Στο εξής: TAC

<sup>84</sup> Στο εξής: SNR

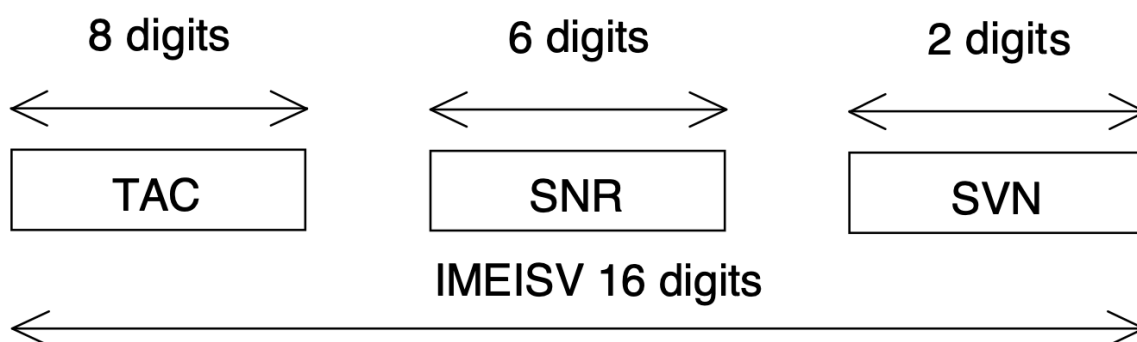
<sup>85</sup> Στο εξής: CD





**Εικόνα 5: Μορφότυπο IMEI**

Υπάρχει επίσης και το International Mobile station Equipment Identity and Software Version number<sup>87</sup>, όπου αντί για το ψηφίο CD/SD, χρησιμοποιούνται 2 ψηφία, τα οποία είναι ο αριθμός Software Version Number<sup>88</sup>, στα οποία υποδηλώνεται η έκδοση του λογισμικού.



**Εικόνα 6: Μορφότυπο IMEISV**

Με βάση το αναγνωριστικό IMEI/IMEISV, και το κέντρο - μητρώο Equipment Identity Register<sup>89</sup> στο σύστημα NSS, μπορεί να πραγματοποιηθεί έλεγχος της συσκευής ME και να επιτραπεί ή να απορριφθεί η χρήση του στα πλαίσια του δικτύου GSM.

Την εποχή που αναπτύχθηκε το σύστημα GSM, τα δίκτυα χρησιμοποιούνταν ως επί το πλείστον για ομιλία. Για αυτόν τον λόγο το GSM δημιουργήθηκε βασισμένο σε αρχιτεκτονικές που είχαν αναπτυχθεί για να εξυπηρετούν κυρίως φωνητικές κλήσεις. Τα επόμενα χρόνια μετά την έλευση του GSM, άρχισε να αναπτύσσεται η έννοια της μεταφοράς δεδομένων. Για να επιτευχθεί αυτό στο GSM, τα κανάλια φωνής χρησιμοποιούνταν αυτούσια για την εγκαθίδρυση μίας συνεδρίας αποκλειστικά για την

<sup>86</sup> Στο εξής: SD

<sup>87</sup> Στο εξής: IMEISV

<sup>88</sup> Στο εξής: SVN

<sup>89</sup> Στο εξής: EIR

μεταφορά δεδομένων. Αυτή η μορφή μεταφοράς δεδομένων ονομάστηκε Circuit Switched Data transmission over GSM<sup>90</sup>, και η ταχύτητα μεταφοράς των δεδομένων έφθανε τα 9,6 kbps. Τα προτερήματα αυτής της μεθόδου ήταν η σταθερή ταχύτητα σε όλη την διάρκεια της περιόδου σύνδεσης, δεδομένου ότι οι πόροι είχαν δεσμευτεί εξ αρχής, και η καθυστέρηση των πακέτων ήταν σταθερή και ανάλογη της απόστασης μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη. Η εξέλιξη του CSD-GSM ήταν το High Speed Circuit Switched Data<sup>91</sup>, το οποίο είχε μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 57,6 kbps, αξιοποιώντας 4 χρονοθυρίδες.

Η φύση όμως της επικοινωνίας μέσω δεδομένων χαρακτηρίζεται από περιόδους συχνής μεταφοράς δεδομένων με μεγάλες περιόδους αδράνειας. Έτσι η σταθερή δέσμευση των πόρων, ανεξαρτήτως της χρησιμοποίησής αυτών, δεν αποτελεί βέλτιστη πρακτική, καθώς έτσι περιορίζεται η χωρητικότητα του συστήματος. Λίγοι χρήστες θα δεσμεύουν παραπάνω πόρους από ότι χρειάζονται στην πραγματικότητα.

Αυτή η δυναμική αξιοποίηση του εύρους του συστήματος επιτυγχάνεται με τα δίκτυα πακετομεταγωγής. Για αυτό το σκοπό το σύστημα GSM επεκτάθηκε με το σύστημα GPRS, το οποίο εισάγει νέα συστήματα, τα GPRS Supporting Nodes<sup>92</sup>, καθώς και αναβαθμίσεις στο BSS. Έτσι, ενώ το σύστημα GSM παραμένει ένα δίκτυο κυκλωματομεταγωγής, πλέον έχουμε την προσθήκη της πακετομεταγωγής και την δημιουργία δύο ξεχωριστών τομέων, το τομέα δικτύου μεταγωγής και το τομέα πακετομεταγωγής. Οι αρχικές ταχύτητες που προσέφερε το σύστημα GPRS ήταν της τάξης των 40 kbps, όπου σε επόμενες εκδόσεις έφθασε τα 171 kbps. Κάποια πλεονεκτήματα χρήσης του GPRS έναντι του HSCSD είναι η αλλαγή του τρόπου χρέωσης του συνδρομητή. Στο HSCSD, η χρέωση ήταν όπως στην τηλεφωνία, δηλαδή με βάση τον χρόνο. Η χρονοχρέωση έχει το μειονέκτημα ότι ο συνδρομητής χρεώνεται και για περιόδους που δεν πραγματοποιεί μεταφορά δεδομένων. Ο λόγος που οι φορείς κινητής τηλεφωνίας χρεώνανε με αυτόν τον τρόπο, είναι το γεγονός ότι ο χρήστης δεσμεύει τους πόρους του συστήματος, ακόμη και αν δεν τους χρησιμοποιεί. Αντιθέτως, στο GPRS, υπάρχει χρέωση με βάση τον όγκο των δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι η σύνδεση δεν χρειάζεται να διακοπεί για την αποφυγή χρέωσης, και έτσι υπεισέρχεται η έννοια της διαρκούς συνδεσιμότητας. Επιπρόσθετα, η εγκαθίδρυση μίας συνεδρίας με το δίκτυο στο CSD-GSM και το HSCSD απαιτούσε μερικές δεκάδες δευτερόλεπτα. Αντιθέτως αυτός ο χρόνος μειώνεται σε μερικά δευτερόλεπτα στο GPRS.

Η δυναμική αξιοποίηση των πόρων του δικτύου μόνο όταν αυτό χρειάζεται, δίνει την δυνατότητα στους φορείς κινητής τηλεφωνίας να έχουν μικρότερη δέσμευση πόρων για τον ίδιο όγκο δεδομένων και έτσι να μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερο αριθμό συνδρομητών χωρίς την επέκτασή της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου. Ο νέος ευέλικτος τρόπος αξιοποίησης των ραδιοπόρων στο BSS οδηγεί στην επίτευξη πολύ μεγαλύτερων ταχυτήτων με την χρήση του GPRS. Δυστυχώς όμως, πέρα από τα πλεονεκτήματα, το σύστημα GPRS παρέχει μεγαλύτερη λανθάνουσα καθυστέρηση καθώς οι χρονοθυρίδες δεσμεύονται δυναμικά και όχι για όλη την διάρκεια της μετάδοσης. Τα πρώτα δίκτυα GSM με την επέκταση μέσω του συστήματος GPRS εμφανίσθηκαν το 2001.

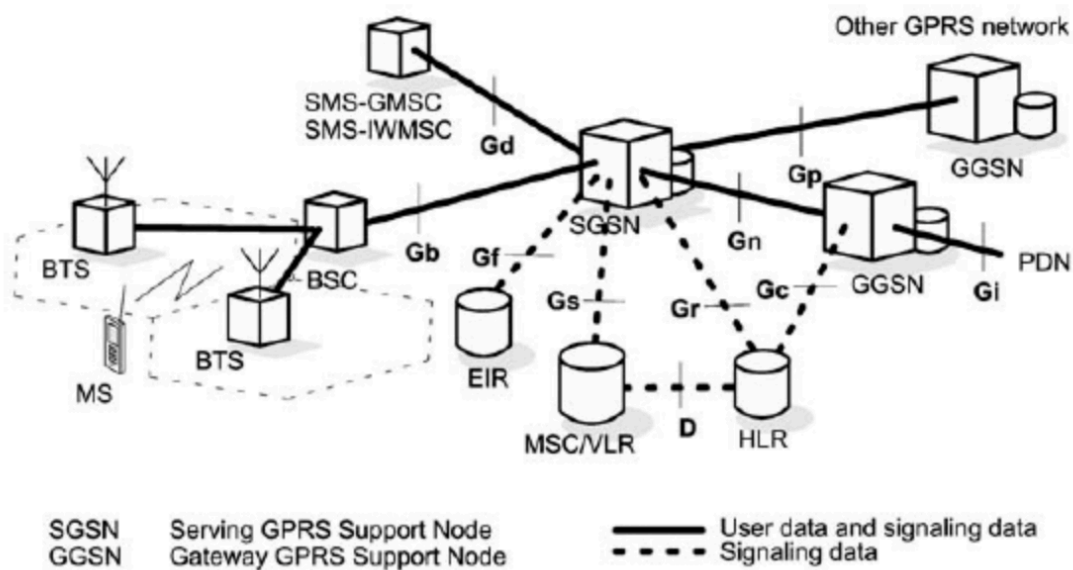
---

<sup>90</sup> Στο εξής: CSD-GSM

<sup>91</sup> Στο εξής: HSCSD

<sup>92</sup> Στο εξής: GRN(s)

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική συστήματος GPRS

Το Gateway GPRS Support Node<sup>93</sup> είναι ο ακριανός κόμβος του συστήματος GPRS, καθώς εκεί πραγματοποιείται η διασύνδεση με εξωτερικά δίκτυα. Είναι ουσιαστικά η σύνδεση του συστήματος GPRS με το διαδίκτυο, ιδιωτικά δίκτυα, κ.α. Η εγκαθίδρυση μίας συνεδρίας δεδομένων και η ανάθεση διεύθυνσης Internet Protocol<sup>94</sup> στον συνδρομητή πραγματοποιείται σε αυτόν τον κόμβο. Το κέντρο GGSN είναι και το μέρος του δικτύου χάρη στο οποίο ο χρήστης μπορεί να μετακινηθεί στην περιοχή κάλυψης των κυψελών του δικτύου και διασφαλίζει κάθε φορά την ίδια διεύθυνση IP. Αυτό επιτυγχάνεται διότι το GGSN είναι ο μοναδικός κόμβος δικτύου που δεν αλλάζει κατά την κινητικότητα των συνδρομητών. Ο συνδρομητής μπορεί να αλλάξει σταθμό βάσης BTS, ακόμη και το κεντρικό κομμάτι διαχείρισης του δικτύου που είναι το κέντρο Serving GPRS Support Node<sup>95</sup>, αλλά το κέντρο GGSN παραμένει το αρχικό.

Για την βελτίωση των ταχυτήτων, αναπτύχθηκε η επέκταση Enhanced Datarates for GSM Evolution<sup>96</sup>. Η επέκταση EDGE εισήγαγε την δυνατότητα χρησιμοποίησης της διαμόρφωσης 8 Phase-Shift Keying<sup>97</sup>, η οποία επιτρέπει την μεταφορά 3 bit ανά σύμβολο. Το σύστημα GSM και κατ' επέκταση το σύστημα GPRS χρησιμοποιούσε την GMSK διαμόρφωση, η οποία στέλνει 1 bit ανά σύμβολο. Ουσιαστικά η επέκταση EDGE είναι βελτίωση στη ραδιοεπαφή κυρίως, και ένα δίκτυο GPRS που αξιοποιεί την επέκταση EDGE ονομάζεται Enhanced-GPRS<sup>98</sup>. Με την επέκταση EDGE, οι ταχύτητες

<sup>93</sup> Στο εξής: GGSN

<sup>94</sup> Στο εξής: IP

<sup>95</sup> Στο εξής: SGSN

<sup>96</sup> Στο εξής: EDGE

<sup>97</sup> Στο εξής: 8-PSK

<sup>98</sup> Στο εξής: E-GPRS

ήταν της τάξης των 384 kbps και έφθαναν τα 1300 kbps με την έλευση της επέκτασης EDGE evolution.

## 2.4 Δίκτυα τρίτης γενιάς - 3G

Πλέον, όπως και στην μετάβαση από τη 1G στη 2G όπου υπήρξε μεγαλύτερη ενοποίηση και συνεργασία μεταξύ των χωρών για την ανάπτυξη συστημάτων, αυτό επεκτάθηκε ακόμη περισσότερο στη 3G. Η κοινοπραξία ITU ήθελε να υπάρχει μόνο ένα δίκτυο 3G, όμως λόγω τεχνικών και πολιτικών λόγων αυτό ήταν ακόμη αδύνατο να επιτευχθεί. Για αυτό τον λόγο δημιουργήθηκε το International Mobile Telecommunications-2000<sup>99</sup>, όπου θα περιλάμβανε τα διάφορα δίκτυα 3G [10]:

- IMT direct spread<sup>100</sup> - UTRA FDD
- IMT multicarrier<sup>101</sup> - CDMA2000
- IMT time code<sup>102</sup> - UTRA TDD
- IMT single carrier<sup>103</sup> - UWC-136
- IMT frequency time<sup>104</sup> - DECT

Από τα παραπάνω συστήματα, το IMT-FT δεν ευδοκίμησε, και το IMT-SC εγκαταλείφθηκε από την κοινοπραξία Universal Wireless Communication Consortium<sup>105</sup>, που επέλεξε το IMT-DS. Συνεπώς, εξελίχθηκαν τα IMT-DS, IMT-TC και IMT-MC. Το IMT-DS και IMT-TC είναι γνωστά με το όνομα UMTS. Για την ανάπτυξη και διάδοση του UMTS, υπεύθυνη ήταν η κοινοπραξία 3GPP. Για το CDMA2000, υπεύθυνη ήταν η κοινοπραξία 3rd Generation Partnership Project 2<sup>106</sup>.

### 2.4.1 Η κοινοπραξία 3GPP

Όπως αναφέρθηκε, για την ανάπτυξη και εξέλιξη του UMTS, σχηματίστηκε το 1998 η κοινοπραξία 3GPP, που απαρτίζεται από τους παγκόσμιους τηλεπικοινωνιακούς οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, απαρτίζεται από:

- Τον οργανισμό Association of Radio Industries and Businesses<sup>107</sup> από την Ιαπωνία

---

<sup>99</sup> Στο εξής: IMT-2000

<sup>100</sup> Στο εξής: IMT-DS

<sup>101</sup> Στο εξής: IMT-MC

<sup>102</sup> Στο εξής: IMT-TC

<sup>103</sup> Στο εξής: IMT-SC

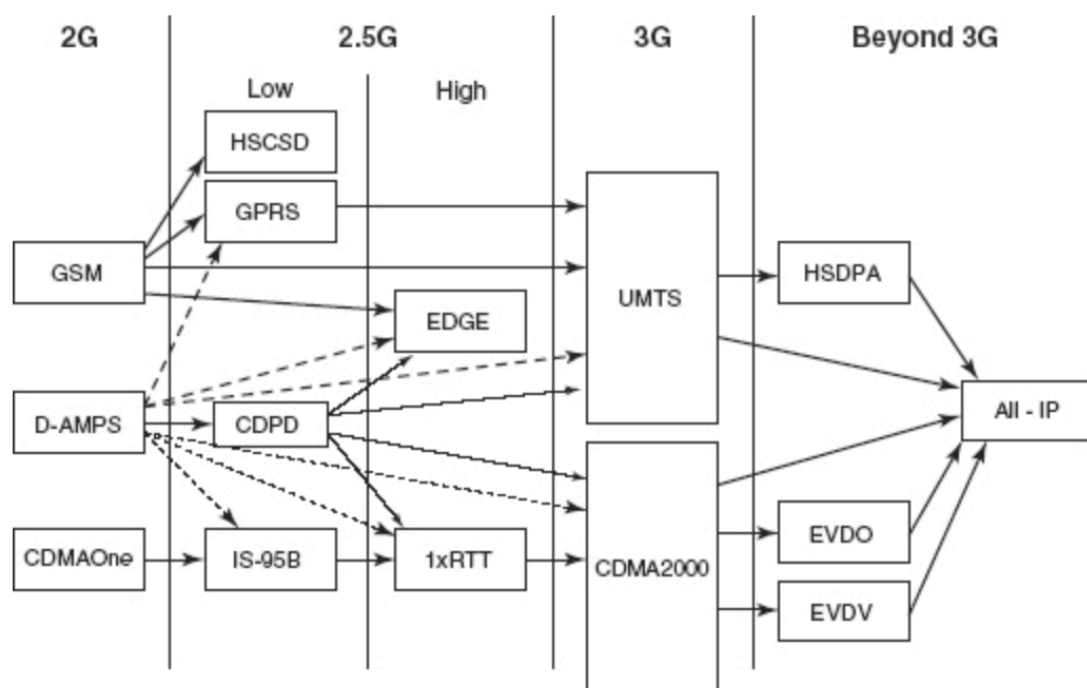
<sup>104</sup> Στο εξής: IMT-FT

<sup>105</sup> Στο εξής: UWCC

<sup>106</sup> Στο εξής: 3GPP2

<sup>107</sup> Στο εξής: ARIB

- Τον οργανισμό China Communications Standards Association<sup>108</sup> από την Κίνα
- Τον οργανισμό ETSI από την Ευρώπη
- Τον οργανισμό Alliance for Telecommunications Industry Solutions<sup>109</sup> από την Βόρεια Αμερική
- Τον οργανισμό Telecommunications Technology Association από την Νότια Κορέα<sup>110</sup>
- Τον οργανισμό Telecommunications Technology Committee<sup>111</sup> από την Ιαπωνία
- Τον οργανισμό Telecommunications Standards Development Society, India<sup>112</sup> από την Ινδία.



**Εικόνα 8: Η εξέλιξη των τεχνολογιών κινητής τηλεφωνίας από τη 2G έως και τη 3G**

Βασική αρμοδιότητα της κοινοπραξίας 3GPP κατά την ίδρυσή του ήταν η ανάπτυξη του δικτύου 3G και η συγγραφή και εξέλιξη των τεχνικών προδιαγραφών του ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κατασκευαστές και φορείς κινητής τηλεφωνίας για την δημιουργία και εφαρμογή της 3G. Οργανωτικά η κοινοπραξία 3GPP αποτελείται

<sup>108</sup> Στο εξής: CCSA

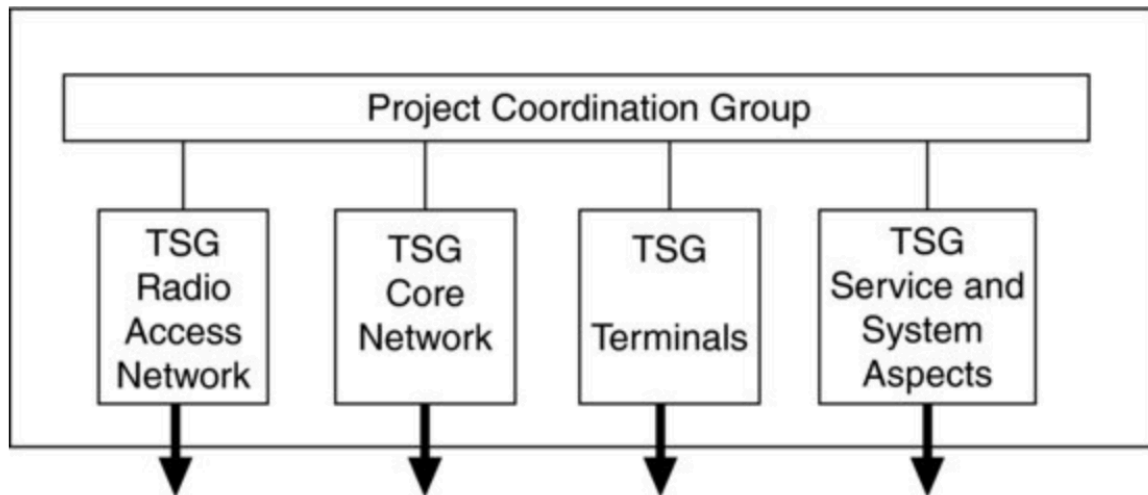
<sup>109</sup> Στο εξής: ATIS

<sup>110</sup> Στο εξής: TTA

<sup>111</sup> Στο εξής: TTC

<sup>112</sup> Στο εξής: TSDSI

από ομάδες Project Co-ordination Groups<sup>113</sup> και ομάδες Technical Specification Groups<sup>114</sup>, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 9: Ομάδες PCGs και TSGs στην κοινοπραξία 3GPP

Αρχικά, η κοινοπραξία 3GPP, απαρτιζόταν από τις παρακάτω ομάδες TSG:

- Ομάδα TSG Terminals, όπου είναι υπεύθυνη για την κάρτα SIM, την διεπαφή και σηματοδότηση στο τερματικό του χρήστη, σενάρια ελέγχου κ.α.
- Ομάδα TSG Radio, όπου αφορά τους σταθμούς βάσης, τα πρωτόκολλα και διαδικασίες που υπάρχουν καθώς και τη ραδιοδιεπαφή
- Ομάδα TSG Core, που ασχολείται με το Core Network
- Ομάδα TSG Services - Systems με κύριο μέλημα την γενικότερη αρχιτεκτονική του συστήματος, λειτουργίες χρέωσης και υπηρεσίες του δικτύου
- Ομάδα TSG GERAN, όπου ασχολείται με τα συστήματα GSM - EDGE

Στις μέρες μας, οι ομάδες TSG είναι πλέον τρεις και απαρτίζονται από επιμέρους ομάδες εργασίας, τα Working Groups<sup>115</sup>, με την δομή να είναι ως εξής:

- TSG Radio Access Network<sup>116</sup>
- TSG Service and System Aspects<sup>117</sup>
- TSG Core Network and Terminals<sup>118</sup>

<sup>113</sup> Στο εξής: PCGs

<sup>114</sup> Στο εξής: TSGs

<sup>115</sup> Στο εξής: WGs

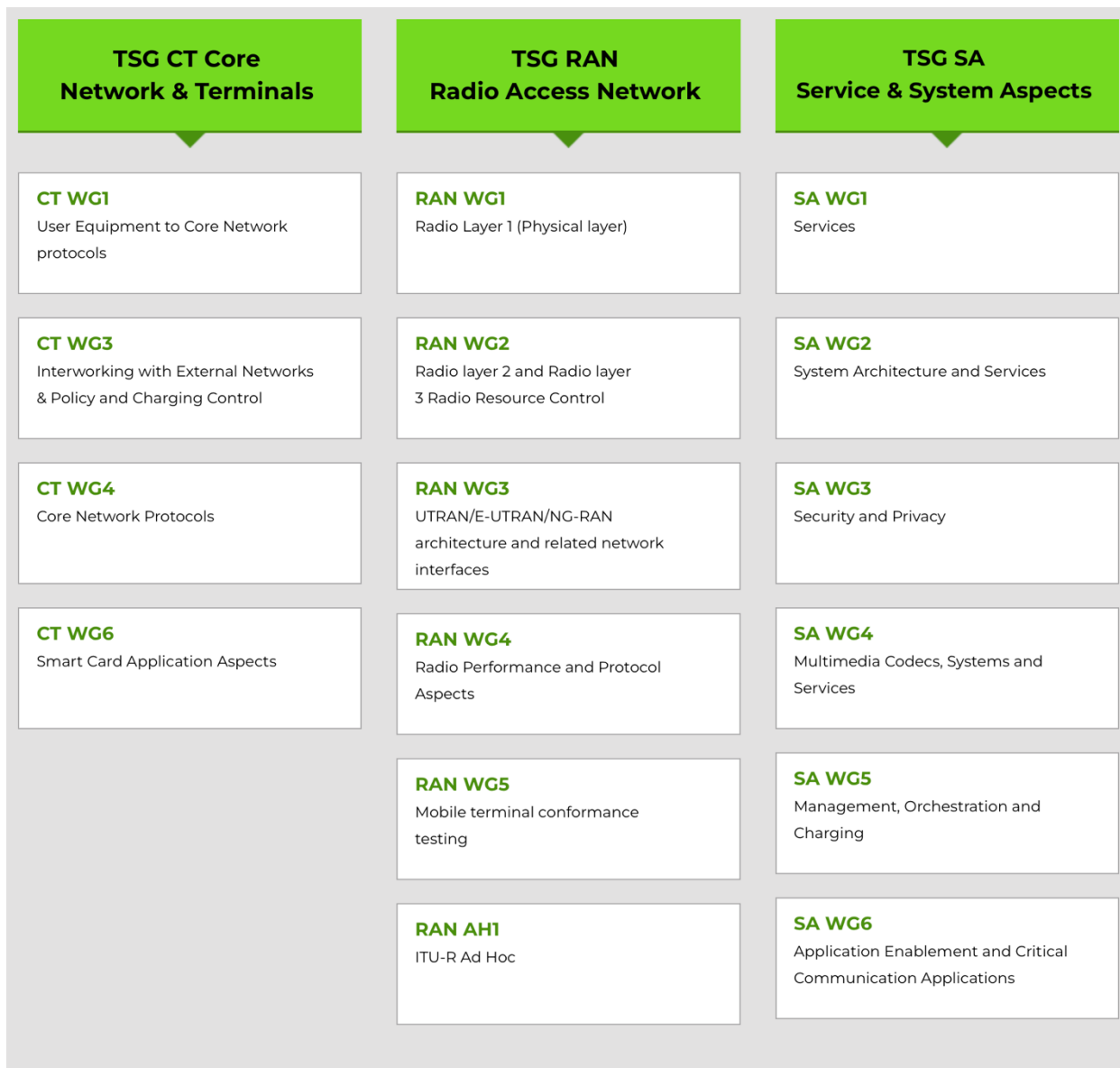
<sup>116</sup> Στο εξής: RAN

<sup>117</sup> Στο εξής: SA

<sup>118</sup> Στο εξής: CT

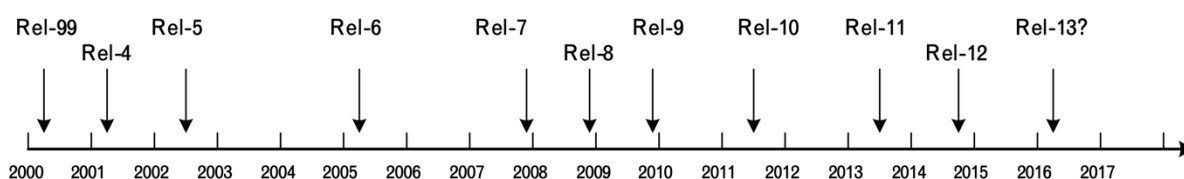
Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 4ης γενιάς

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ομάδα TSG GERAN έκλεισε και συγχωνεύτηκε στην ομάδα TSG RAN, και τελικώς το 2020 έκλεισε τελείως [11].



**Εικόνα 10: Ομάδες TSG και οι αντίστοιχες ομάδες εργασίας WG**

Τα τεχνικά έγγραφα που περιγράφουν αναλυτικά τα συστήματα, τις λειτουργίες τους καθώς και τα πρωτόκολλα που διέπουν αυτά τα υποσυστήματα, εκδίδονται περιοδικά σε εκδόσεις (releases). Η 1<sup>η</sup> έκδοση ονομαζόταν Release 98 και αφορούσε το σύστημα GSM. Η Release 99 είναι η πρώτη έκδοση που άρχισε να περιγράφει το σύστημα UMTS. Από την Release 2000, άρχιζαν να ονομάζονται με τον αύξων αριθμό τους, ήτοι Release 4, 5, ... .

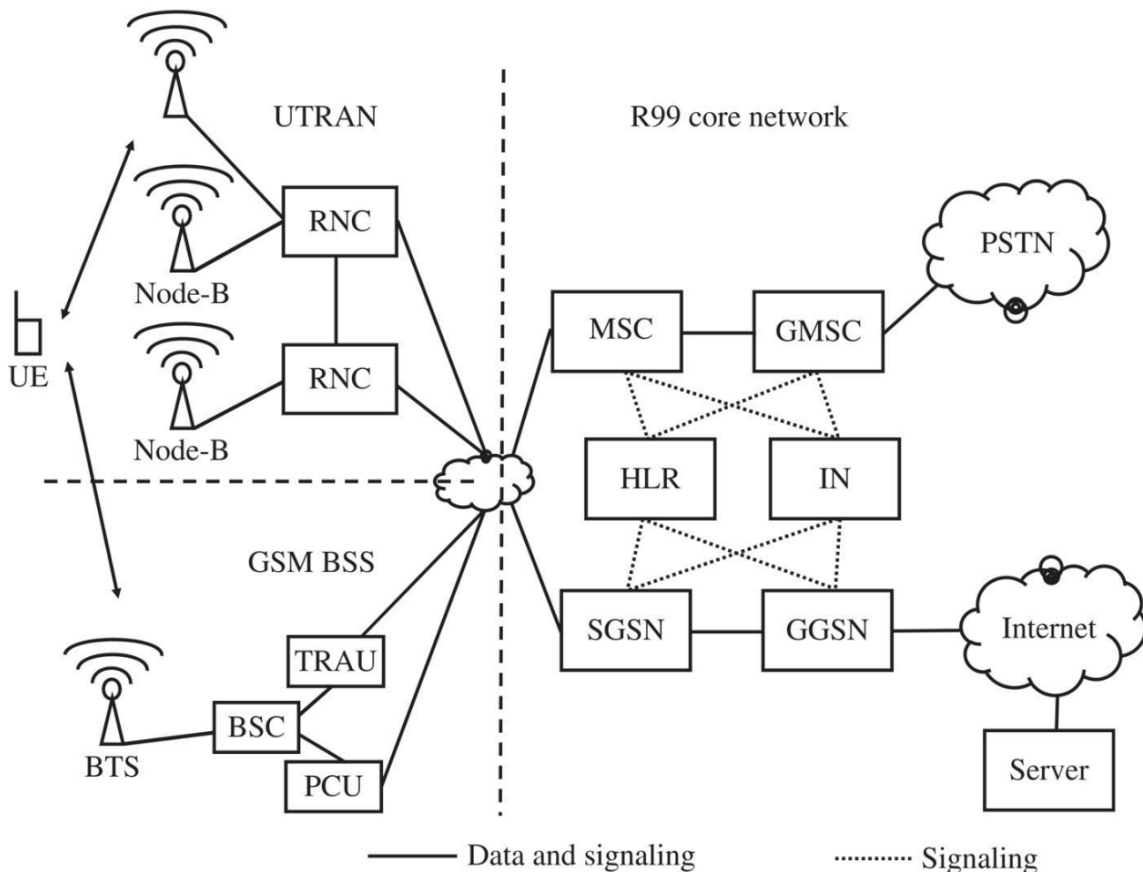


**Εικόνα 11: 3GPP Releases ανά έτος**

### 2.4.2 Το σύστημα UMTS

Το σύστημα UMTS, αποτελεί πρακτικά τον διάδοχο του συστήματος GSM, χρησιμοποιώντας πολλά από τα υποσυστήματα του NSS και του GPRS. Χρησιμοποιήθηκε τόσο ο τομέας δικτύου μεταγωγής του GSM, όσο και ο τομέας πακετομεταγωγής του συστήματος GPRS με μικρές προσθήκες ώστε να υποστηριχθεί το νέο δίκτυο πρόσβασης Universal Terrestrial Radio Access Network<sup>119</sup>. Το σύστημα UMTS εμφανίστηκε με τη Release 99 – R99 της κοινοπραξίας 3GPP.

Σε αντίθεση με το Core Network, το δίκτυο πρόσβασης στο σύστημα GSM είχε κανάλια πολύ μικρού εύρους, στα 200 kHz, και μετά από τις επεκτάσεις του EDGE, είχε φθάσει τα όριά του με βάση τον αρχικό του σχεδιασμό. Για αυτόν τον λόγο, το δίκτυο πρόσβασης στο UMTS αναπτύχθηκε από την αρχή, και βασίστηκε στη πολυπλεξία χρηστών μέσω κώδικα<sup>120</sup> (code-division multiple access). Το φάσμα λειτουργίας κυμαινόταν στα 1880 με 1980 MHz, 2010 με 2025 MHz και 2110 με 2170 MHz και το εύρος καναλιού ήταν στα 5 MHz.



Εικόνα 12: Αρχιτεκτονική UMTS μαζί με GERAN

Στα πλαίσια του δικτύου πρόσβασης στη 3G, χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος λογικός διαχωρισμός που υπήρχε και στο σύστημα GSM, και έτσι ο σταθμός βάσης BTS

<sup>119</sup> Στο εξής: UTRAN

<sup>120</sup> Στο εξής: CDMA



μετονομάστηκε σε NodeB και ο ελεγκτής BSC σε Radio Network Controller<sup>121</sup>. Όπως και στο σύστημα GSM, ένας ελεγκτής RNC διαχειρίζεται πολλούς σταθμούς βάσης nodeB. Το τερματικό MS, άλλαξε και αυτό ονομασία και πλέον αναφέρεται ως User Equipment<sup>122</sup>. Πλέον αυτός ο όρος είναι πιο ευρύς και δεν χαρακτηρίζει μόνο ένα κινητό τηλέφωνο. Μπορεί να είναι μία κινητή τερματική συσκευή, όπως για παράδειγμα ένας διαποδιαμορφωτής (modem) 3G μέσω USB για χρήση με υπολογιστή, ή με μία ενσωματωμένη συσκευή. Η διεπαφή ανάμεσα στο τερματικό UE και το δίκτυο πρόσβασης UTRAN αναφέρεται από τις τεχνικές προδιαγραφές ως διεπαφή Uu πλέον.

Το σύστημα UMTS διαχώρισε τις λειτουργίες που αφορούν το δίκτυο πρόσβασης του δικτύου κινητής, και αυτές που αφορούν το Core Network, με σκοπό την ανεξάρτητη εξέλιξη αυτών των τμημάτων, χωρίς να είναι άρρηκτα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα γίνεται διαχωρισμός στο επίπεδο Access Stratum<sup>123</sup> και το επίπεδο Non Access Stratum<sup>124</sup> του δικτύου.

Το επίπεδο AS ασχολείται με τις λειτουργίες που αφορούν το ίδιο το δίκτυο πρόσβασης και είναι ουσιαστικά η σηματοδότηση ανάμεσα στο τερματικό UE και το δίκτυο πρόσβασης UTRAN. Το επίπεδο NAS από την άλλη, είναι η σηματοδότηση ανάμεσα στο τερματικό UE και το Core Network, και αποτελείται από λειτουργίες όπως η επαλήθευση ταυτότητας, η ενημέρωση περιοχής, ο έλεγχος κλήσης, η διαχείριση συνεδριών, η διαχείριση κινητικότητας και άλλες. Για την μεταφορά της σηματοδότησης που αφορά το επίπεδο NAS, επειδή δεν υπάρχει απευθείας σύνδεση μεταξύ του τερματικού UE και του Core Network, παρά μόνο έμμεσα μέσω του δικτύου πρόσβασης UTRAN, αξιοποιείται το επίπεδο AS και ο ελεγκτής RNC προωθεί ουσιαστικά την σηματοδότηση του επιπέδου NAS στο Core Network.

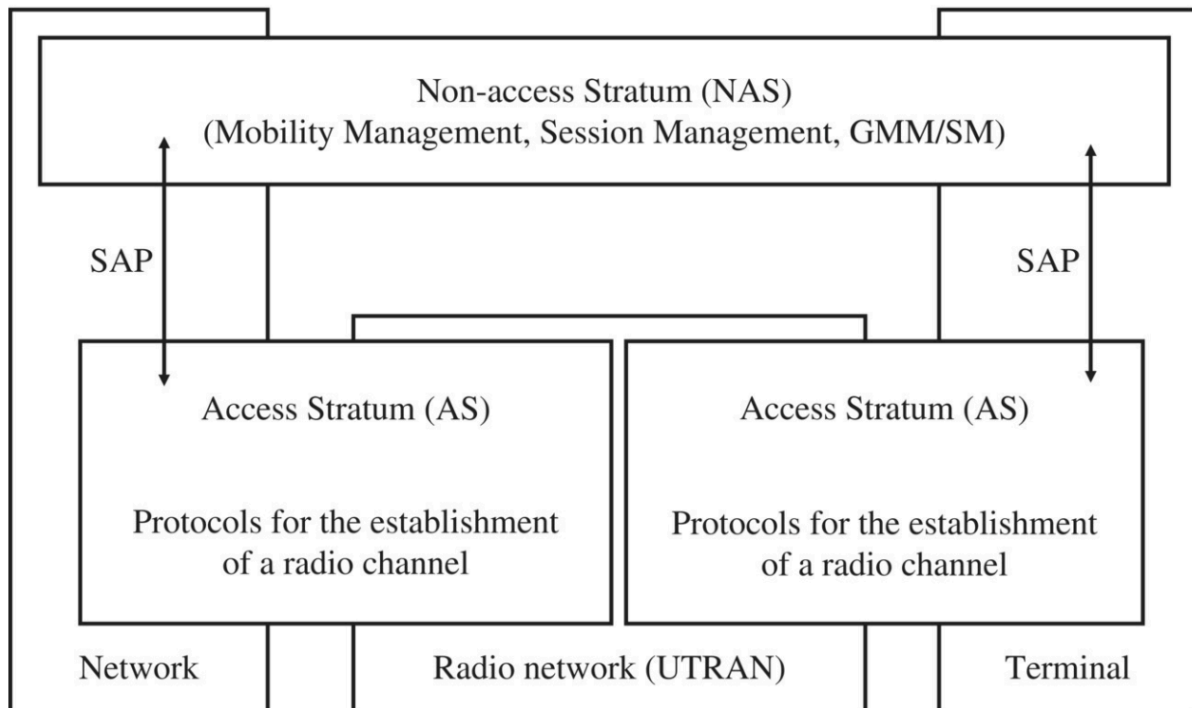
---

<sup>121</sup> Στο εξής: RNC

<sup>122</sup> Στο εξής: UE

<sup>123</sup> Στο εξής: AS

<sup>124</sup> Στο εξής: NAS



Εικόνα 13: Επίπεδα AS και NAS στο σύστημα UMTS

Το σύστημα UMTS εισήγαγε την έννοια του Radio Access Bearer<sup>125</sup>, το οποίο υπάρχει και στις επόμενες γενιές κινητής. Αποτελεί στην ουσία το νοητό φορέα ανάμεσα στον συνδρομητή και το δίκτυο για την μετάδοση των δεδομένων. Η έννοια αυτή του φορέα διευκολύνει την διαχείριση των πόρων ανάλογα την περίπτωση, δεδομένου ότι κάθε φορέας RAB χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

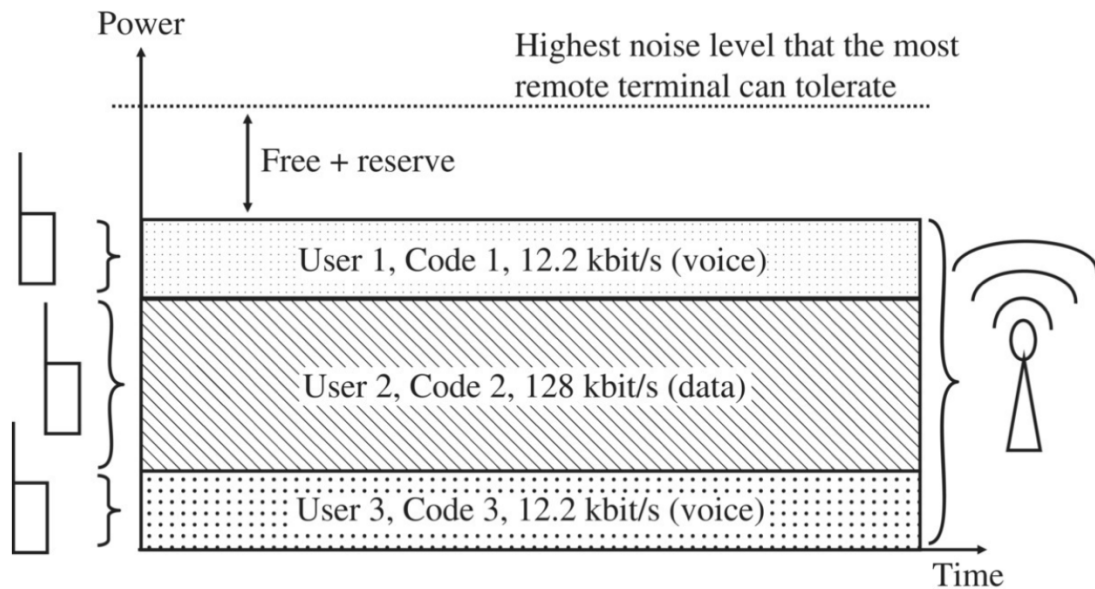
- Κλάση υπηρεσίας (service class)
- Μέγιστη ταχύτητα (maximum speed)
- Εγγυημένη ταχύτητα (guaranteed speed)
- Καθυστέρηση (delay)
- Πιθανότητα σφάλματος (error probability)

Δεδομένου ότι το σύστημα UTRAN είναι εντελώς νέο, η παλιά μορφή του συστήματος GSM με την διαίρεση πολυπλεξίας TDMA και FDMA και την αξιοποίηση καναλιών εύρους 200 kHz δεν υφίσταται πλέον. Αντιθέτως γίνεται χρήση της διαίρεσης πολυπλεξίας CDMA. Στην ουσία το δίκτυο πρόσβασης UTRAN εκπέμπει σε μία συγκεκριμένη συχνότητα, δηλαδή έχει ένα μόνο κανάλι μεγάλου εύρους με το οποίο επικοινωνεί με τα τερματικά UE, τα οποία είναι συνδεδεμένα με αυτό. Για αυτό και στο σύστημα UMTS η διαίρεση πολυπλεξίας CDMA ονομάζεται Wideband CDMA<sup>126</sup>.

<sup>125</sup> Στο εξής: RAB

<sup>126</sup> Στο εξής: WCDMA

Κάθε τερματικό UE έχει τη δικιά του ακολουθία μικροστοιχείων, με βάση την οποία μορφοποιεί την πληροφορία που θέλει να στείλει, πριν την μετάδοσή. Ο σταθμός βάσης nodeB λαμβάνει όλες τις μεταδόσεις των τερματικών UE, και γνωρίζοντας εκ των προτέρων την ακολουθία μικροστοιχείων κάθε συνδρομητή, χρησιμοποιεί την αντίστροφη μαθηματική διαδικασία από αυτή που εφάρμοσε το τερματικό UE, και έτσι λαμβάνει την αρχική πληροφορία που απέστειλε ο συνδρομητής. Να σημειωθεί ότι οι ακολουθίες μικροστοιχείων στα πλαίσια ενός καναλιού πρέπει να είναι διαχωρίσιμες μεταξύ τους, δηλαδή να πληρούν κάποιες προϋποθέσεις.



Εικόνα 14: Πολυπλεξία WCDMA και ακολουθίες μικροστοιχείων (chip sequences)

Η πολυπλεξία WCDMA έχει την εξής ιδιαιτερότητα. Όταν ο σταθμός βάσης nodeB επικοινωνεί με λίγα τερματικά UE, τότε η παρεμβολή των σημάτων μεταξύ τους είναι μικρή και έτσι η ισχύς εκπομπής δεν χρειάζεται να είναι μεγάλη. Επίσης η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι μεγάλη, καθώς το ευρύ κανάλι διαμοιράζεται από λίγα τερματικά UE. Η αύξηση της ταχύτητας γίνεται με την αύξηση ισχύος, καθώς η παρεμβολή ήταν εξαρχής μικρή. Όταν ο αριθμός των συνδρομητών σε μία κυψέλη είναι μεγάλος, τότε η παρεμβολή είναι μεγαλύτερη και έτσι η ταχύτητα που επιτυγχάνεται είναι μικρότερη. Επιπλέον, λόγω των παρεμβολών, η ταχύτητα των τερματικών UE στα απομακρυσμένα σημεία μειώνεται εξαιρετικά πολύ έως και σε σημείο να χάνεται η κάλυψη.

Ακόμη, υπάρχει η επίδραση κοντινής μακρινής απόστασης (near far effect). Οι συνδρομητές που βρίσκονται πιο μακριά στην κυψέλη, πρέπει να εκπέμπουν με μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τους κοντινούς, καθώς το σήμα εξασθενεί ανάλογα την απόσταση. Το σύστημα UMTS έχει τόσο μεγάλη ευαισθησία στην ισχύ μετάδοσης, ώστε ο σταθμός βάσης nodeB μπορεί να χρειαστεί να αλλάξει την ισχύ μετάδοσης ενός τερματικού UE έως και 1500 φορές το δευτερόλεπτο.

Το δίκτυο πρόσβασης UTRAN χαρακτηρίζεται και από το φαινόμενο αναπνοής κυψέλης (cell breathing). Η ακτίνα κάλυψης ενός σταθμού βάσης nodeB εξαρτάται από τον αριθμό των συνδρομητών που διαχειρίζεται και έτσι δεν είναι σταθερή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ελάχιστη ισχύ μετάδοσης εξαρτάται από τον αριθμό των ταυτόχρονα συνδεδεμένων τερματικών UE. Όσο περισσότερα εκπέμπουν, τόσο μεγαλύτερη η

ελάχιστη ισχύς μετάδοσης. Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η ισχύς εξασθενεί με βάση την απόσταση, γίνεται αντιληπτό ότι ενώ ένα τερματικό UE μπορεί να καλύψει αυτή την ελάχιστη ισχύ μετάδοσης, η προσθήκη νέων τερματικών UE μπορεί να την αυξήσει σε επίπεδα που να μην είναι εφικτό να καλυφθεί πλέον.

Για την αποφυγή τέτοιων καταστάσεων, δηλαδή η είσοδος ενός τερματικού UE να οδηγήσει στον τερματισμό της σύνδεσης ενός απομακρυσμένου, το σύστημα ελέγχει εκ των προτέρων αν η προσθήκη ενός τερματικού UE θα οδηγούσε σε τερματισμό μία ήδη υπάρχουσας σύνδεσης, δεδομένου ότι ο ελεγκτής RNC καθορίζει την ισχύ μετάδοσης κάθε τερματικού UE, καθώς γνωρίζει τη μέγιστη τιμή ισχύος. Ένας άλλος τρόπος είναι να μεταβάλει την ακολουθία μικροστοιχείων των συνδρομητών, μειώνοντας έτσι την ταχύτητα των συνδρομητών, ώστε να είναι δυνατή η προσθήκη νέων, χωρίς την δημιουργία διακοπών.

Μία μεγάλη βελτίωση του συστήματος UMTS είναι στο επίπεδο της καθυστέρησης για την εγκαθίδρυση συνεδριών και την μεταφορά δεδομένων. Ενώ στο σύστημα GSM υπάρχει μεγάλη καθυστέρηση, της τάξης των εκατοντάδων χιλιοστών του δευτερολέπτου για την ανάθεση πόρων, στο σύστημα UMTS αυτός ο χρόνος μειώνεται αισθητά και είναι κάτι που ωφελεί κυρίως την μεταφορά δεδομένων, που χαρακτηρίζεται ως ριπαία κίνηση (bursty traffic).

Όπως και στο σύστημα GSM, ο σταθμός βάσης NodeB χωρίζεται σε επιμέρους τομείς. Σε κάθε τομέα υπάρχει μία κυψέλη που έχει ανεξάρτητο κώδικα περίπλεξης. Όπως αναφέρθηκε ήδη, κάθε σταθμός nodeB ελέγχεται από έναν ελεγκτή RNC. Η σύνδεση ανάμεσα στο σταθμό βάσης NodeB και τον ελεγκτή RNC γίνεται μέσω της διεπαφής  $I_{ub}$ . Στο  $I_{ub}$  χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο Node-B Application Part<sup>127</sup>, μέσω του οποίου γίνεται η διαχείριση των κυψελών, των καναλιών σε κάθε κυψέλη, καθώς και η μεταφορά σηματοδοσίας και μετρήσεων.

Ο ελεγκτής RNC συνδέεται με το Core Network με της διεπαφής  $I_u$ . Στο  $I_u$  υπάρχει το πρωτόκολλο Radio Access Network Application Part<sup>128</sup>. Πιο αναλυτικά, τομέας του δικτύου μεταγωγής παραμένει αυτούσιος, δηλαδή έχουμε και πάλι το κέντρο MSC/VLR στο οποίο προωθούνται οι κλήσεις. Η διεπαφή σύνδεσης του ελεγκτή RNC με το κέντρο MSC ονομάζεται  $I_{u(cs)}$ . Χαρακτηριστικό της επαναχρησιμοποίησης του κέντρου MSC, είναι ότι μπορεί να συνδεθεί με BSS και ελεγκτές RNC ταυτόχρονα, με τις διεπαφές A και  $I_{u(cs)}$  αντίστοιχα. Συνολικά, ένα ελεγκτής RNC μαζί με τους σταθμούς βάσης NodeB που διαχειρίζεται απρτίζουν το σύστημα Radio Network Sub-system<sup>129</sup>. Εκτός των διεπαφών που προαναφέρθηκαν, υπάρχει και τη διεπαφή  $I_{ur}$  που συνδέει τα συστήματα RNS μεταξύ τους και πιο συγκεκριμένα τους ελεγκτές RNC σε κάθε σύστημα RNS.

Τα συστήματα του GPRS χρησιμοποιούνται με μικρές διαφορές. Η σύνδεση του ελεγκτή RNC με το κέντρο SGSN γίνεται μέσω της διεπαφής  $I_{u(ps)}$ . Πλέον η μετάδοση δεδομένων μεταξύ του κέντρου SGSN και του ελεγκτή RNC γίνεται μέσω πακέτων

---

<sup>127</sup> Στο εξής: NBAP

<sup>128</sup> Στο εξής: RANAP

<sup>129</sup> Στο εξής: RNS

τύπου GPRS Tunneling Protocol<sup>130</sup>, ενώ στο σύστημα GSM το κέντρο SGSN έπρεπε να πραγματοποιεί μετατροπή σε πακέτα τύπου Base Station System GPRS Protocol<sup>131</sup>.

Το σύστημα UMTS βελτίωσε και την ασφάλεια. Ενώ στο σύστημα GSM το δίκτυο πραγματοποιούσε τον έλεγχο της ταυτότητας του συνδρομητή, πλέον ισχύει και ο αντίστροφος έλεγχος, δηλαδή και ο συνδρομητής ελέγχει την ταυτότητα του δικτύου. Έτσι αποτρέπονται επιθέσεις όπου ο επιτιθέμενος μιμείται ένα σύστημα RNS, και προσπαθεί να υποκλέψει πληροφορίες μέσω επιθέσεων man-in-the-middle. Ακόμη προστέθηκαν νέοι ισχυρότεροι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης, καθώς ανακαλύφθηκαν ευπάθειες στους ήδη υπάρχοντες αλγόριθμους του συστήματος GSM.

Ενώ το σύστημα UMTS χρησιμοποιούσε το αρχικό σύστημα NSS του GSM με τις απαραίτητες αλλαγές για την υποστήριξη του νέου δικτύου πρόσβασης UTRAN, από την Release 4 της κοινοπραξίας 3GPP εισήχθη η δυνατότητα του Bearer-Independent Core Network<sup>132</sup> [12]. Στην ουσία, πλέον χρησιμοποιούνται πακέτα IP για την μεταφορά και της φωνής στο Core Network, οπότε πλέον το δίκτυο δεν είναι ένα δίκτυο κυκλωματομεταγωγής από άκρο σε άκρο. Για να γίνει αυτό εφικτό, το κέντρο MSC έχει χωριστεί σε 2 ξεχωριστές δικτυακές οντότητες, το κέντρο MSC-Server<sup>133</sup> και το κέντρο MSC-Gateway<sup>134</sup>, τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω της διεπαφής Mc. Το κέντρο MSC-S ασχολείται με τον έλεγχο κλήσης και την διαχείριση της κινητικότητας των συνδρομητών, ενώ το κέντρο MGW ασχολείται με την κίνηση, δηλαδή τα πακέτα του συνδρομητή. Στο κέντρο MGW πραγματοποιείται η μετατροπή των δεδομένων κυκλωματομεταγωγής σε πακέτα IP και προωθούνται σε άλλο κέντρο MGW. Αν το άλλο άκρο είναι και αυτό τύπου κυκλωματομεταγωγής, τότε γίνεται η αντίστροφη διαδικασία. Για λόγους πλεονασμού και κατανομής φόρτου, χρησιμοποιείται μια αρχιτεκτονική πλέγματος για την συνδεσιμότητα μίας ομάδας κέντρων MCS-S με μία ομάδα κέντρων MGW. Έτσι, στην περίπτωση που αποτύχει ένα κέντρο MCS-S, το κέντρο MGW συνεχίζει να δουλεύει με άλλο κέντρο MCS-S της ίδιας ομάδας.

Η πρώτη αύξηση στην ταχύτητα του συστήματος UMTS επετεύχθη με την επέκταση High-Speed Downlink Packet Access<sup>135</sup>, όσον αφορά τις ταχύτητες λήψης δεδομένων, οι οποίες έφταναν μέχρι τα 14,4 megabit per second<sup>136</sup>, από τα 384 kbps που ήταν το μέγιστο με τη Release 99. Οι βελτιώσεις αυτές επικεντρώνονταν στο δίκτυο πρόσβασης UTRAN, και ουσιαστικά οι συνδρομητές δεν είχαν μόνο αποκλειστικά κανάλια, αλλά μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν και κοινά κανάλια για την μετάδοση της πληροφορίας. Εν συνεχεία, με τη Release 6, έγιναν προσθήκες και για την βελτίωση της ταχύτητας αποστολής δεδομένων με την επέκταση High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA), όπου η μέγιστη ταχύτητα αποστολής δεδομένων έφθασε τα 2 με 3 Mbps. Αυτές οι δύο

---

<sup>130</sup> Στο εξής: GTP

<sup>131</sup> Στο εξής: BSSGP

<sup>132</sup> Στο εξής: BICN

<sup>133</sup> Στο εξής: MCS-S

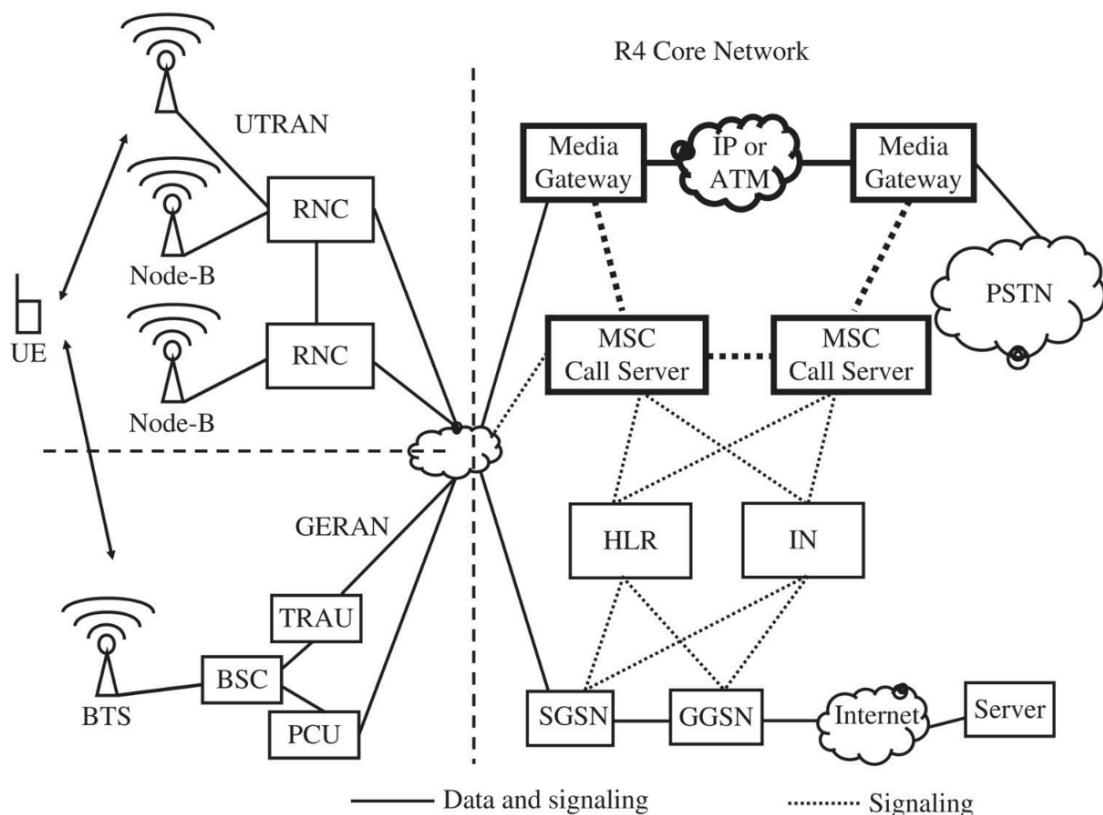
<sup>134</sup> Στο εξής: MGW

<sup>135</sup> Στο εξής: HSDPA

<sup>136</sup> Στο εξής: Mbps

Κατανομημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

επεκτάσεις στο σύστημα UMTS περιγράφονται συνδυαστικά ως High Speed Packet Access<sup>137</sup>.



Εικόνα 15: Αρχιτεκτονική συστήματος UMTS μαζί με GERAN και BICN

Με την επόμενη έκδοση της κοινοπραξίας του 3GPP, η επέκταση HSDPA βελτιώθηκε με την χρήση περισσότερων κεραιών και της τεχνικής Multiple Input Multiple Output<sup>138</sup>, καθώς και της χρήσης διαμόρφωσης 64-Quadrature Amplitude Modulation<sup>139</sup>. Οι μέγιστες ταχύτητες σε ιδεατές συνθήκες έφθαναν τα 21 με 28 Mbps. Στην επέκταση HSUPA η διαμόρφωση έφθανε μέχρι το 16-QAM, με τις ταχύτητες να είναι της τάξεως των 11,5 Mbps.

Με τη Release 7, πλέον έγιναν βελτιώσεις και στο Core Network του συστήματος UMTS. Ενώ παλαιότερα τα δεδομένα από το σύστημα RNS περνούσαν προς το κέντρο GGSN διαμέσου του κέντρου SGSN, πλέον υπάρχει και η δυνατότητα τα δεδομένα να μεταφέρονται απευθείας στο κέντρο GGSN, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση μεταφοράς πακέτων. Επιπλέον οι απαιτήσεις στο κέντρο SGSN μειώνονται, καθώς πλέον διαχειρίζεται μόνο την διαχείριση κινητικότητας των συνδρομητών και τις συνεδρίες τους, χωρίς να χρειάζεται να προωθεί τα πακέτα στο κέντρο GGSN. Έτσι με αυτόν τον τρόπο το επίπεδο χρήστη δεν υφίσταται πλέον στο SGSN.

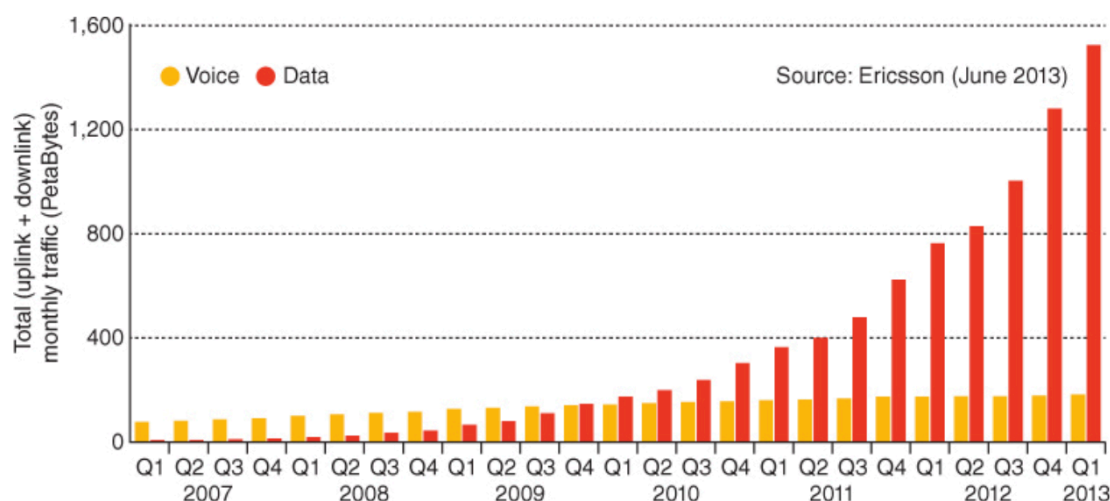
<sup>137</sup> Στο εξής: HSPA

<sup>138</sup> Στο εξής: MIMO

<sup>139</sup> Στο εξής: 64-QAM

### 3. Δίκτυα τέταρτης γενιάς – 4G

Για πολλά χρόνια, οι τηλεφωνικές κλήσεις αποτελούσαν την κυρίαρχη υπηρεσία των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Αν και η δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων προϋπήρχε ήδη από τη 2G και εξελίχθηκε περαιτέρω στη 3G με την δυνατότητα πραγματοποίησης κλήσεων μέσω βίντεο, καθώς και πλοήγησης στο διαδίκτυο, η ανάπτυξη αυτού του τύπου της κίνησης χαρακτηριζόταν από αργό μεν αλλά σταθερό ρυθμό μέχρι το 2010. Από το 2010 και έπειτα η εξέλιξη ήταν ραγδαία, όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 16: Γράφημα ανάπτυξης της κίνησης υπηρεσιών φωνής και δεδομένων

Εκτός όμως από την αλλαγή του τρόπου χρήσης των κινητών από τους συνδρομητές λόγω της έλευσης των έξυπνων κινητών, και οι ίδιοι οι φορείς κινητής τηλεφωνίας, οι οποίοι είχαν πλέον δύο διαφορετικούς τομείς δικτύων να συντηρήσουν, ήτοι το τομέα κυκλωματομεταγωγής για τις φωνητικές κλήσεις και το τομέα πακετομεταγωγής για την μεταφορά δεδομένων, αναζητούσαν τρόπους για τη μείωση του κόστους συντήρησης και διαχείρισης του δικτύου. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με την αξιοποίηση μόνο του τομέα πακετομεταγωγής τόσο για φωνητικές κλήσεις όσο και για δεδομένα. Επειδή όμως η μεταφορά φωνής απαιτούσε μικρή καθυστέρηση, αυτό δεν ήταν εφικτό με το σύστημα UMTS. Η ανάγκη για βελτίωση σε αυτό το κομμάτι του δικτύου απαιτούσε την ανάπτυξη και εμφάνιση της 4G.

Επιπρόσθετα, οι τεχνικές προδιαγραφές των συστημάτων GSM και UMTS είχαν γίνει πλέον τόσο περίπλοκες λόγω της εισαγωγής νέων χαρακτηριστικών και της ταυτόχρονης ανάγκης για διατήρηση της συμβατότητας προς τα πίσω, που η εκ νέου δημιουργία ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας λαμβάνοντας υπόψη την εμπειρία από τις προηγούμενες γενιές θεωρήθηκε ότι θα ήταν καλύτερη επιλογή.

Για αυτούς τους λόγους, η κοινοπραξία 3GPP ξεκίνησε το 2004 τη μελέτη για την εξέλιξη του συστήματος UMTS, με κύριο μέλημα την βελτίωση της ταχύτητας μεταφοράς δεδομένων καθώς και τη μείωση της καθυστέρησης μεταφοράς πακέτων. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η κοινοπραξία ITU, όπως έπραξε με το IMT-2000 για τη 3G, δημοσίευσε το 2008 τις απαιτούμενες προδιαγραφές των δικτύων 4G υπό την ονομασία IMT-Advanced.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η κοινοπραξία 3GPP είχε αρχίσει ήδη να δουλεύει πυρετωδώς τον διάδοχο του συστήματος UMTS, τέσσερα χρόνια πριν την εμφάνιση των απαιτήσεων του IMT-Advanced. Η επίσημη εμφάνιση του διαδόχου του UMTS ονομάστηκε LTE και έγινε τον Δεκέμβριο του 2008 μέσω της Release 8. Αυτή η πρώτη έκδοση του LTE δεν πληρούσε όλες τις προδιαγραφές που είχε θέσει η κοινοπραξία ITU μέσω του IMT-Advanced, και για αυτό το λόγο δεν θεωρήθηκε αρχικά ως ένα πραγματικό δίκτυο 4G. Πολλές φορές η αρχική έκδοση του LTE εμφανίζεται στη βιβλιογραφία ως 3.9G ή 3.95G.

Τον Οκτώβριο του 2010, μόνο δύο συστήματα κινητών επικοινωνιών της 4G πληρούσαν τις προδιαγραφές του IMT-Advanced:

- Το LTE-Advanced, που είναι η έκδοση του LTE που πληρούσε τις προδιαγραφές για να χαρακτηριστεί ως 4G και εμφανίστηκε με τη Release 10
- Το WiMAX 2.0 IEEE 802.16m το οποίο είναι μια βελτιωμένη έκδοση του WiMAX, καθώς και εδώ η πρώτη έκδοσή του, δηλαδή το WiMAX 1.0 IEEE 802.16e, δεν πληρούσε τις προδιαγραφές για να χαρακτηριστεί ως ένα πραγματικό δίκτυο 4G

Από τα παραπάνω συστήματα, το καθολικά διαδεδομένο θεωρείται το LTE, σε βαθμό που πλέον και όσοι φορείς κινητής τηλεφωνίας είχαν επιλέξει αρχικά το WiMAX, αποφάσισαν τελικώς να πραγματοποιήσουν την μετάβαση στο LTE.

Η Qualcomm είχε σκοπό να αναπτύξει το διάδοχό του συστήματος cdma2000, γνωστό και ως Ultra Mobile Broadband<sup>140</sup>, αλλά δεδομένου ότι δεν υποστήριζε προς τα πίσω συμβατότητα με το σύστημα cdma2000 και επειδή πλέον και το LTE μπορούσε να λειτουργήσει σε μικρό εύρος φάσματος (narrowband), οι φορείς κινητής τηλεφωνίας δεν έδειξαν ενδιαφέρον για το εν λόγω σύστημα. Χωρίς την ύπαρξη ενδιαφέροντος αποφασίστηκε να τερματιστεί η ανάπτυξη του το 2008.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι ενώ η πρώτη έκδοση του LTE και η πρώτη έκδοση του WiMAX, δεν είχαν θεωρηθεί ως ένα πραγματικό δίκτυο 4G, σε εμπορικό επίπεδο οι φορείς κινητής τηλεφωνίας διαφημίζανε τα συγκεκριμένα δίκτυα ως 4G και για αυτόν τον λόγο τον Δεκέμβριο του 2010 η κοινοπραξία ITU αποδέχτηκε να θεωρήσει ως πραγματικό 4G το LTE στην αρχική του έκδοση και το WiMAX 1.0.

### 3.1.1 Το σύστημα EPS

Το σύστημα στη 4G το οποίο αναπτύχθηκε υπό την ομπρέλα της κοινοπραξίας 3GPP, είναι επίσημα γνωστό ως το σύστημα EPS. Η έρευνα και ανάπτυξη του έγινε με:

- Το System Architecture Evolution<sup>141</sup>, το οποίο αφορούσε το Core Network. Πλέον δεν υπάρχει τομέας κυκλωματομεταγωγής, αλλά μόνο πακετομεταγωγή. Η επίσημη ονομασία που επιλέχθηκε ήταν Evolved Packet Core<sup>142</sup>

---

<sup>140</sup> Στο εξής: UMB

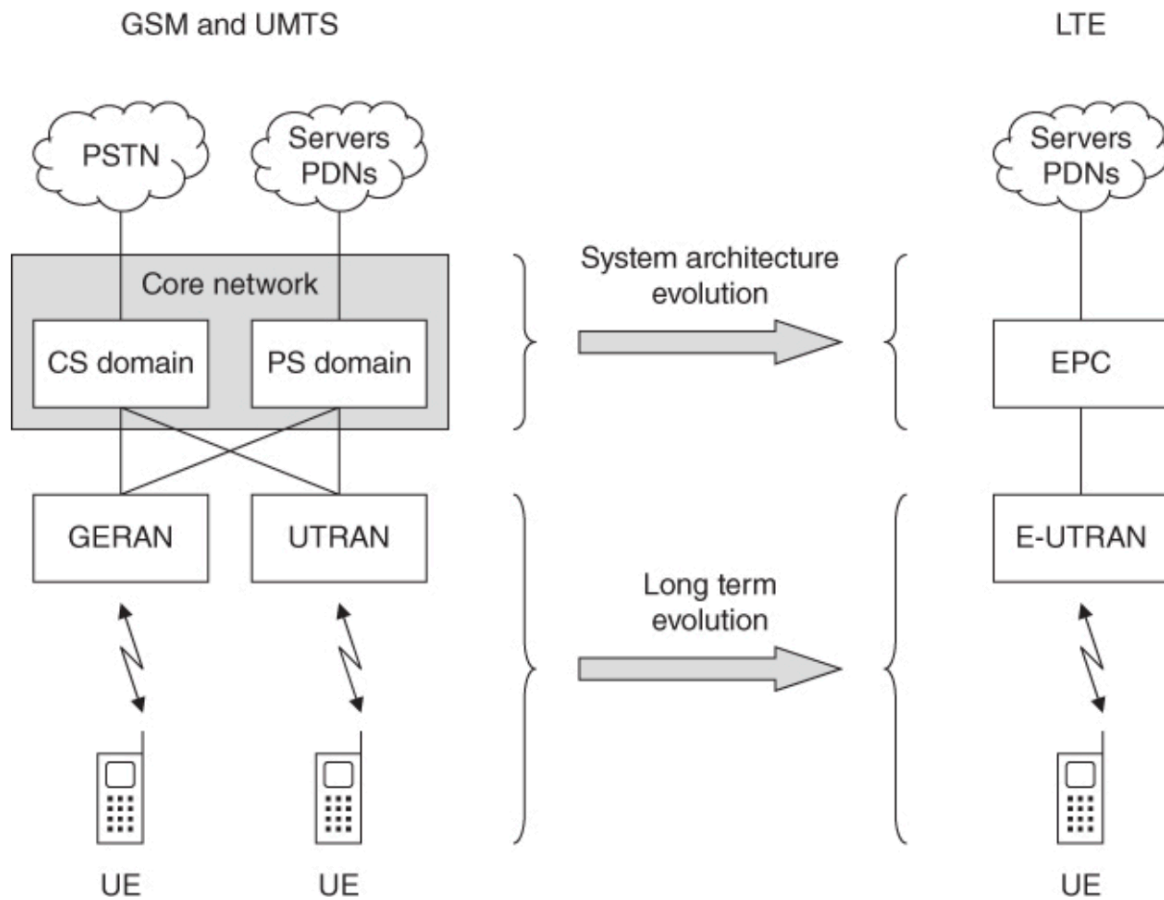
<sup>141</sup> Στο εξής: SAE

<sup>142</sup> Στο εξής: EPC



- Το LTE, το οποίο αφορούσε τους σταθμούς βάσης και τα τερματικά των χρηστών. Πιο αναλυτικά, ο διάδοχός του δικτύου πρόσβασης UTRAN ήταν το evolved UMTS terrestrial radio access network<sup>143</sup>, και το κινητό τερματικό συνεχίζει να ονομάζεται UE όπως και πριν, αν και είναι πλέον αναβαθμισμένο. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι ο όρος LTE ήταν τόσο διαδεδομένος που πολλές φορές στην βιβλιογραφία και όχι μόνο, συναντάται ως συνώνυμο του E-UTRAN ή και του EPS.

Συνολικά, όλο το σύστημα EPS αποτελείται από το EPC και το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται οπτικά αυτή η εξέλιξη από τα συστήματα GSM, UMTS προς το σύστημα EPS.



Εικόνα 17: Συστήματα GSM\GPRS, UMTS και η εξέλιξη προς το σύστημα EPS

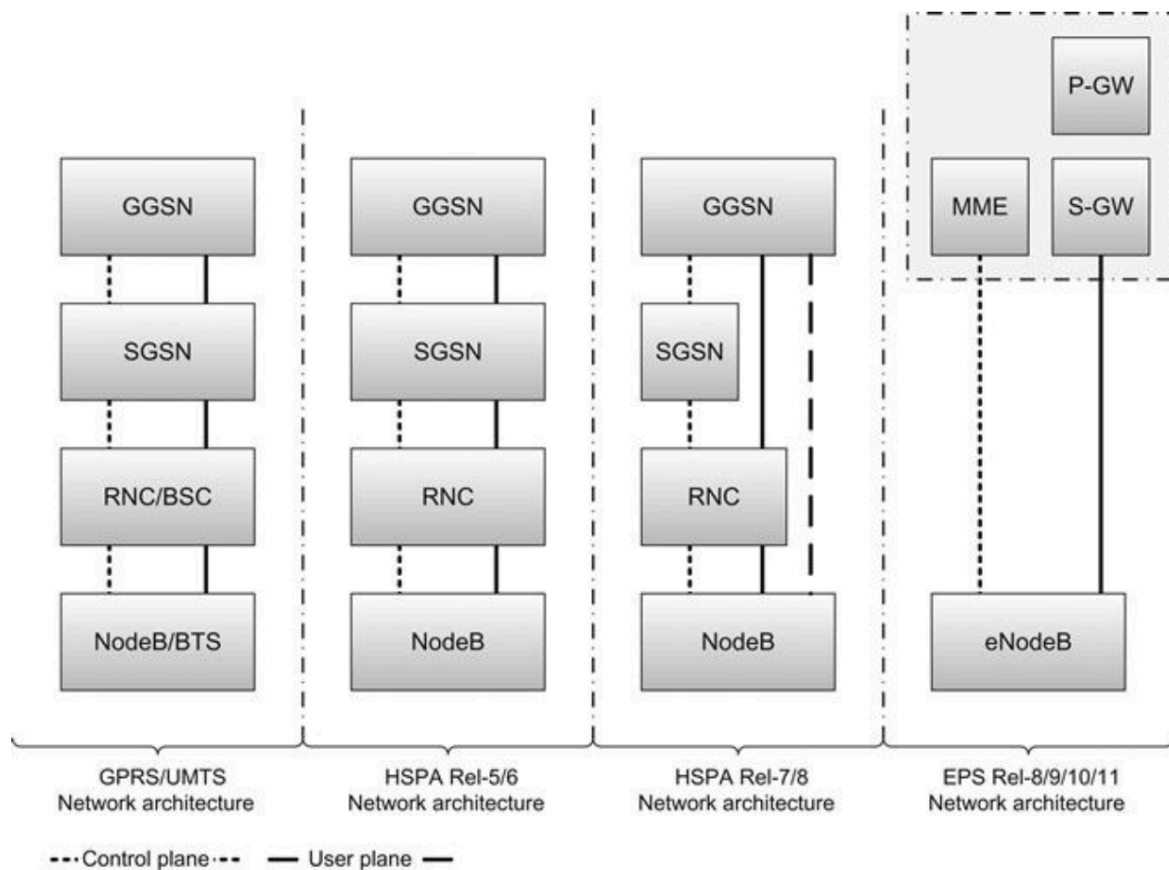
Οι στόχοι που είχαν τεθεί κατά την αρχική ανάπτυξη του LTE ήταν οι κάτωθι:

- Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στα 100 Mbps για λήψη δεδομένων.
- Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στα 50 Mbps για αποστολή δεδομένων.
- Τρεις έως τέσσερις φορές καλύτερη φασματική απόδοση από το σύστημα UMTS της Release 6.

<sup>143</sup> Στο εξής: E-UTRAN

- Μικρότερη καθυστέρηση μεταφοράς δεδομένων, η οποία θα πρέπει να είναι μικρότερη των 5 χιλιοστών του δευτερολέπτου μεταξύ του τερματικού UE και του δικτύου.
- Η αλλαγή της κατάστασης του τερματικού UE από αδρανή σε ενεργή θα πρέπει να ολοκληρώνεται εντός 100 χιλιοστών του δευτερολέπτου.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, οι παραπάνω στόχοι δεν πληρούσαν τις απαιτήσεις του IMT-Advanced για να θεωρηθεί ένα πραγματικό δίκτυο της 4G. Για αυτό το λόγο οι παραπάνω στόχοι αναθεωρήθηκαν στην συνέχεια.



**Εικόνα 18: Εξέλιξη πακετομεταγωγής από το GPRS/UMTS μέχρι το σύστημα EPS**

Οι αναθεωρημένοι στόχοι που τέθηκαν από τη νέα έκδοση του LTE, το LTE-Advanced, ήταν οι κάτωθι:

- Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στα 1000 Mbps για λήψη δεδομένων.
- Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων στα 500 Mbps για αποστολή δεδομένων.
- 4,5 έως 7 και 3,5 έως 6 φορές καλύτερη φασματική απόδοση από το σύστημα UMTS της Release 6 στη λήψη και αποστολή δεδομένων αντίστοιχα.

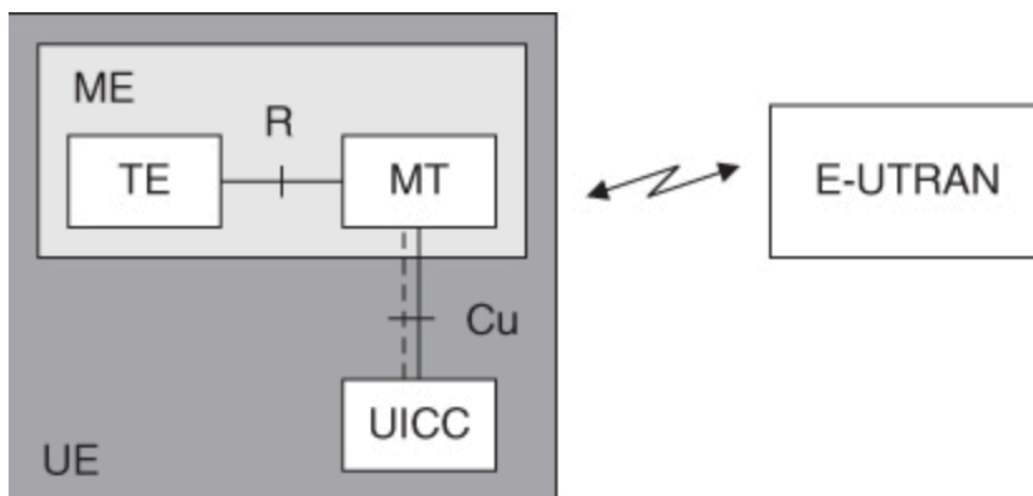
Το EPS υποστηρίζει λειτουργία τόσο ως ένα σύστημα συχνοδιαιρετικής αμφίδρομης επικοινωνίας<sup>144</sup> (Frequency Division Duplex) όσο και ως ένα σύστημα χρονοδιαιρετικής

<sup>144</sup> Στο εξής: FDD

αμφίδρομης επικοινωνίας<sup>145</sup> (Time Division Duplex) σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, από 410 MHz έως και 5855 MHz. Ο πλήρης πίνακας των διαθέσιμων συχνοτήτων αναφέρεται στο τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 36.101 [13]. Όσον αφορά την τεχνολογία πρόσβασης στο μέσο, το σύστημα EPS αξιοποιεί πολλαπλή πρόσβαση ορθογωνικής διαίρεσης συχνότητας<sup>146</sup> (orthogonal frequency-division multiple access) για τις καθοδικές ζεύξεις και FDMA απλού φέροντος<sup>147</sup> (Single Carrier FDMA) για τις ανοδικές ζεύξεις. Η επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων είναι ευέλικτη, και πλέον από την αρχή του EPS είναι δυνατή η χρήση κεραιών MIMO. Το εύρος των καναλιών είναι ευέλικτο από 1,4 MHz μέχρι και 20 MHz και πιο συγκεκριμένα τα κανάλια έχουν εύρος 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, και 20 MHz.

### 3.1.2 Το τερματικό του χρήστη - UE

Το τερματικό του χρήστη είναι γνωστό και πάλι ως UE [14]. Διαχωρίζεται στην κάρτα universal integrated circuit card<sup>148</sup> και την συσκευή που επικοινωνεί με το δίκτυο, το ME, όπως και στη 2G. Η κάρτα UICC, η οποία πολλές φορές αναφέρεται και ως κάρτα 3G SIM, ή αλλιώς γνωστή ως Release 99 USIM, είναι επί της ουσίας μία έξυπνη κάρτα στην οποία τρέχουν εφαρμογές. Η βασική εφαρμογή είναι η universal subscriber identity module<sup>149</sup>. Ουσιαστικά, η παλιά κάρτα SIM έχει αναβαθμιστεί και πλέον έχει αποσχιστεί η ίδια η κάρτα από το λογισμικό. Για την σύνδεση στο LTE, η χρήση της κάρτας UICC είναι υποχρεωτική πλέον, ενώ στο σύστημα UMTS ήταν προαιρετική και έτσι μπορούσε να γίνει σύνδεση και με μία κάρτα 2G SIM, ή αλλιώς γνωστή ως Release 99- SIM. Συνεπώς οι κάρτες 2G SIM δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σύστημα EPS.



Εικόνα 19: Διαχωρισμός τερματικού UE σε συσκευή ME και κάρτα UICC

<sup>145</sup> Στο εξής: TDD

<sup>146</sup> Στο εξής: OFDMA

<sup>147</sup> Στο εξής: SC-FDMA

<sup>148</sup> Στο εξής: UICC

<sup>149</sup> Στο εξής: USIM

Η συσκευή ME διαχωρίζεται στα δύο εξής τμήματα:

- Το τμήμα mobile termination<sup>150</sup>, που χειρίζεται τη σύνδεση με το δίκτυο
- Το τμήμα terminal equipment<sup>151</sup>, το οποίο πρακτικά λαμβάνει τα δεδομένα από το δίκτυο

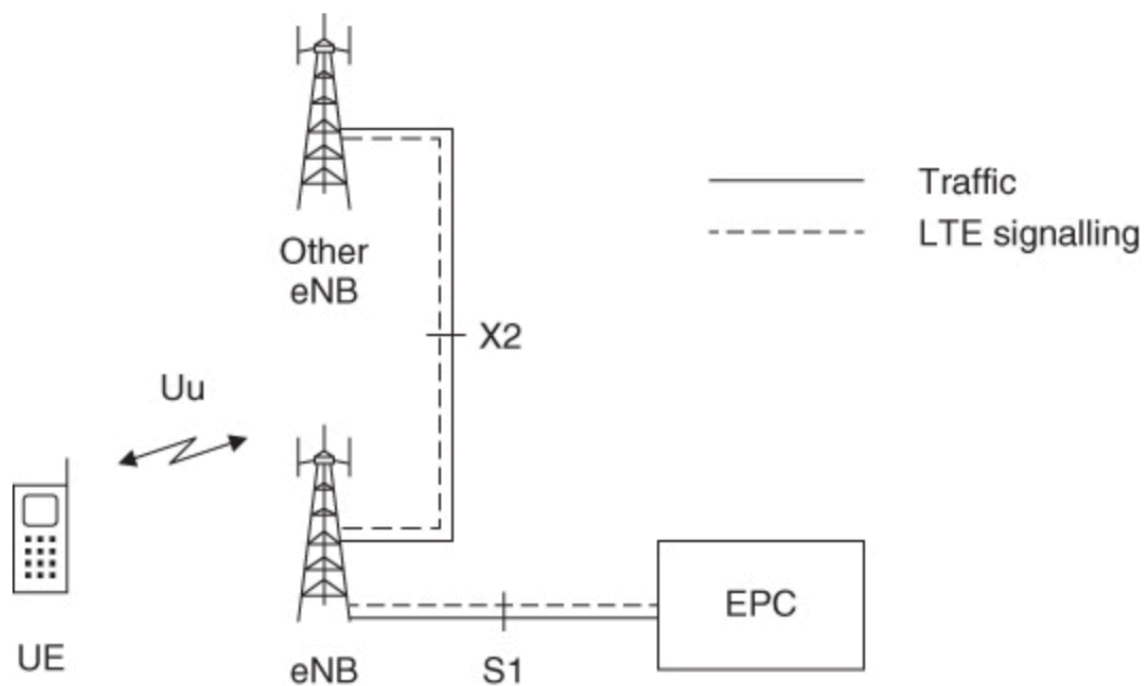
Τα τερματικά UE μπορούν να ομαδοποιηθούν σε συγκεκριμένες κατηγορίες ανάλογα:

- Την μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων
- Τις τεχνολογίες πρόσβασης που υποστηρίζουν
- Τις συχνότητες που υποστηρίζουν
- Την υποστήριξη προαιρετικών δυνατοτήτων που ορίζονται από τις τεχνικές προδιαγραφές

Αυτές οι ομάδες ονομάζονται κατηγορίες UE (UE categories).

### 3.1.3 Το δίκτυο πρόσβασης - E-UTRAN

Το δίκτυο πρόσβασης στη 4G [15] αποτελείται πλέον από ένα μόνο κόμβο σε αντίθεση με το σύστημα UMTS. Ενώ πριν είχαμε τον σταθμό βάσης NodeB και τον ελεγκτή RNC, πλέον ο σταθμός βάσης αναβαθμίζεται σε ένα βελτιωμένο σταθμό βάσης enhanced-NodeB<sup>152</sup>:



Εικόνα 20: Δίκτυο πρόσβασης στο σύστημα EPS

<sup>150</sup> Στο εξής: MT

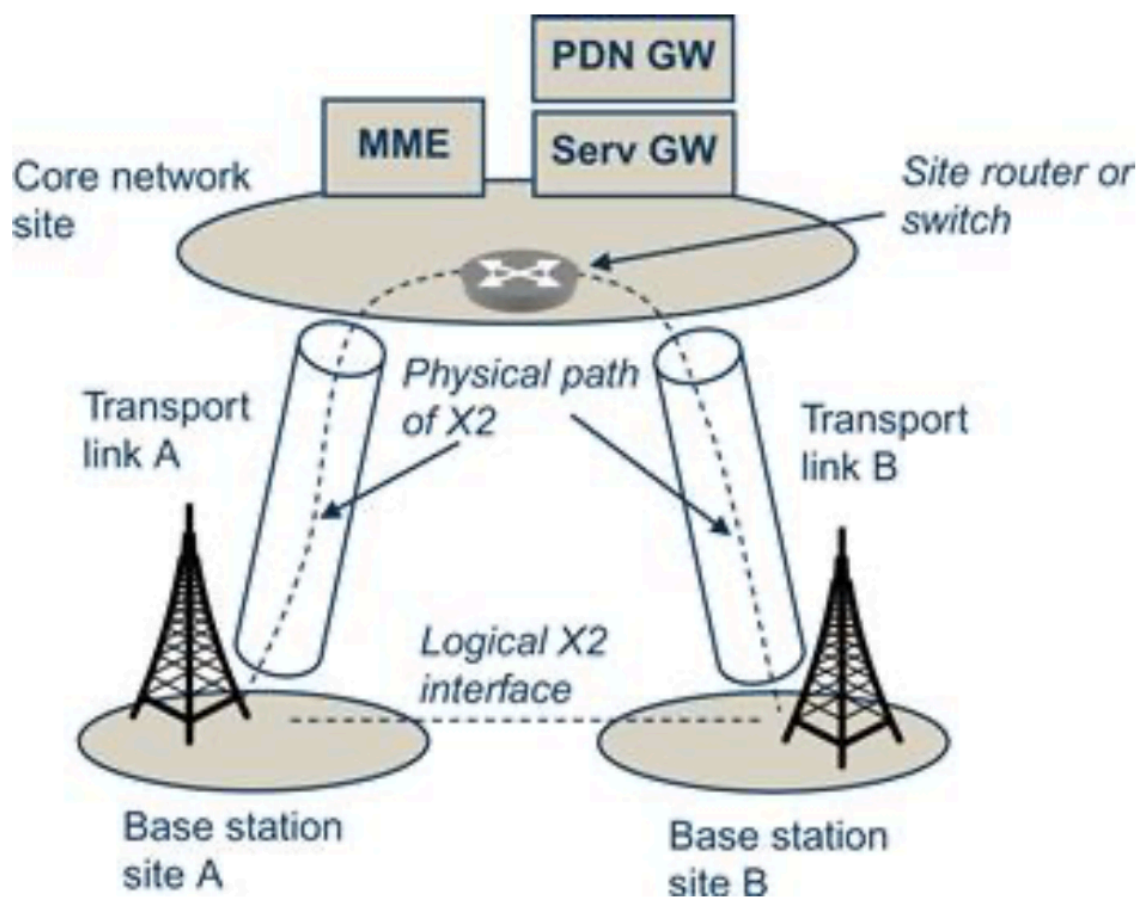
<sup>151</sup> Στο εξής: TE

<sup>152</sup> Στο εξής: eNB ή eNodeB

Η χρήση ενός μόνο κόμβου ως σταθμού βάσης έγκειται στην επιθυμία για τη μείωση της καθυστέρησης κατά τη διαδικασία σηματοδότησης για μεταπομπές και άλλες διαδικασίες. Πλέον ο σταθμός eNodeB επικοινωνεί με τα τερματικά UE και χρησιμοποιεί τα αντίστοιχα μηνύματα σηματοδότησης για τον έλεγχο διαφόρων λειτουργιών.

Κάθε σταθμός βάσης eNodeB [15] συνδέεται με το Core Network μέσω της διεπαφής S1, και πιο συγκεκριμένα το S1-MME για το επίπεδο ελέγχου και με το S1-U για το επίπεδο χρήστη. Υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης των σταθμών eNodeB μεταξύ τους μέσω της διεπαφής X2, το οποίο είναι προαιρετικό όμως, καθώς χρησιμοποιείται μόνο από γειτονικούς σταθμούς eNodeB κατά τη διαδικασία μεταπομπής, και έτσι οι αυτές λειτουργίες μπορεί να πραγματοποιηθούν και με τη συμβολή του Core Network μέσω της διεπαφής S1.

Οι διεπαφές S1 και X2 είναι λογικές οντότητες και όχι φυσικές οντότητες. Αυτό σημαίνει ότι η διεπαφή X2 δεν είναι μία φυσική σύνδεση μεταξύ 2 σταθμών βάσης eNodeB, καθώς αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του κατάλληλου δρομολογητή στο δίκτυο, όπως φαίνεται σχηματικά και παρακάτω:



Εικόνα 21: Διεπαφή X2 μέσω φυσικών μονοπατιών με δρομολογητή

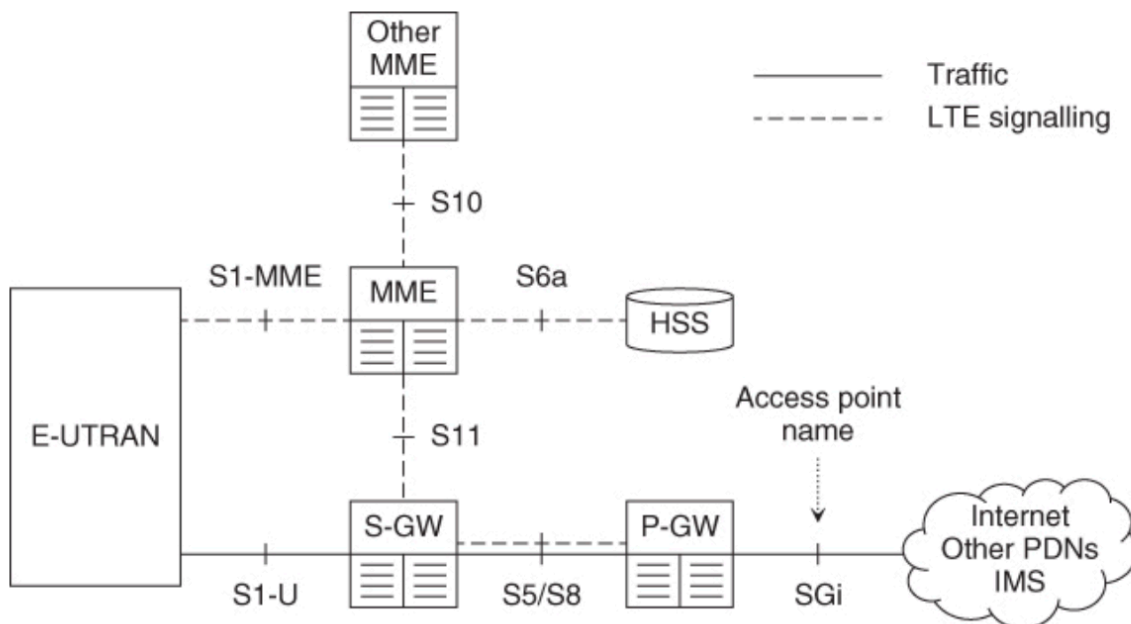
Πλέον υπάρχει η δυνατότητα χρήσης κυψελών τύπου φεμτο, μέσω μικρών οικιακών σταθμών eNB, γνωστά και ως Home eNB<sup>153</sup>. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί eNB καλύπτουν

<sup>153</sup> Στο εξής: HeNB

μια πάρα πολύ μικρή περιοχή προσφέροντας αυξημένες ταχύτητες και τοποθετούνται στην οικία του συνδρομητή, μειώνοντας έτσι τον φόρτο στο κύριο δίκτυο του φορέα κινητής τηλεφωνίας. Αποτελούνται από μία μόνο κυψέλη και έχουν χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Για την σύνδεση σε ένα τέτοιο σταθμό βάσης απαιτείται η ύπαρξη του συνδρομητή σε μια συγκεκριμένη ομάδα γνωστή και ως Closed Subscriber Group<sup>154</sup>. Η σύνδεση του σταθμού HeNB με το Core Network μπορεί να γίνει είτε άμεσα μέσω της διεπαφής S1 είτε έμμεσα μέσω της χρήσης ενός κόμβου home eNB gateway.

### 3.1.4 Το Δίκτυο-πυρήνα - EPC

Το EPC [14][16][17][18] είναι ένα δίκτυο βασισμένο αποκλειστικά σε IP διευθυνσιοδότηση και υποστηρίζει συνεχής συνδεσιμότητα, δηλαδή η μεταφορά δεδομένων είναι διαθέσιμη για όσο είναι συνδεδεμένο το τερματικό UE ακόμη και όταν είναι αδρανές. Αυτό είναι μια βασική διαφορά σε σχέση με τον προκάτοχό του, όπου το τερματικό UE μετά την αρχική του σύνδεση ενεργοποιούσε ρητά κατά απαίτηση την επικοινωνία μέσω δεδομένων. Επιπρόσθετα, καθώς η εγκαθίδρυση του συστήματος EPS θα οδηγούσε στη συνύπαρξη 2G, 3G και 4G, το EPS υποστηρίζει μεταπομπή από και προς τα δίκτυα της 2G και 3G καθώς και προς τα δίκτυα non-3GPP, όπως το σύστημα cdma2000.



Εικόνα 22: Διεπαφές στο Δίκτυο-πυρήνα EPC

Η κεντρική οντότητά του Core Network που πρακτικά ελέγχει όλη τη σηματοδότηση είναι ο κόμβος mobility management entity<sup>155</sup>. Είναι πρακτικά ο διάδοχος του κέντρου SGSN όσον αφορά λειτουργίες που αφορούν την ασφάλεια, την ταυτοποίηση του συνδρομητή, την διαχείριση της κινητικότητας των συνδρομητών στο δίκτυο, κ.α. Σε ένα δίκτυο μπορεί να υπάρχουν πολλοί κόμβοι MME, αλλά αξίζει να τονιστεί ότι το τερματικό UE

<sup>154</sup> Στο εξής: CSG

<sup>155</sup> Στο εξής: MME

συσχετίζεται κάθε φορά με ένα, το οποίο δύναται να αλλάξει ανάλογα την περιοχή στην οποία βρίσκεται, καθώς κάθε ένας κόμβος MME ελέγχει ένα συγκεκριμένο μέρος του δικτύου. Η σύνδεση του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN με τον κόμβο MME υλοποιείται μέσω της διεπαφής S1-MME.

Η κεντρική βάση δεδομένων των συνδρομητών είναι η Home Subscriber Server<sup>156</sup>, η οποία περιλαμβάνει πληροφορίες για όλους τους συνδρομητές του δικτύου. Στο κόμβο packet data network gateway<sup>157</sup>, πραγματοποιείται ουσιαστικά η σύνδεση του δικτύου κινητής με άλλα δίκτυα όπως το διαδίκτυο ή άλλα μισθωμένα κυκλώματα. Η σύνδεση αυτή με τον εξωτερικό κόσμο γίνεται μέσω της διεπαφής SGI, και κάθε τέτοιο εξωτερικό δίκτυο ονομάζεται Packet Data Network<sup>158</sup>. Ο διαχωρισμός μεταξύ διαφορετικών δικτύων PDN γίνεται μέσω ενός συγκεκριμένου ονόματος, του access point name<sup>159</sup>. Ένα τερματικό UE μπορεί να χρησιμοποιήσει πολλά δίκτυα PDN παράλληλα όμως κατά την αρχική του σύνδεση με το δίκτυο πάντα ενεργοποιείται το προεπιλεγμένο δίκτυο PDN του συνδρομητή με βάση το προεπιλεγμένο APN, και το τερματικό UE μπορεί να στείλει δεδομένα απευθείας και έτσι υλοποιείται η συνεχής συνδεσιμότητα των συνδρομητών. Ο κόμβος PGW αποτελεί ουσιαστικά τον διάδοχο του κέντρου GGSN, που είδαμε στο σύστημα GPRS.

Ο κόμβος serving Gateway<sup>160</sup> λειτουργεί σαν ένας δρομολογητής, που προωθεί τα πακέτα των συνδρομητών από το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN προς τον κόμβο PGW. Ένα δίκτυο εμπεριέχει πολλούς κόμβους SGW, οι οποίοι καλύπτουν συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, και προφανώς μπορεί να αλλάξουν κατά την κινητικότητα των συνδρομητών στο δίκτυο. Κάθε συνδρομητής έχει μόνο έναν κόμβο SGW συσχετισμένο. Η σύνδεση του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN με τον κόμβο SGW υλοποιείται μέσω της διεπαφής S1-U. Ο κόμβος SGW είναι ουσιαστικά η εξέλιξη του κέντρου SGSN όσον αφορά το κομμάτι της προώθησης των πακέτων. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν δύο ξεχωριστές οντότητες με τις λειτουργίες που προϋπήρχαν σε μια, είναι για λόγους ευελιξίας όσον αφορά τις δυνατότητες κλιμάκωσης, οι οποίες είναι διαφορετικές για την σηματοδότηση του δικτύου και άλλες για την κίνηση των συνδρομητών. Ουσιαστικά η διαχείριση του επιπέδου ελέγχου του κέντρου SGSN γίνεται πλέον από τον κόμβο MME και του επιπέδου χρήστη από τον κόμβο SGW.

Όπως και στα δίκτυα προηγούμενης γενιάς, υπάρχει δυνατότητα περιαγωγής των συνδρομητών σε άλλα δίκτυα εκτός από το πάτριο δίκτυο τους. Πιο αναλυτικά, η βάση HSS ανήκει πάντα στο δίκτυο του συνδρομητή ενώ οι κόμβοι MME και SGW ανήκουν πάντα στο δίκτυο επίσκεψης (visited network). Ο κόμβος PGW μπορεί να ανήκει είτε στο πάτριο δίκτυο είτε στο δίκτυο επίσκεψης και εξαρτάται από τις ρυθμίσεις του APN και τις προεπιλογές των φορέων κινητής τηλεφωνίας. Οι δυνατές επιλογές στα πλαίσια μίας σύνδεσης PDN είναι:

---

<sup>156</sup> Στο εξής: HSS

<sup>157</sup> Στο εξής: PGW

<sup>158</sup> Στο εξής: PDN

<sup>159</sup> Στο εξής: APN

<sup>160</sup> Στο εξής: SGW

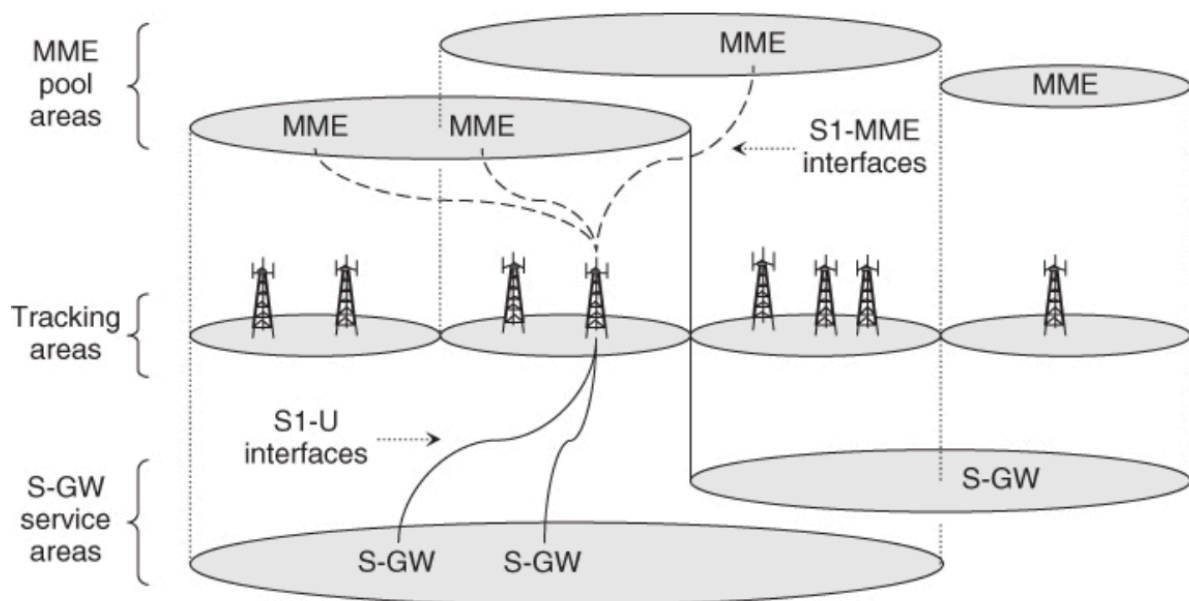
- Η περίπτωση Home Routed Traffic<sup>161</sup> όταν κατά την εγκαθίδρυση της σύνδεσης του PDN χρησιμοποιείται ένας κόμβος PGW που ανήκει στο δίκτυο του συνδρομητή. Σε αυτή την περίπτωση η διεπαφή μεταξύ του κόμβου PGW στο και του κόμβου SGW ονομάζεται S8.
- Η περίπτωση Local Breakout<sup>162</sup> όταν κατά την εγκαθίδρυση της σύνδεσης του PDN χρησιμοποιείται ένας κόμβος PGW που ανήκει στο δίκτυο επίσκεψης. Σε αυτή την περίπτωση η διεπαφή μεταξύ του κόμβου PGW στο δίκτυο επίσκεψης και του κόμβου SGW ονομάζεται S5.

Γενικότερα η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων PGW και SGW πραγματοποιείται μέσω:

- Της διεπαφής S5 όταν οι κόμβοι PGW και SGW ανήκουν στο ίδιο δίκτυο
- Της διεπαφής S8 όταν οι κόμβοι PGW και SGW ανήκουν σε διαφορετικά δίκτυα

Συνολικά, το EPC, με βάση την γεωγραφική κάλυψη του δικτύου πρόσβασης E-UTRAN, διαχωρίζεται σε τρία είδη γεωγραφικών περιοχών:

- Τις περιοχές MME pool areas
- Τις περιοχές Tracking Areas<sup>163</sup>
- Τις περιοχές SGW serving areas



Εικόνα 23: Συσχέτιση μεταξύ MME pool area, SGW serving area και TA

Οι περιοχές MME pool area είναι ουσιαστικά γεωγραφικές περιοχές στις οποίες ο συνδρομητής μπορεί να κινηθεί χωρίς να απαιτείται η αλλαγή του εκάστοτε κόμβου

<sup>161</sup> Στο εξής: HRT

<sup>162</sup> Στο εξής: LBO

<sup>163</sup> Στο εξής: TA(s)



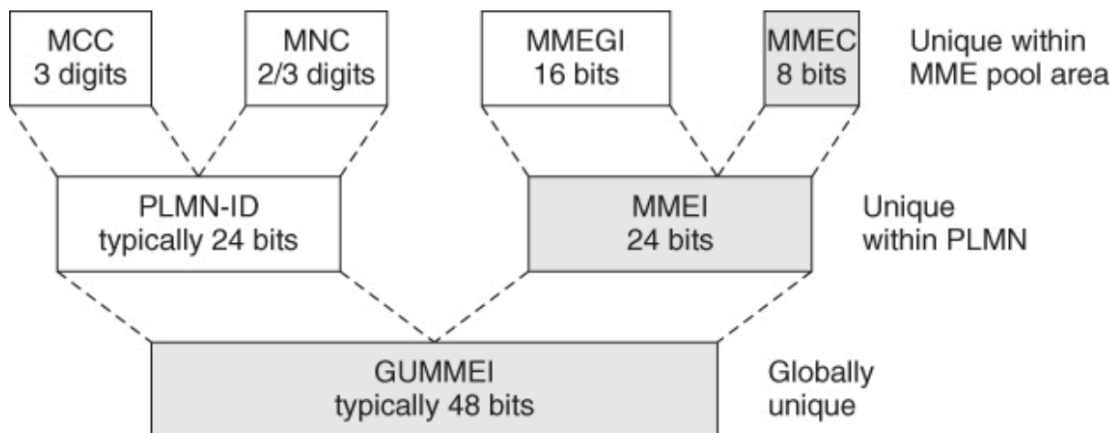
MME. Κάθε περιοχή MME pool area ελέγχεται από τουλάχιστον έναν ή και περισσότερους κόμβους MME και κάθε σταθμός βάσης eNB υποχρεούται να συνδέεται με όλους τους κόμβους MME που διαχειρίζονται μία περιοχή MME pool area, η οποία γεωγραφικά μπορεί να περιλαμβάνει μια πόλη.

Οι περιοχές SGW service area είναι γεωγραφικές περιοχές που ελέγχονται από έναν ή παραπάνω κόμβους SGW. Έτσι και εδώ, ο συνδρομητής μπορεί να κινηθεί στη γεωγραφική περιοχή χωρίς να απαιτείται η αλλαγή του κόμβου SGW. Και πάλι κάθε σταθμός βάσης eNB υποχρεούται να συνδέεται με όλους τους κόμβους SGW που ελέγχουν μία περιοχή SGW service area.

Οι παραπάνω περιοχές απαρτίζονται από μικρότερες γεωγραφικές ομάδες, τις περιοχές TA. Συνεπώς, οι περιοχές MME pool area και SGW service area απαρτίζονται από περιοχές TA και μπορεί να είναι αλληλοεπικαλυπτόμενες. Δηλαδή μία συγκεκριμένη περιοχή TA μπορεί να ανήκει σε περισσότερες περιοχές MME pool area και SGW service area. Κάθε περιοχή TA αποτελείται από κυψέλες, και είναι ουσιαστικά η αντίστοιχη έννοια της περιοχής LA και της περιοχής Routing Area<sup>164</sup> στη 2G και 3G. Όπως και στα συστήματα GSM και UMTS, έτσι και στο EPS, η αναγνώριση ενός συγκεκριμένου δικτύου ανά χώρα γίνεται με το PLMN. Η αναγνώριση του κάθε κόμβου MME είναι εφικτή με το αναγνωριστικό Globally Unique MME Identifier<sup>165</sup>, το οποίο είναι παγκοσμίως μοναδικό.

**Πίνακας 1: Συσχέτιση έννοιας Registration Area με περιοχή TA, RA και LA**

	EPS	GSM/WCDMA GPRS	GSM/WCDMA CS
Registration Area	TA list	RA	LA



**Εικόνα 24: Μορφότυπο GUMMEI**

Πιο αναλυτικά, το αναγνωριστικό GUMMEI απαρτίζεται από:

<sup>164</sup> Στο εξής: RA

<sup>165</sup> Στο εξής: GUMMEI

- Το PLMN ID
- Το MME Identity<sup>166</sup>, το οποίο χωρίζεται περαιτέρω σε:
  - MME Group Identifier<sup>167</sup>, το οποίο διακρίνει τα MME pool areas
  - MME Code<sup>168</sup>, το οποίο αναγνωρίζει ένα MME στα πλαίσια μίας συγκεκριμένης περιοχής MME pool area

Οι περιοχές TA, αναγνωρίζονται παγκοσμίως από το Tracking Area Identity<sup>169</sup>:

- Το PLMN ID
- Τον κωδικό Tracking Area Code ο οποίος είναι 16 bit και αναγνωρίζει μία περιοχή TA στα πλαίσια ενός συγκεκριμένου δικτύου PLMN.

Οι κυψέλες από τις οποίες αποτελείται μία περιοχή TA έχουν ως μοναδικό αναγνωριστικό το E-UTRAN Cell Global Identifier<sup>170</sup>:

- PLMN ID
- 28-bit E-UTRAN cell identity<sup>171</sup>

Όσον αφορά τις κυψέλες, υπάρχει και ο αριθμός Physical Cell Identity<sup>172</sup>, ο οποίος είναι ορίζεται από το 0 μέχρι και το 503, και διαχωρίζει κυψέλη από τις γειτονικές της.

Όσον αφορά την πλευρά των συνδρομητών και των τερματικών UE, η χρήση των IMSI, MSISDN και IMEI/IMESV συνεχίζεται αυτούσια, όπως χρησιμοποιούνται από το σύστημα GSM. Τα προσωρινά αναγνωριστικά των συνδρομητών είναι καινούρια και πιο συγκεκριμένα διακρίνονται ως εξής:

- Το αναγνωριστικό M temporary mobile subscriber identity<sup>173</sup>, το οποίο αναγνωρίζει ένα συνδρομητή στα πλαίσια ενός συγκεκριμένου MME και έχει μέγεθος 32 bit.
- Το αναγνωριστικό S temporary mobile subscriber identity<sup>174</sup>, το οποίο αναγνωρίζει ένα συνδρομητή στα πλαίσια ενός MME pool area και έχει μέγεθος 40 bit
- Το αναγνωριστικό Globally Unique Temporary Identity<sup>175</sup>, το οποίο αναγνωρίζει έναν συνδρομητή παγκοσμίως και έχει μέγεθος 80 bit

---

<sup>166</sup> Στο εξής: MMEI

<sup>167</sup> Στο εξής: MMEGI

<sup>168</sup> Στο εξής: MMEC

<sup>169</sup> Στο εξής: TAI

<sup>170</sup> Στο εξής: ECGI

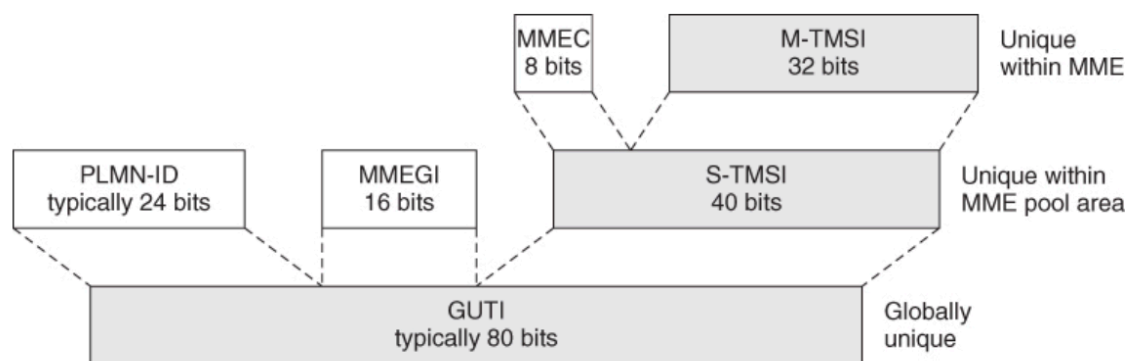
<sup>171</sup> Στο εξής: ECI

<sup>172</sup> Στο εξής: PCI

<sup>173</sup> Στο εξής: M-TMSI

<sup>174</sup> Στο εξής: S-TMSI

<sup>175</sup> Στο εξής: GUTI



**Εικόνα 25: Μορφότυπο GUTI**

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η μη ύπαρξη τομέα κυκλωματομεταγωγής στο σύστημα EPS, απαιτεί την πραγματοποίηση των φωνητικών κλήσεων μέσω της πακετομεταγωγής. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται ένα σύστημα IP multimedia subsystem<sup>176</sup>, για την έναρξη, τον τερματισμό καθώς και τη διαχείριση των κλήσεων μέσω IP, μία τεχνολογία γνωστή και ως Voice over IP<sup>177</sup>. Το VoIP στα πλαίσια του LTE είναι γνωστό και ως Voice over LTE<sup>178</sup>. Επειδή όμως το VOLTE απαιτούσε την ύπαρξη του συστήματος IMS και αυτό μεταφραζόταν σε περαιτέρω επενδύσεις από την πλευρά των φορέων κινητής τηλεφωνίας, υπήρχε και η ενναλακτική του CS fallback<sup>179</sup>, όπου το κινητό μπορούσε να μεταφερθεί στο υπάρχον τομέα κυκλωματομεταγωγής των συστημάτων GSM/UMTS για την πραγματοποίηση της κλήσης και μετέπειτα να επιστρέψει στο σύστημα EPS. Για την λειτουργία του CSFB, απαιτείται η επικοινωνία του κόμβου MME με το κέντρο MSC/VLR μέσω της διεπαφής SGs.

Λόγω της κινητικότητας των συνδρομητών, ανακύπτει και άλλο ένα ζήτημα που αφορά την ομαλή χρήση των κλήσεων σε όλα τα τμήματα του δικτύου. Για παράδειγμα αν ο συνδρομητής ξεκινήσει την κλήση μέσω VOLTE σε περιοχή κάλυψης 4G και μετακινηθεί σε μία άλλη περιοχή όπου δεν υπάρχει κάλυψη 4G παρά μόνο κάλυψη 2G/3G, τότε θα τερματιζόταν η κλήση. Για αυτό τον λόγο υπάρχει η λειτουργία Single Radio Voice Call Continuity<sup>180</sup>, η οποία διασφαλίζει την απρόσκοπτη συνέχιση της κλήσης ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις, όπου η κλήση από την πλευρά του UE μεταφέρεται από την πακετομεταγωγή στην κυκλωματομεταγωγή. Για την λειτουργία αυτή απαιτείται η επικοινωνία του κόμβου MME και του κέντρου MSC/VLR μέσω της διεπαφής Sv. Τα υποστηριζόμενα είδη της λειτουργίας SRVCC είναι το LTE προς το GSM, το LTE προς το WCDMA, το WCDMA (HSPA) προς το GSM, το WCDMA προς το WCDMA, και το LTE προς το 1xRTT. Από την Release 11 έχουμε και το GSM προς το LTE και το WCDMA προς το LTE.

<sup>176</sup> Στο εξής: IMS

<sup>177</sup> Στο εξής: VoIP

<sup>178</sup> Στο εξής: VOLTE

<sup>179</sup> Στο εξής: CSFB

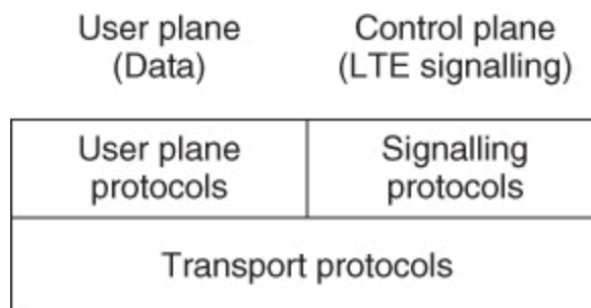
<sup>180</sup> Στο εξής: SRVCC

Παράλληλα με την ύπαρξη φωνητικών κλήσεων, το σύστημα EPS συνεχίζει να υποστηρίζει την αποστολή και λήψη μηνυμάτων SMS, το οποίο επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους. Αν υπάρχει σύστημα IMS, τότε μπορεί να γίνει χρήση του SMS over IP, όπου τα μηνύματα στέλνονται μέσω της σηματοδότησης IMS μέσω πακέτων IP. Αν ο κόμβος MME επικοινωνεί με το κέντρο MSC/VLR μέσω της διεπαφής SGs, τότε τα μηνύματα αποστέλνονται με την βοήθεια της κυκλωματομεταγωγής. Αυτό είναι γνωστό και ως SMS over SGs. Τα μηνύματα SMS στέλνονται από και προς το τερματικό UE μέσω της σηματοδότησης στο επίπεδο NAS. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει κυκλωματομεταγωγή αλλά ούτε και σύστημα IMS στο δίκτυο τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το SMS in MME, όπου ο κόμβος MME επικοινωνεί με ένα κέντρο SMSC μέσω της διεπαφής SGd για την αποστολή και λήψη μηνυμάτων. Και εδώ, τα μηνύματα SMS στέλνονται από και προς το τερματικό UE μέσω της σηματοδότησης στο επίπεδο NAS.

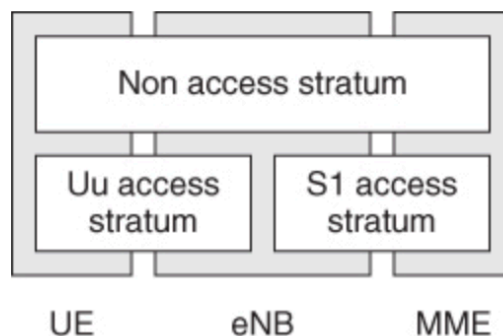
### 3.1.5 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στα δίκτυα 4G

Τα διαφορετικά είδη πρωτοκόλλων στο σύστημα EPS μπορούν να ομαδοποιηθούν σε δύο κατηγορίες, τα πρωτόκολλα στο επίπεδο χρήστη (user plane), τα οποία μεταφέρουν τα δεδομένα των συνδρομητών, και τα πρωτόκολλα στο επίπεδο ελέγχου (control plane), τα οποία αφορούν την σηματοδότηση για την διαχείριση και λειτουργία του δικτύου. Τα πρωτόκολλα στο επίπεδο μεταφοράς είναι επιφορτισμένα με την μεταφορά των δεδομένων των πρωτοκόλλων στα ανώτερα στρώματα.

Ο διαχωρισμός στο επίπεδο AS και NAS του δικτύου, που αναφέρθηκε από το σύστημα UMTS, συνεχίζει να υφίσταται και στο σύστημα EPS αυτούσιο.



Εικόνα 26: Οικογένειες πρωτοκόλλων στο σύστημα EPS



Εικόνα 27: Επίπεδο AS και NAS στο σύστημα EPS

Το φυσικό επίπεδο της διεπαφής Uu και οι διάφορες λειτουργίες και διαδικασίες του περιγράφονται από τα τεχνικά έγγραφα 3GPP TS 36.211 [19], 36.212 [20] και 36.213 [21]. Στο επίπεδο Medium Access Control<sup>181</sup> πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο ο χρονοπρογραμματισμός (scheduling) της μεταφοράς δεδομένων μεταξύ του τερματικού UE και του σταθμού βάσης eNB και περιγράφεται αναλυτικά από το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 36.321 [22]. Το επίπεδο Radio Link Control<sup>182</sup> ασχολείται με την διατήρηση της επικοινωνίας και την διασφάλιση της ορθότητας της ανταλλαγής των δεδομένων, το οποίο περιγράφεται πλήρως στο τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 36.322 [23].

Το επίπεδο Packet Data Convergence Protocol<sup>183</sup>, που περιγράφεται στο τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 36.323 [24], ασχολείται με την συμπίεση κεφαλίδας (header compression) και τις διαδικασίες για την εφαρμογή της ασφάλειας. Τέλος, όσον αφορά τα πακέτα των συνδρομητών, έχουμε το ίδιο το IP πακέτο που θα προωθηθεί από το σταθμό βάσης eNodeB προς το κόμβο SGW μέσω της διεπαφής S1-U, ενώ στην περίπτωση της σηματοδότησης μεταξύ του σταθμού βάσης eNodeB και του τερματικού UE έχουμε το επίπεδο Radio Resource Control<sup>184</sup>, όπου περιγράφεται στο τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 36.331 [25]. Η μεταφορά της σηματοδότησης μεταξύ του κόμβου MME και του τερματικού UE, δηλαδή η σηματοδότηση στο επίπεδο NAS, επιτυγχάνεται με την βοήθεια του επιπέδου RRC.

Τα πρωτόκολλα στο EPC και μεταξύ EPC και δικτύου πρόσβασης E-UTRAN, είναι βασισμένα στα Internet Engineering Task Force<sup>185</sup> πρωτόκολλα και η χρήση διάφορων πρωτοκόλλων στο επίπεδο 1 και επίπεδο 2 είναι εφικτή. Όπως αναφέρθηκε ήδη, το EPC είναι IP-based και αυτό συνεπάγεται ότι στο επίπεδο 3 συναντάμε IPv4 ή/και IPv6. Στο επίπεδο 4 έχουμε User Datagram Protocol<sup>186</sup>, για τις διεπαφές για το επίπεδο χρήστη και για το επίπεδο ελέγχου έχουμε τα Transmission Control Protocol<sup>187</sup> και Stream Control Transmission Protocol<sup>188</sup>. Τα δύο πρωτόκολλα στο επίπεδο χρήστη είναι το GPRS Tunnelling Protocol User Plane<sup>189</sup> και το Generic Routing Encapsulation<sup>190</sup>.

---

<sup>181</sup> Στο εξής: MAC

<sup>182</sup> Στο εξής: RLC

<sup>183</sup> Στο εξής: PDCP

<sup>184</sup> Στο εξής: RRC

<sup>185</sup> Στο εξής: IETF

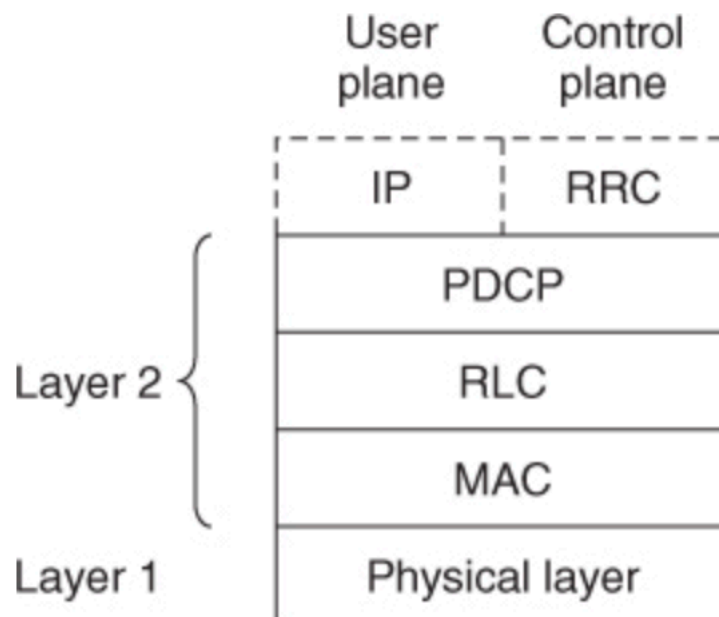
<sup>186</sup> Στο εξής: UDP

<sup>187</sup> Στο εξής: TCP

<sup>188</sup> Στο εξής: SCTP

<sup>189</sup> Στο εξής: GTPv1-U

<sup>190</sup> Στο εξής: GRE



Εικόνα 28: Στοιβά πρωτοκόλλων στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN

Τα πρωτόκολλα στο επίπεδο ελέγχου είναι τα εξής:

- Το S1 application protocol<sup>191</sup>, με το οποίο γίνεται η επικοινωνία των σταθμών βάσης eNodeB με τον κόμβο MME
- Το X2 application protocol<sup>192</sup> για την επικοινωνία των σταθμών βάσης eNodeB μεταξύ τους
- Το EPS-NAS [26], το οποίο χωρίζεται στο EPS Mobility Management<sup>193</sup> και το EPS Session Management<sup>194</sup>. Η μεταφορά των μηνυμάτων αυτού του πρωτοκόλλου γίνεται μέσω του επιπέδου S1AP μεταξύ του κόμβου MME και του σταθμού βάσης eNodeB, και μέσω του επιπέδου RRC μεταξύ σταθμού eNodeB και τερματικού UE.
- Τα βασισόμενα στο IETF Diameter πρωτόκολλα. Το βασικό Diameter πρωτόκολλο είναι ένα πρότυπο της IETF, και μπορεί να επεκταθεί ανάλογα τις απαιτήσεις. Για παράδειγμα, η επικοινωνία μεταξύ βάσης HSS και κόμβου MME καθώς και μεταξύ της βάσης HSS και ενός κέντρου Release 8 SGSN γίνεται μέσω της διεπαφής S6a/d με το 3GPP Diameter application S6a/d.

<sup>191</sup> Στο εξής S1AP

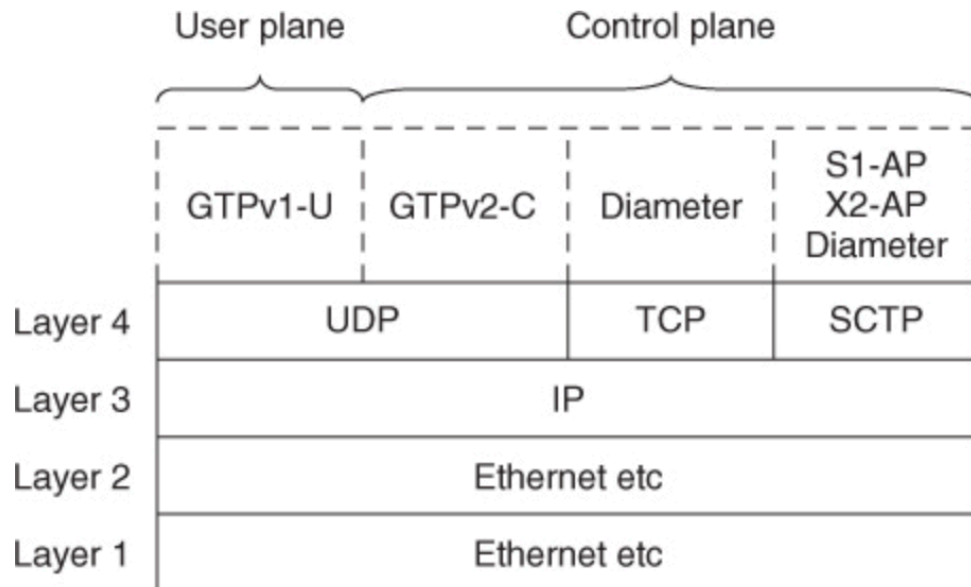
<sup>192</sup> Στο εξής: X2AP

<sup>193</sup> Στο εξής: EMM

<sup>194</sup> Στο εξής: ESM

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

- Οι κόμβοι SGW, PGW και η επικοινωνία μεταξύ των MME και SGW, καθώς και μεταξύ των κόμβων MME μεταξύ τους γίνεται με το GPRS tunnelling protocol control part v2<sup>195</sup>.
- Η επικοινωνία του κόμβου MME με το κέντρο SGSN γίνεται με το GPRS tunnelling protocol control part<sup>196</sup>.

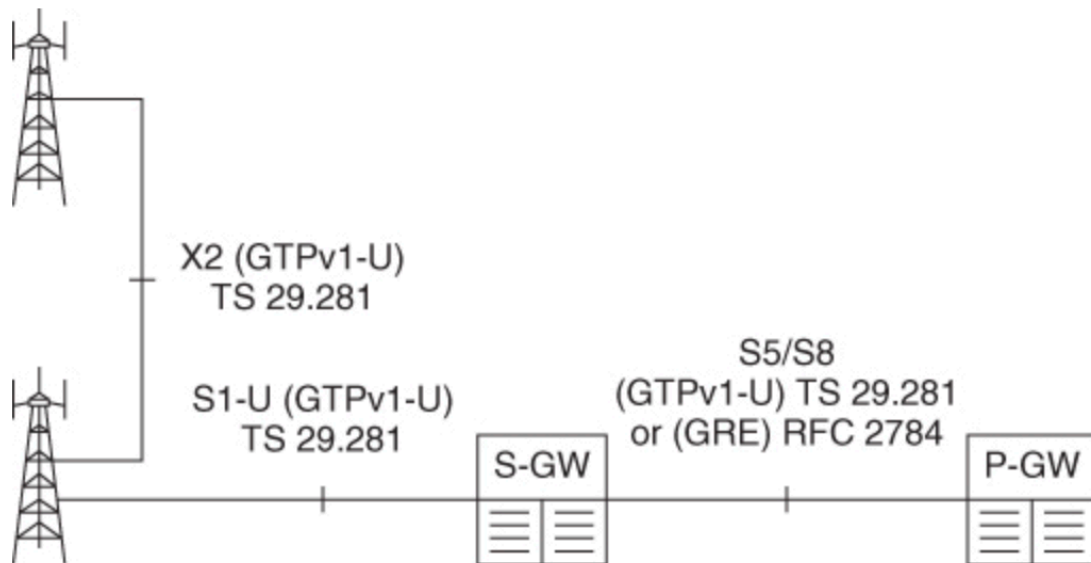


Εικόνα 29: Στοιβά πρωτοκόλλων στο επίπεδο ελέγχου και χρήστη στο σύστημα EPS

<sup>195</sup> Στο εξής: GTPv2-C

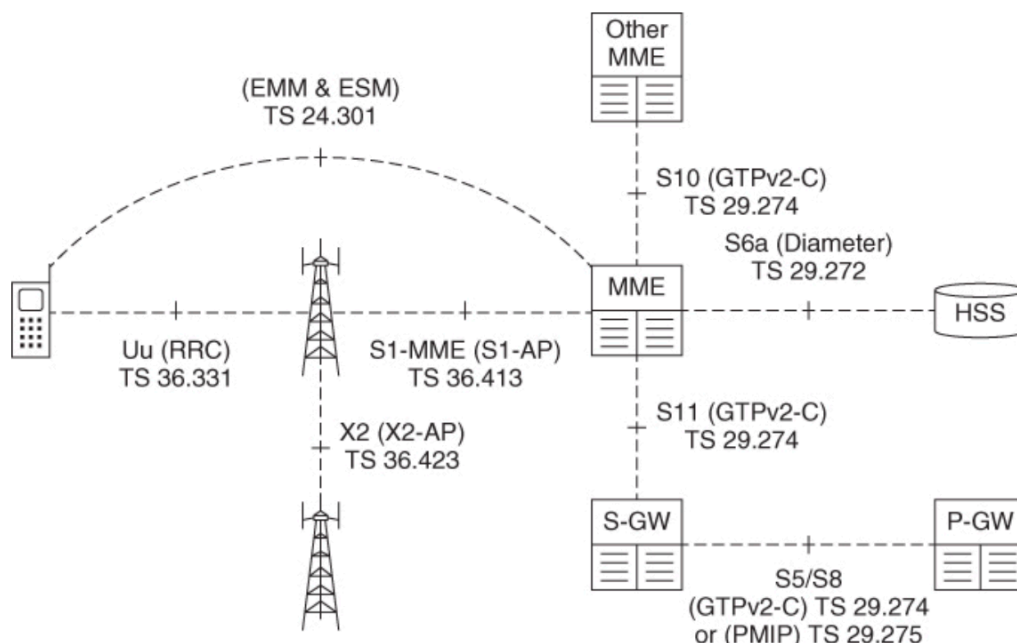
<sup>196</sup> Στο εξής: GTP-C

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 4ης γενιάς



**Εικόνα 30: Επίπεδο χρήστη στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN και το EPC**

Όλα τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα είναι βασισμένα σε δυαδική αναπαράσταση και όχι βασισμένα σε κείμενο και για αυτόν τον λόγο τα μηνύματα σηματοδοσίας είναι μικρά μεν, αλλά πολύ δύσκολο να διαβαστούν χωρίς την χρήση ενός αποκωδικοποιητή (decoder).



**Εικόνα 31: Επίπεδο ελέγχου στο δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN και το EPC**



### 3.1.6 Διασφάλιση ποιότητας επικοινωνίας με Bearers

Η μεταφορά των δεδομένων των συνδρομητών στα πλαίσια του συστήματος EPS, πραγματοποιείται μέσω των EPS bearers. Νοητά μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας αμφίδρομος σωλήνας από το UE μέχρι και την σύνδεση PDN, και περνάει από το σταθμό βάσης eNB, τους κόμβους SGW και PGW, διαμέσου των οποίων μεταφέρονται τα IP πακέτα των συνδρομητών.

Η χρήση τους γίνεται με σκοπό την διασφάλιση μίας επιθυμητής ποιότητα υπηρεσίας<sup>197</sup> (Quality of Service), έτσι ώστε το δίκτυο να παρέχει τις απαραίτητες προτεραιότητες για την επίτευξη μίας ποιοτικότερης υπηρεσίας, όπως π.χ. την πραγματοποίηση VoLTE κλήσεων χωρίς να επηρεάζονται από την συμφόρηση του δικτύου. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα της κινητικότητας των χρηστών και η ανάγκη για διατήρηση της διεύθυνσης IP που έχει ανατεθεί στους συνδρομητές για την επικοινωνία με τις εκάστοτε συνδέσεις PDN, προϋποθέτει την χρήση των EPS bearers.

Οι EPS bearers μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- Τους default
- Τους dedicated:
  - Guaranteed Bit Rate<sup>198</sup>
  - Non-Guaranteed Bit Rate<sup>199</sup>

Κάθε φορά που ενεργοποιείται μία σύνδεση PDN, συσχετίζεται παράλληλα και με έναν EPS bearer, τον default. Συνεπώς είναι ο πρώτος EPS bearer που δημιουργείται αυτόματα από το δίκτυο όταν ενεργοποιείται η σύνδεση με ένα PDN. Από εκεί και πέρα, μπορούν να δημιουργηθούν και άλλοι bearers στα πλαίσια μίας σύνδεσης PDN, οι οποίοι ονομάζονται dedicated. Οι dedicated bearers μπορεί να είναι είτε GBR, όπου διασφαλίζεται η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων, είτε non-GBR, όπου η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων είναι μία υπηρεσία βέλτιστης προσπάθειας (best effort) και εξαρτάται από τις διάφορες συνθήκες του δικτύου. Πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι ο default bearer είναι πρακτικά τύπου non-GBR.

Οι παράμετροι QoS που σχετίζονται με έναν EPS bearer είναι οι εξής:

- Η παράμετρος QoS Class Identifier<sup>200</sup>. Είναι ουσιαστικά ένας αριθμός και πρακτικά δείκτης σε έναν πίνακα με παραμέτρους που αφορούν τον χειρισμό των πακέτων του αντίστοιχου EPS bearer. Κάποιες τιμές QCI είναι ορισμένες με βάση το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 23.203 [27].
- Η παράμετρος Allocation and Retention Priority<sup>201</sup> η οποία χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση αν ένας EPS bearer πρέπει να διατηρηθεί ή τερματιστεί όταν οι πόροι είναι περιορισμένοι.

---

<sup>197</sup> Στο εξής: QoS

<sup>198</sup> Στο εξής: GBR

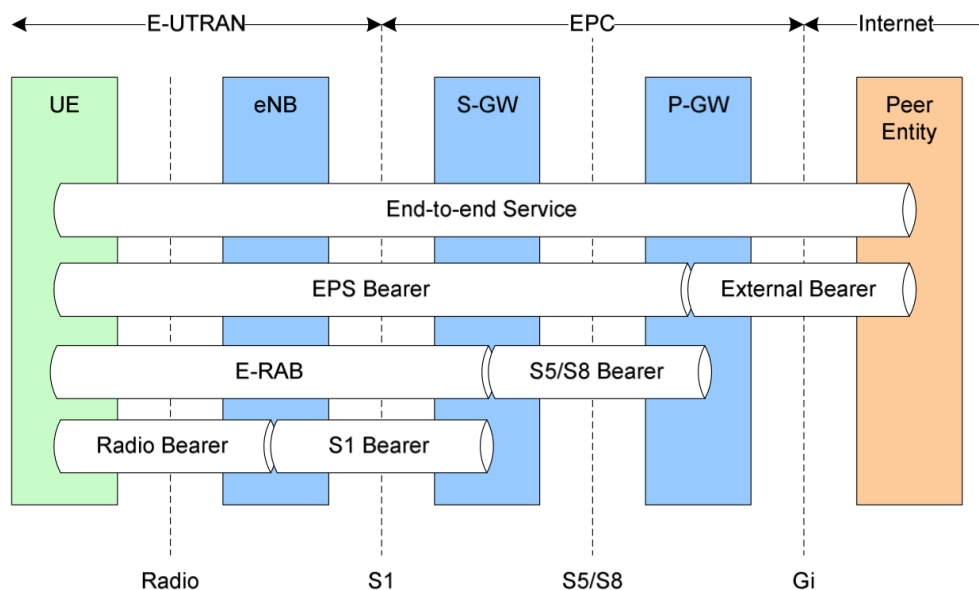
<sup>199</sup> Στο εξής: non-GBR

<sup>200</sup> Στο εξής: QCI

<sup>201</sup> Στο εξής: ARP

- Οι παράμετροι Uplink<sup>202</sup>/Downlink<sup>203</sup> Guaranteed Bit Rate, που ισχύουν μόνο για GBR bearers, και είναι η ταχύτητα που εγγυάται το δίκτυο για την μεταφορά των πακέτων σε ανοδική και καθοδική ζεύξη αντίστοιχα
- Οι παράμετροι UL /DL Maximum Bit Rate, που ισχύουν μόνο για GBR bearers, και είναι η μέγιστη ταχύτητα του EPS bearer πακέτων σε ανοδική και καθοδική ζεύξη αντίστοιχα. Κάθε πακέτο που φθάνει όταν η αντίστοιχη τιμή MBR έχει ξεπεραστεί, τότε απορρίπτεται
- Η παράμετρος APN Aggregate Maximum Bitrate<sup>204</sup>, που είναι για τους non-GBR bearers και αφορά τη συνολική μέγιστη ταχύτητα όλων των φορέων non-GBR bearer της σύνδεσης PDN, ανεξαρτήτως του πλήθους των φορέων EPS bearer και του πλήθους των συνδέσεων PDN που έχουν συσχετιστεί με το εκάστοτε όνομα APN. Αυτή η παράμετρος γίνεται επιβολή στο τερματικό UE για πακέτα στην ανοδική ζεύξη και στο κόμβο PGW για πακέτα ανοδικής και καθοδικής ζεύξης
- Η παράμετρος UE Aggregate Maximum Bitrate<sup>205</sup>, που είναι η μέγιστη ταχύτητα όλων των non-GBR bearer σε όλες τις συνδέσεις PDN του τερματικού UE και γίνεται επιβολή στο σταθμό βάσης eNodeB.

Ο EPS bearer απαρτίζεται από 3 επιμέρους bearers, τον Radio Bearer, το S1 Bearer και τον S5/S8 Bearer. Η συνένωση Radio Bearer και S1 Bearer είναι γνωστή ως φορέας E-RAB.



Εικόνα 32: EPS bearer από άκρο σε άκρο

<sup>202</sup> Στο εξής: UL

<sup>203</sup> Στο εξής: DL

<sup>204</sup> Στο εξής: APN-AMBR

<sup>205</sup> Στο εξής: UE-AMBR

## 4. Δίκτυα πέμπτης γενιάς - 5G και 5G-Advanced

Το δίκτυο 5G θεωρείται ότι πέρα από την συνδεσιμότητα των ανθρώπων για λόγους επικοινωνίας, όπως ήταν ο σκοπός των δικτύων κινητής, θα συντελέσει σημαντικό εργαλείο για πολλούς τομείς όπως η υγεία, τα εργοστάσια, η διασκέδαση, η αυτοκίνηση, το δίκτυο μεταφοράς ρεύματος, τα μέσα μαζικής μεταφοράς, η γεωργία, καθώς και η δημόσια ασφάλεια. Πλέον μιλάμε και για διαμηχανική επικοινωνία<sup>206</sup> (machine-to-machine) καθώς και για εφαρμογές του Διαδικτύου των αντικειμένων<sup>207</sup> (Internet of Things).

Ανάλογα τις περιπτώσεις χρήσης για το δίκτυο 5G, απαιτούνται αντίστοιχα διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά τη καθυστέρηση, την ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων καθώς και την αξιοπιστία των επικοινωνιών. Η βελτίωση όσον αφορά τις ταχύτητες των δεδομένων δεν αφορούν τόσο την επίτευξη υψηλότερων μέγιστων ταχυτήτων, όσο της βελτίωσης της συνολικής χωρητικότητας του δικτύου για την επίτευξη καλύτερων ταχυτήτων για το σύνολο των συνδρομητών, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο καλύτερες υπηρεσίες συνολικά. Σκοπός είναι η κάλυψη περισσότερων συνδρομητών στην ίδια γεωγραφική περιοχή, δηλαδή αστικές περιοχές με μεγάλο πληθυσμό, παρέχοντας ταχύτητες της τάξης των 1 gigabit per second<sup>208</sup> εντός κτιρίων και 300 Mbps εκτός κτιρίων, βελτιώνοντας και αναβαθμίζοντας ουσιαστικά τις υπηρεσίες Mobile Broadband<sup>209</sup>.

Η μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης θα οδηγήσει στην χρήση συσκευών και εφαρμογών όπου η ελάχιστη δυνατή καθυστέρηση είναι σημαντική για την εύρυθμη λειτουργία τους. Σκοπός είναι ο περιορισμός στο 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου.

Η ραγδαία ανάπτυξη λύσεων σταθερής ασυρματικής πρόσβασης<sup>210</sup> (Fixed Wireless Access) για την κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών με ευρυζωνικές συνδέσεις σε σημεία που είναι αδύνατο ή και ασύμφορο να γίνει μέσω σταθερής ή καλωδιακής σύνδεσης, είναι ένα μεγάλο κίνητρο για τους φορείς κινητής τηλεφωνίας όσον αφορά την έλευση του δικτύου 5G. Σε ορισμένες περιπτώσεις η παροχή υπηρεσιών μέσω του δικτύου 5G είναι η πιο γρήγορη και οικονομική λύση για τέτοιου είδους περιπτώσεις.

Πέρα από τις βελτιώσεις για τους τελικούς συνδρομητές και τις νέες υπηρεσίες που εμφανίζονται λόγω της 5G, οι φορείς από την άλλη αναζητούν τρόπους για γρηγορότερα, καλύτερα και πιο οικονομικά δίκτυα κινητής. Για να υλοποιηθούν αυτά, θα πρέπει το δίκτυο 5G να βασιστεί στις νεότερες τεχνολογίες αιχμής.

Στη 4G, και αντίστοιχα στη 2G και 3G, τα μηχανήματα που υλοποιούσαν τις διάφορες λειτουργικές δικτυακές οντότητες του δικτύου κινητής αποτελούνταν από εξειδικευμένο υλισμικό και λογισμικό. Το μεγαλύτερο ίσως πρότυπο για το υλισμικό τηλεπικοινωνιών είναι η προδιαγραφή Advanced Telecommunications Computing Architecture<sup>211</sup> [28] και

---

<sup>206</sup> Στο εξής: M2M

<sup>207</sup> Στο εξής: IoT

<sup>208</sup> Στο εξής: Gbps

<sup>209</sup> Στο εξής: MBB

<sup>210</sup> Στο εξής: FWA

<sup>211</sup> Στο εξής: ATCA

ορίζει ουσιαστικά ένα μεταλλικό κουτί με συγκεκριμένες διαστάσεις που αποτελείται από κάρτες (blades), όπου η κάθε κάρτα είναι και ένας υπολογιστής που τρέχει το αντίστοιχο λογισμικό και εκτελεί τις επιθυμητές λειτουργίες. Το πρότυπο ορίζει και διάφορες δυνατότητες, όπως την θερμή εναλλαγή (hot swap), όπου μπορεί να γίνει η αλλαγή μίας κάρτας χωρίς να απαιτείται να τερματιστεί η λειτουργία της οντότητας ATCA. Η ανάπτυξη και λειτουργία του τηλεπικοινωνιακού λογισμικού είναι άρρηκτά συνδεδεμένη με την ATCA, και οι φορείς αγοράζανε ουσιαστικά μία οντότητα με προδιαγεγραμμένες λειτουργίες, χωρητικότητα και συγκεκριμένους πόρους. Αυτό σήμαινε ότι η επεκτασιμότητα του δικτύου δεν ήταν εύκολη και γρήγορη καθώς θα απαιτούσε την προσθήκη επιπλέον οντοτήτων ATCA.

Το πρώτο βήμα απομάκρυνσης από τις οντότητες ATCA έγινε με την χρήση κλασικών εξυπηρετητών από συστήματα πληροφορικής για την υλοποίηση των οντοτήτων του δικτύου. Το πιο σημαντικό βήμα ήταν όμως η χρήση της εικονικοποίησης (virtualization) για τον διαχωρισμό και αποδέσμευση του λογισμικού από το υλισμικό. Πλέον το λογισμικό έτρεχε σε εικονικές μηχανές, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά την γρήγορη επεκτασιμότητα του δικτύου ανάλογα την κίνηση των συνδρομητών, καθώς πλέον δεν υπήρχε περιορισμός με βάση το διαθέσιμο υλισμικό. Πλέον το πλήθος και οι δυνατότητες των εικονικών μηχανών μπορεί να αλλάξουν εύκολα γρήγορα και ανάλογα τις ανάγκες. Για την ύπαρξη ενός κοινού τρόπου προσέγγισης όσον αφορά το virtualization του δικτύου, δημιουργήθηκαν τα πρότυπα ETSI Network Function Virtualization<sup>212</sup> και Open Platform for NFV Project<sup>213</sup>.

Επειδή όμως η κάθε εικονική μηχανή προϋποθέτει την λειτουργία ενός πλήρους λειτουργικού συστήματος και επειδή πολλές εικονικές μηχανές υπάρχουν σε ένα φυσικό μηχάνημα, αυτό οδηγούσε σε μη βέλτιστη αξιοποίηση των πόρων του μηχανήματος. Για τον λόγο αυτό αναδείχθηκε η τάση για περιέκτες (containers), το οποίο κατ' επέκταση οδηγεί σε μικρο-υπηρεσίες (micro services) και λογισμικό εγγενές στο νέφος (cloud native).

Πλέον αντί της χρήσης εικονικών μηχανών, γίνεται χρήση containers, τα οποία είναι ουσιαστικά απομονωμένα περιβάλλοντα που τρέχουν λογισμικό στα πλαίσια ενός λειτουργικού συστήματος. Καθ' αυτόν τον τρόπο δεν απαιτείται να συνυπάρχει ένα ολόκληρο λειτουργικό σύστημα μαζί με το εκάστοτε αυτόνομο λογισμικό. Συνεπώς πολλά containers τρέχουν παράλληλα σε ένα λειτουργικό σύστημα. Υπάρχουν δύο τρόποι υλοποίησης:

- Containers σε εικονικές μηχανές, όπου αξιοποιείται η virtualization υποδομή που έχει εγκαθιδρύσει ήδη ο φορέας, διατηρώντας τα πλεονεκτήματα της ενορχήστρωσης που παρέχει μια πλατφόρμα NFV όσο αφορά την ίδια την υποδομή
- Containers σε φυσικά μηχανήματα, όπου τα containers τρέχουν απευθείας στο μηχάνημα

Οι εικονικές μηχανές ή και τα containers μπορούν να τρέξουν σε υλικό του φορέα είτε ακόμη και στο cloud. Πλέον το τηλεπικοινωνιακό λογισμικό αρχίζει να γίνεται cloud native, το οποίο σημαίνει ότι πλέον:

---

<sup>212</sup> Στο εξής: NFV

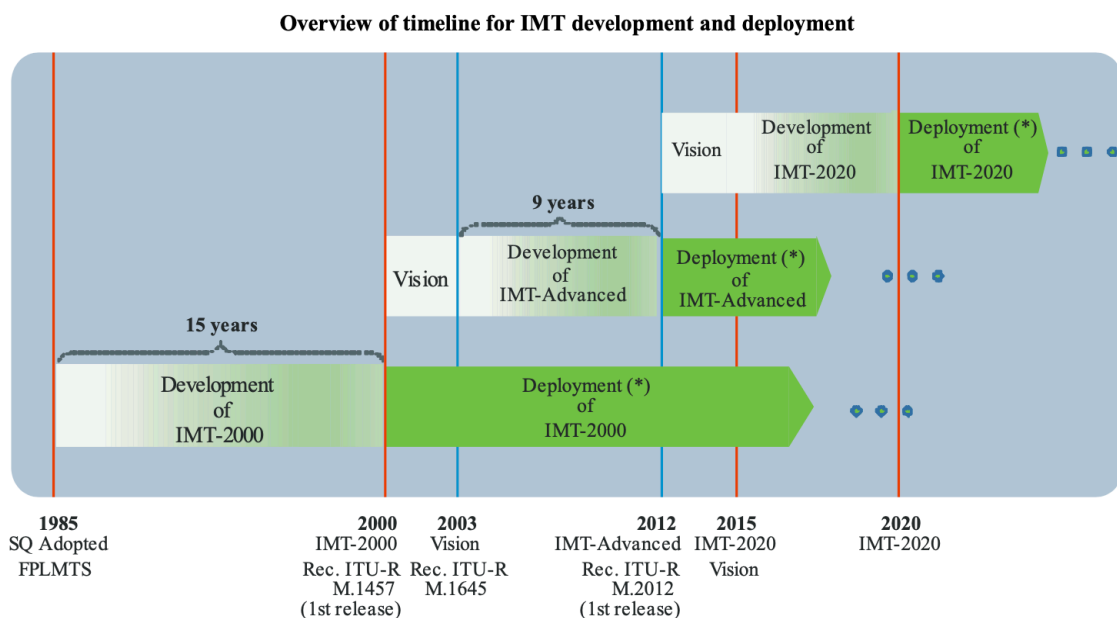
<sup>213</sup> Στο εξής: OPNFV

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

- Είναι ανεξάρτητο του υλισμικού και της υποδομής
- Πραγματοποιείται αποδόμηση του λογισμικού και διαχείριση του κύκλου ζωής (life cycle management) με βάση αρχιτεκτονική μικρουπηρεσιών
- Υπάρχει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα
- Είναι εφικτή ευκολότερη ενορχήστρωση (orchestration)
- Παρέχεται καλύτερος αυτοματισμός (automation)

Με τον όρο καλύτερο αυτοματισμό εμπεριέχεται η βελτιστοποίηση των διαδικασιών που είχαν προτυποποιηθεί από την κοινοπραξία 3GPP ήδη από τη 4G, τα λεγόμενα δίκτυα Self-Organising Networks<sup>214</sup>.

Όπως και παλαιότερα, μέσω των IMT-2000 και IMT-Advanced, έτσι και τώρα η κοινοπραξία ITU σχημάτισε τις απαιτήσεις για τα δίκτυα 5G, η οποία άρχισε το 2012 τις διεργασίες για το IMT-2020 [29].



(\*) Deployment timing may vary across countries.

M.2083-01

### Εικόνα 33: IMT-2000, IMT-Advanced και IMT-2020

Συνοψίζοντας όλες τις περιπτώσεις χρήσης, το δίκτυο 5G παρέχει:

- Enhanced Mobile Broadband<sup>215</sup>
- Massive Machine Type Communications<sup>216</sup>
- Ultra-Reliable and Low Latency Communications<sup>217</sup>

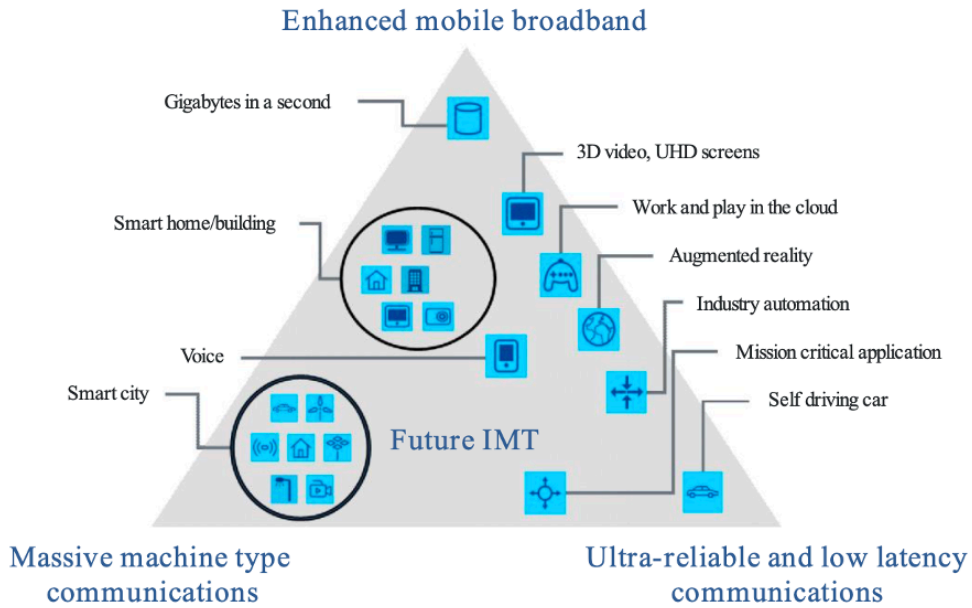
<sup>214</sup> Στο εξής: SON

<sup>215</sup> Στο εξής: eMBB

<sup>216</sup> Στο εξής: mMTC

<sup>217</sup> Στο εξής: URLLC

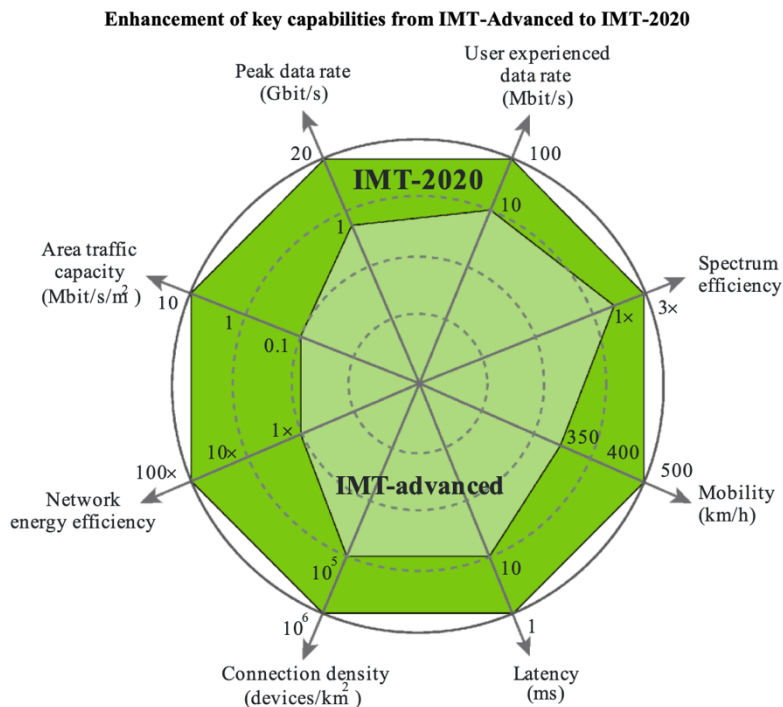
Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς



M.2083-02

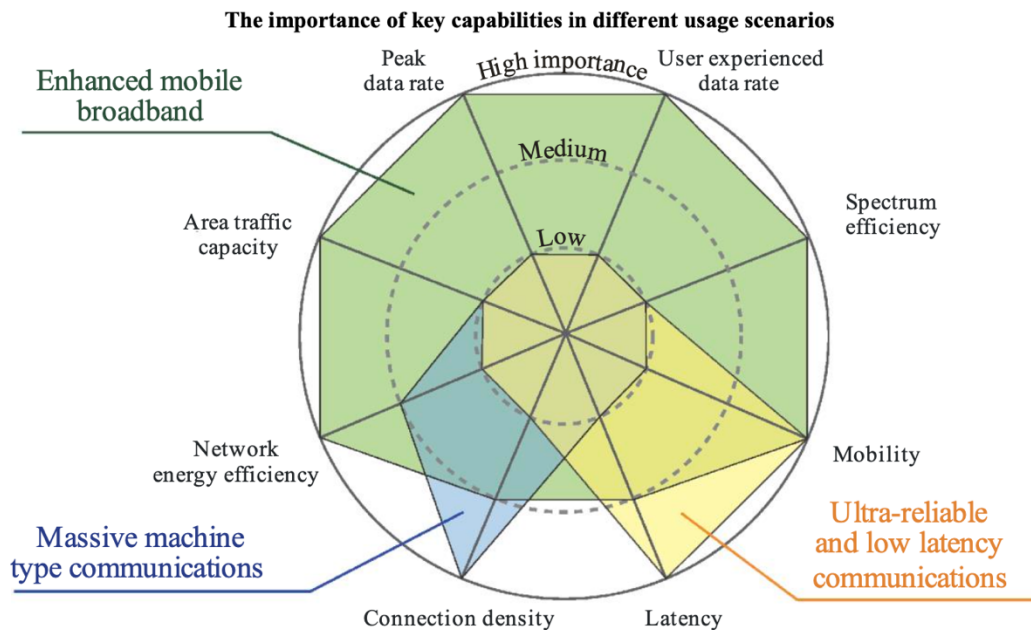
**Εικόνα 34: Περιπτώσεις χρήσης που ορίζονται από το IMT-2020**

Οι κύριες λειτουργίες του δικτύου που επιλέχθηκαν ότι χρήζουν βελτίωσης με βάση το IMT-2020 φαίνονται στην παρακάτω εικόνα:



M.2083-03

**Εικόνα 35: Βελτιώσεις από το IMT-Advanced προς το IMT-2020**



M.2083-04

**Εικόνα 36: Συσχέτιση λειτουργιών με τις περιπτώσεις χρήσης για το δίκτυο 5G**

Στην ανάπτυξη των δικτύων 5G έχουν συμβάλει και οι παρακάτω οργανισμοί [30]:

- Next Generation Mobile Networks<sup>218</sup> Alliance που είναι ένας συνεταιρισμός μεταξύ φορέων κινητής τηλεφωνίας, κατασκευαστών τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού και ερευνητικών κέντρων. Ιδρύθηκε το 2006 και σκοπός του οργανισμού αυτού είναι η αξιολόγηση των τεχνολογιών για την περιγραφή των στόχων και των απαιτήσεων όσον αφορά την απόδοση, την λειτουργία και την ανάπτυξη των δικτύων νεότερης γενιάς.
- 5G Public-Private Partnership<sup>219</sup> που είναι το μεγαλύτερο ερευνητικό πρόγραμμα για τη 5G. Ξεκίνησε από την Ευρωπαϊκή επιτροπή σε συνδυασμό με ιδιωτικές εταιρείες του European Information and Communication Technology<sup>220</sup>. Συνεπώς, ο δημόσιος τομέας αντιπροσωπεύεται από την Ευρωπαϊκή επιτροπή και ο ιδιωτικός τομέας από το 5G Infrastructure Association<sup>221</sup>. Σκοπός αυτού του προγράμματος συνολικά είναι η παροχή λύσεων 5G, αρχιτεκτονικών, τεχνολογιών και προτύπων.

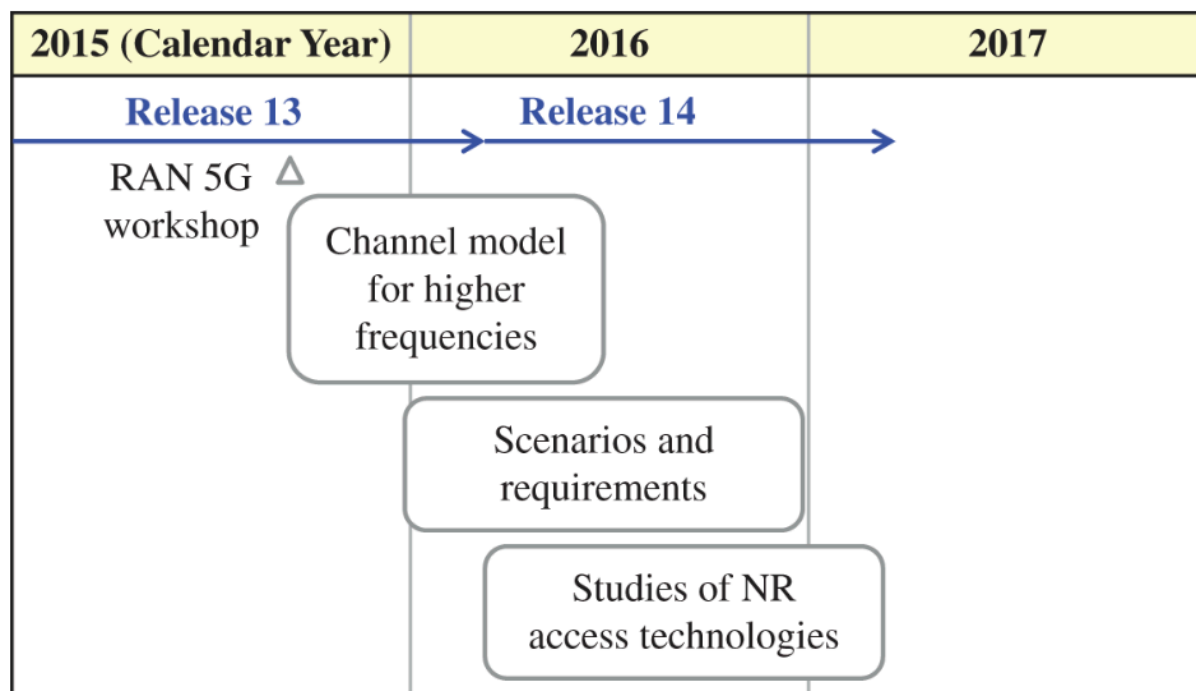
Η κοινοπραξία 3GPP, που είχε αναπτύξει τα συστήματα UMTS και EPS, ξεκίνησε το 2015 τις διεργασίες για το νέο δίκτυο κινητής επόμενης γενιάς. Το όνομα του νέου δικτύου πρόσβασης αποφασίστηκε ότι θα είναι 5G NR. Το βασικό τεχνικό έγγραφο το οποίο περιγράφει την συνολικότερη αρχιτεκτονική της 5G είναι το 3GPP TR 23.799 [31].

<sup>218</sup> Στο εξής: NGMN

<sup>219</sup> Στο εξής: 5GPPP

<sup>220</sup> Στο εξής: ICT

<sup>221</sup> Στο εξής: 5GIA



Εικόνα 37: Χρονοδιάγραμμα για τις Release 13 και 14 του 3GPP

Αρχικά, η μεγάλη κάλυψη του LTE και η ικανοποιητική απόδοσή του σε συνδυασμό με τα κεφάλαια που είχαν επενδύσει οι φορείς κινητής τηλεφωνίας στις υπάρχουσες υποδομές, οδήγησε στην απόφαση το LTE να συνεχίσει να υφίσταται και στη 5G, υποστηρίζοντας έτσι την νέα αρχιτεκτονική. Ακόμη, το LTE αναβαθμιζόταν με νέα χαρακτηριστικά και με την έλευση του LTE-Advanced Pro δια της Release 13 και 14.

Εφόσον πλέον είχαμε δύο είδη τεχνολογιών πρόσβασης, δηλαδή το LTE και το 5G NR, αυτό οδήγησε σε συνδυασμούς χρήσης τους μέσω τεχνικών πολλαπλής συνδεσιμότητας - Multi Radio Dual Connectivity<sup>222</sup>. Πέρα από το 5G NR, υπάρχει και ένα νέο Core Network, το Next Generation Core<sup>223</sup> που ονομάστηκε επίσημα 5GC.

Όσον αφορά το φάσμα λειτουργίας του δικτύου 5G, αυτό συνέχισε να λειτουργεί στο ίδιο εύρος συχνοτήτων όπως και το δίκτυο 4G. Η διαφοροποίηση όμως έγκειται πλέον στο γεγονός ότι έχει μελετηθεί και προταθεί η χρήση πολύ υψηλών συχνοτήτων και έτσι μπορούμε να διαχωρίσουμε το διαθέσιμο φάσμα για τη 5G σε δύο μεγάλες ομάδες με διαφορετικά χαρακτηριστικά:

- Frequency range 1<sup>224</sup> που είναι μέχρι τα 6 GHz. Είναι γνωστό και ως 5G Sub-6GHz. Το μέγιστο εύρος καναλιού είναι στα 100MHz
- Frequency range 2<sup>225</sup> από 24.25 έως 52.6 GHz. Είναι γνωστό και ως 5G mmWave. Το μέγιστο εύρος καναλιού είναι στα 400MHz

<sup>222</sup> Στο εξής: MR-DC

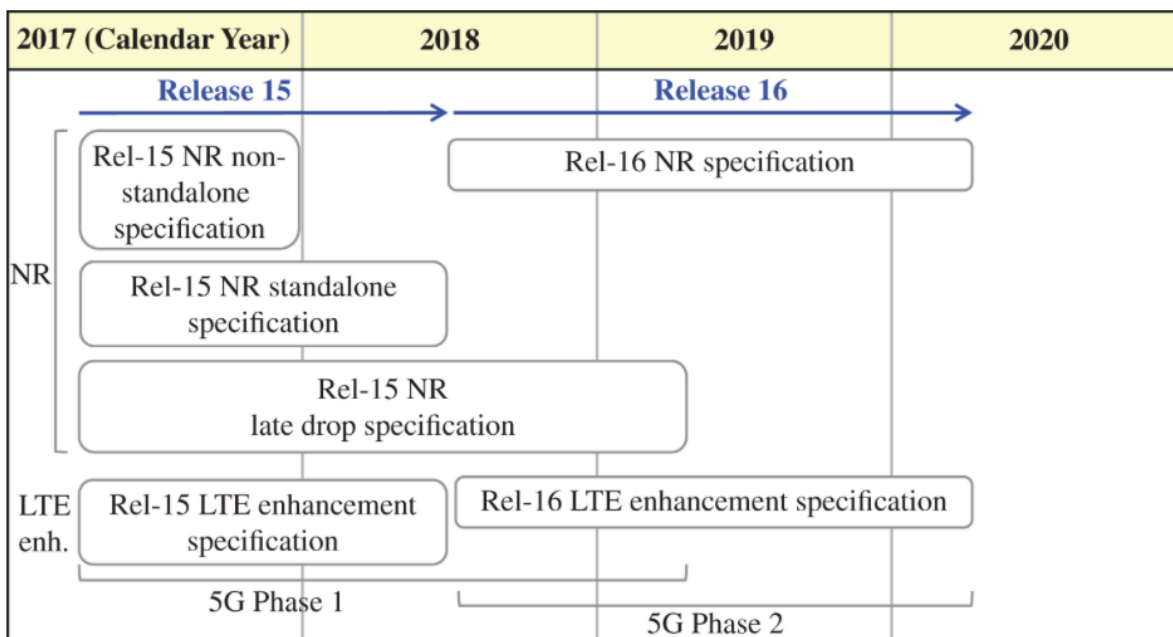
<sup>223</sup> Στο εξής: NGC

<sup>224</sup> Στο εξής: FR1

<sup>225</sup> Στο εξής: FR2



Η κύρια διαφορά των παραπάνω ομάδων συχνοτήτων είναι ότι το 5G Sub-6GHz προσφέρει ελάχιστα μεγαλύτερες ταχύτητες από το LTE, διατηρώντας την ίδια κάλυψη, ενώ το 5G mmWave προσφέρει αισθητά μεγαλύτερες ταχύτητες που μπορεί να φτάσουν έως και τα 20 Gbps για λήψη δεδομένων και έως τα 10 Gbps για αποστολή υπό ιδεατές συνθήκες. Το μειονέκτημα του 5G mmWave, λόγω της χρήσης πολύ υψηλών συχνοτήτων, είναι η πολύ μικρή ακτίνα κάλυψης, που είναι μικρότερη από 1 χιλιόμετρο. Αυτό υποχρεώνει σε πολύ πιο πυκνό δίκτυο κεραιών. Από την άλλη, η ισχύς μετάδοσης είναι μικρότερη, και πιο συγκεκριμένα λιγότερο από 10 watt, ενώ ένας τυπικός σταθμός βάσης απαιτεί γύρω στα 200 watt ανά ζώνη φάσματος. Το 5G NR, όπως και το LTE, μπορεί να λειτουργήσει είτε ως ένα σύστημα FDD, είτε ως TDD.



Εικόνα 38: Χρονοδιάγραμμα για τις Release 15 και 16 του 3GPP

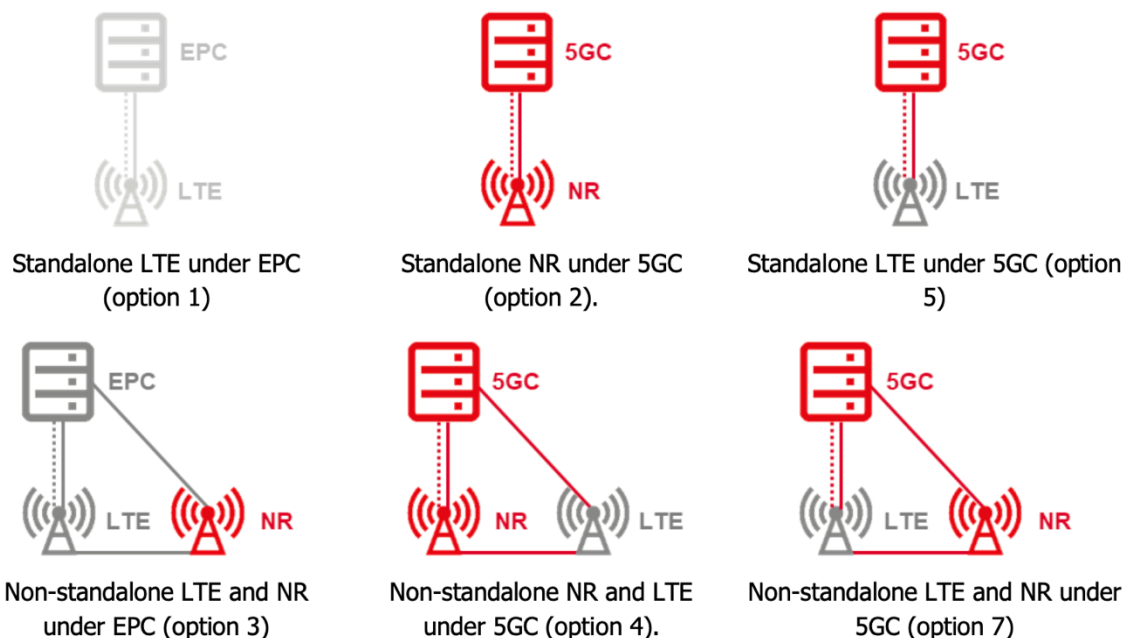
#### 4.1 Δίκτυα πρόσβασης 5G NR και LTE μέσω πολλαπλής συνδεσιμότητας

Με την έλευση του 5G NR αλλά και την ταυτόχρονη υποστήριξη του LTE για τα επόμενα χρόνια με την δυνατότητα προσθήκης του στο νέο δίκτυο 5G, δημιουργήθηκαν διάφοροι τρόποι συνύπαρξης του 5G NR και του LTE και ταυτόχρονης αξιοποίησής τους [32]:

- Η χρήση του δικτύου πρόσβασης LTE για σηματοδοσία και για δεδομένα, όπως εφαρμόζεται ήδη στο σύστημα EPS
- Η χρήση του δικτύου πρόσβασης 5G NR για σηματοδοσία και για δεδομένα
- Η συνδυαστική χρήση των δικτύων πρόσβασης 5G NR και LTE, όπου η κάλυψη του δικτύου πρόσβασης LTE είναι μεγαλύτερη και για αυτό χρησιμοποιείται για σηματοδοσία, ενώ για τα δεδομένα γίνεται αξιοποίηση και των δύο αυτών τεχνολογιών πρόσβασης
- Η συνδυαστική χρήση των δικτύων πρόσβασης 5G NR και LTE όπου η κάλυψη του δικτύου πρόσβασης 5G NR είναι μεγαλύτερη και για αυτό χρησιμοποιείται για σηματοδοσία, ενώ για τα δεδομένα γίνεται αξιοποίηση και των δύο αυτών τεχνολογιών πρόσβασης

Αν λάβουμε υπόψιν τους τέσσερις τρόπους χρήσης των δύο τεχνολογιών πρόσβασης, σε συνδυασμό με το EPC και το νέο 5GC, έχουμε σε θεωρητικό επίπεδο οχτώ διαφορετικές συνδυασμούς:

- Το Option 1: EPC και LTE - σύστημα EPS
- Το Option 2: 5GC και 5G NR - σύστημα 5G Standalone<sup>226</sup>
- Το Option 3: EPC με LTE και 5G NR για δεδομένα - 5G non-standalone<sup>227</sup>
- Το Option 4: 5GC με 5G/NR και LTE για δεδομένα
- Το Option 5: 5GC και LTE - E-UTRA connected to 5GC
- Το Option 6: EPC και 5G NR
- Το Option 7: 5GC με LTE και 5G NR για δεδομένα
- Το Option 8: EPC με 5G/NR και LTE για δεδομένα



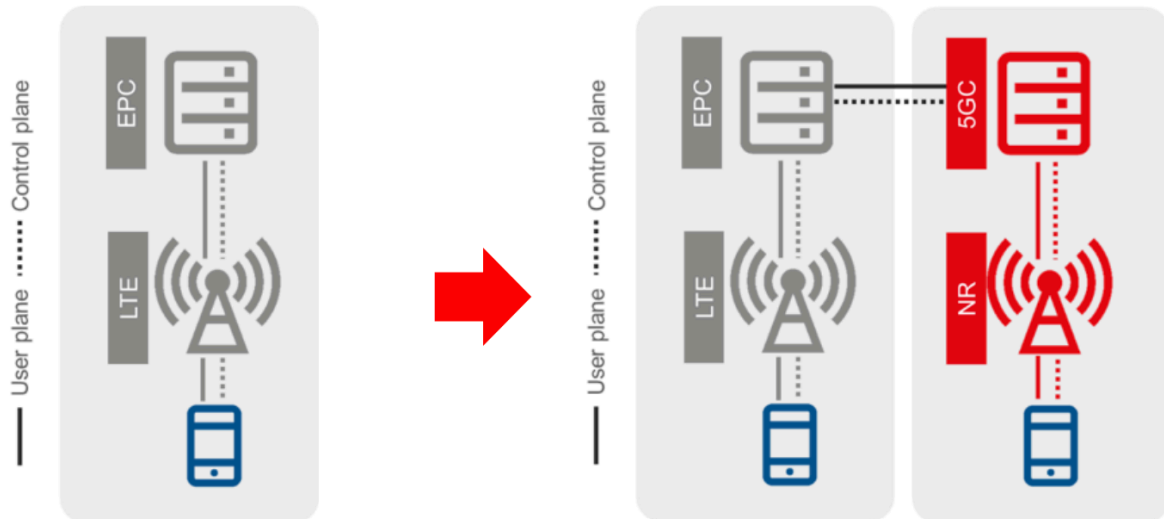
**Εικόνα 39: 3GPP options για συνύπαρξη 5G/NR και LTE**

Από τις παραπάνω δυνατές επιλογές, τα option 6 και 8 απορρίφθηκαν, καθώς απαιτούσαν από το δίκτυο πρόσβασης 5G NR να παρέχει προς τα πίσω συμβατότητα με το EPC, χωρίς την ύπαρξη σημαντικών πλεονεκτημάτων. Το Option 1 ήταν απλά η καταγραφή του ήδη υπάρχοντος συστήματος EPS, οπότε οι υπόλοιπες επιλογές ήταν τα Option 2, 3, 4, 5, και 7.

<sup>226</sup> Στο εξής: 5G SA

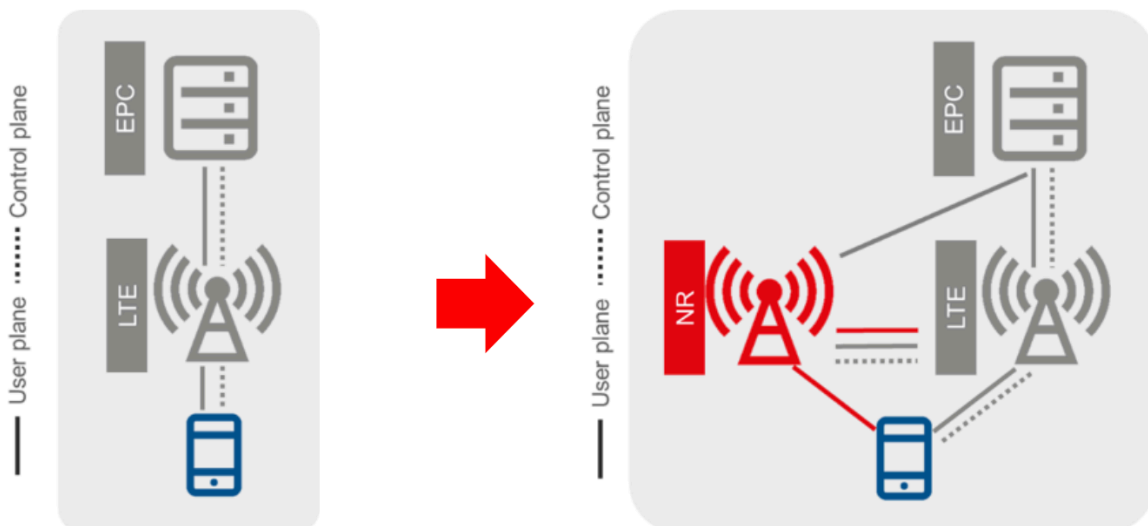
<sup>227</sup> Στο εξής: 5G NSA

Καταναμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς



**Εικόνα 40: Μετάβαση από το σύστημα EPS προς το σύστημα 5G SA**

Από αυτά, τα δύο πιο σημαντικά ήταν το option 2 και 3. Το option 2, γνωστό και ως σύστημα 5G SA, είναι ουσιαστικά ο διάδοχος του συστήματος EPS, και είναι το νέο δίκτυο πρόσβασης 5G NR συνδεδεμένο με το νέο 5GC. Το option 3 είναι το σύστημα 5G NSA, το οποίο είναι γνωστό και ως E-UTRA NR Dual Connectivity<sup>228</sup>, και είναι πολύ σημαντικό καθώς δίνει την δυνατότητα στους φορείς κινητής τηλεφωνίας να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο πρόσβασης 5G NR στο υπάρχον σύστημα EPS, εφόσον αναβαθμιστεί για να υποστηρίξει το EN-DC, μειώνοντας έτσι το οικονομικό κόστος για την παροχή υπηρεσιών 5G. Ακόμη, η ταχύτητα με την οποία οι φορείς μπορούσαν να προσφέρουν υπηρεσίες 5G ήταν η μικρότερη δυνατή, χωρίς όμως να έχουν τα οφέλη από την χρήση του πλήρους συστήματος 5G SA με την ύπαρξη και του 5GC.



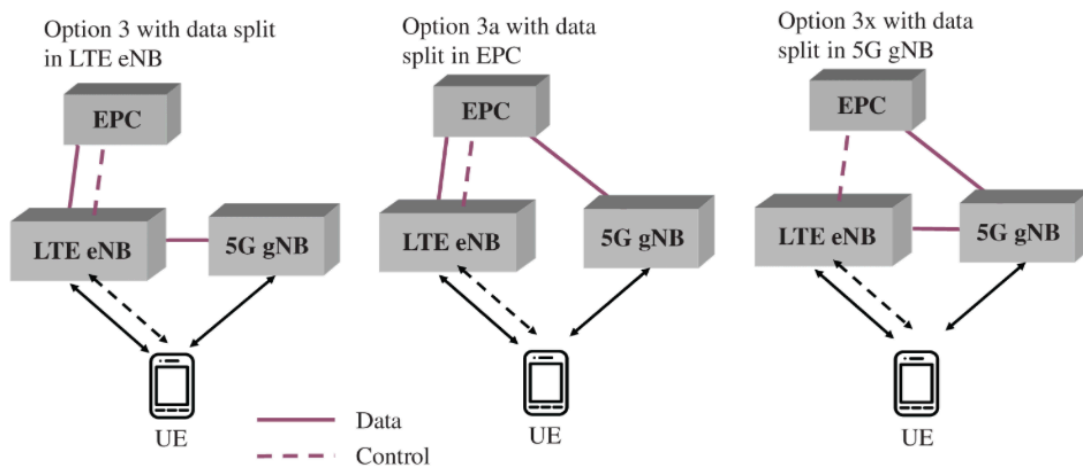
**Εικόνα 41: Μετάβαση από το σύστημα EPS προς το σύστημα 5G NSA**

<sup>228</sup> Στο εξής: EN-DC

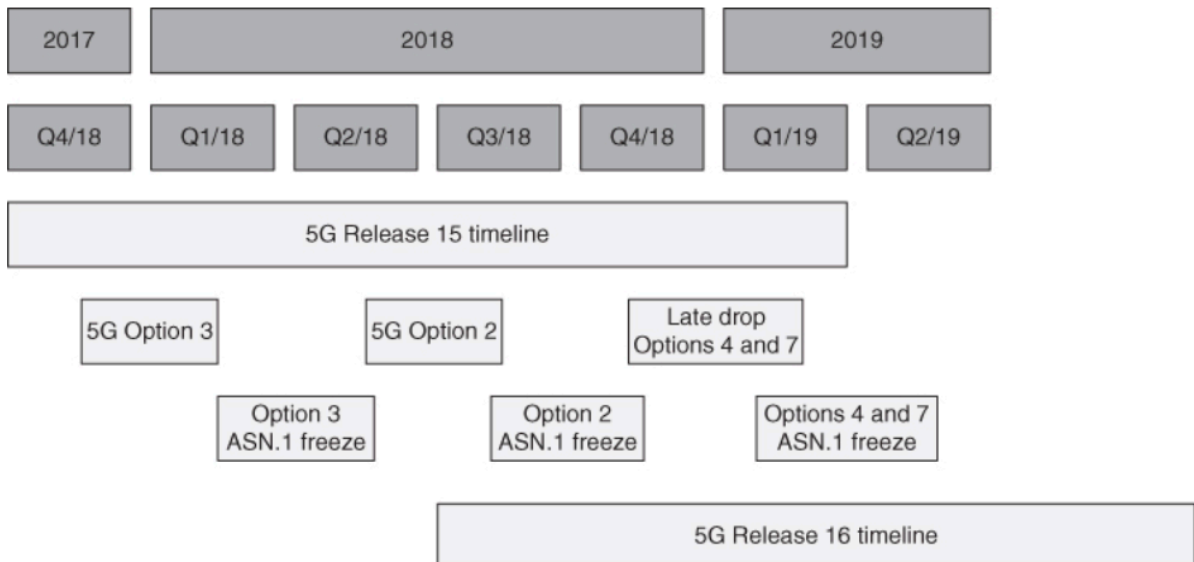
Το σύστημα 5G NSA Option 3 μπορεί να έχει 3 υπό-παραλλαγές:

- Το Option 3
- Το Option 3a
- Το Option 3x

Η κύρια διαφορά έγκειται στο σημείο όπου γίνεται ο διαχωρισμός των δεδομένων, εφόσον έχουμε δύο διαφορετικά δίκτυα πρόσβασης. Στην πρώτη περίπτωση, ο διαχωρισμός των δεδομένων πραγματοποιείται στο σταθμό βάσης eNB. Στην περίπτωση του Option 3a, αυτός ο διαχωρισμός υφίσταται στο EPC, ενώ στην τελευταία γίνεται στον ίδιο τον σταθμό βάσης του 5G NR.



**Εικόνα 42: 5G NSA Option 3, 3a και 3x**



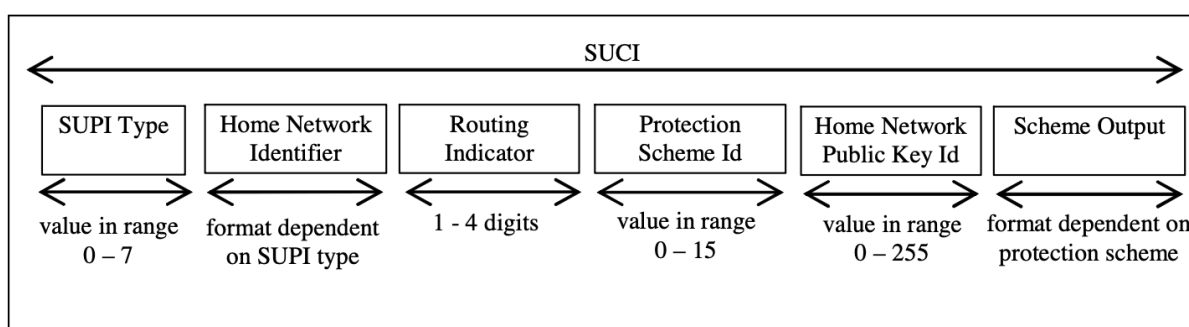
**Εικόνα 43: Τα 3GPP options και οι χρόνοι έκδοσής τους με βάση Releases**

## 4.2 Το σύστημα 5G System - 5GS

Η αναγνώριση ενός συγκεκριμένου δικτύου ανά χώρα είναι εφικτή με το PLMN, όπως και στη 4G. Και πάλι υπάρχει η έννοια της περιοχής TA που αποτελείται από κυψέλες, με την διαφορά ότι πλέον ο κωδικός Tracking Area Code έχει μέγεθος 24 bit αντί για 16 bit. Το αναγνωριστικό του συνδρομητή παραμένει το IMSI όπως και πρωτύτερα, αλλά επεκτείνεται με την έννοια του αναγνωριστικού Subscription Permanent Identifier<sup>229</sup>, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει ένα από τα παρακάτω:

- IMSI
- Network Access Identifier<sup>230</sup>

Το αναγνωριστικό SUPI δεν στέλνεται ποτέ σε μορφή «απλού κειμένου», αλλά κρυπτογραφείται ως το Subscription Concealed Identifier<sup>231</sup>, με την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 44: Μορφότυπο SUPI

Αντίστοιχα, το IMEI/IMEISV για την αναγνώριση της συσκευής ME χρησιμοποιείται εκ νέου, και έχουμε την επέκτασή του μέσω του αναγνωριστικού Permanent Equipment Identifier<sup>232</sup>, το οποίο μπορεί να έχει τις παρακάτω εκδοχές:

- IMEI
- IMEISV
- 48-bit MAC identifier
- IEEE Extended Unique Identifier<sup>233</sup>

Ο αριθμός MSISDN συνεχίζει να χρησιμοποιείται και στο σύστημα 5GS. Η προσθήκη ενός νέου αναγνωριστικού είναι το Generic Public Subscription Identifier<sup>234</sup>, το οποίο είναι ένα δημόσιο αναγνωριστικό για τον εντοπισμό ενός συνδρομητή από ένα

<sup>229</sup> Στο εξής: SUPI

<sup>230</sup> Στο εξής: NAI

<sup>231</sup> Στο εξής: SUCI

<sup>232</sup> Στο εξής: PEI

<sup>233</sup> Στο εξής: EUI-64

<sup>234</sup> Στο εξής: GPSI

εξωτερικό δίκτυο και μπορεί να είναι είτε ο τηλεφωνικός του αριθμός είτε της μορφής user@company.

Το προσωρινό αναγνωριστικό του συνδρομητή στο σύστημα 5GS είναι πλέον το 5G Globally Unique Temporary UE Identity<sup>235</sup> το οποίο απαρτίζεται από:

- Το Globally Unique AMF Identifier<sup>236</sup>, το οποίο δείχνει το AMF και έχει μέγεθος 48 bit
- Το 5G Temporary Mobile Subscriber Identity<sup>237</sup>, το οποίο αναγνωρίζει ένα συνδρομητή στα πλαίσια ενός συγκεκριμένου AMF, το οποίο έχει μέγεθος 32 bit

Το προαναφερθέν GUAMI απαρτίζεται από:

- Το PLMN ID, που έχει μέγεθος 24 bit
- Το AMF Identifier, μεγέθους 24 bit, που διαχωρίζεται:
  - Στο AMF Region ID, 8 bit
  - Στο AMF Set ID, 10 bit
  - Στο AMF Pointer, 6 bit

#### 4.2.1 Το τερματικό του χρήστη - 5G UE

Το κινητό τερματικό είναι για ακόμη μία φορά γνωστό και πάλι ως τερματικό UE. Η ύπαρξη κάρτας UICC και συσκευής ME συνεχίζει να υφίσταται, και πλέον έχει την δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο πρόσβασης 5G NR. Η σύνδεση στο δίκτυο είναι εφικτή με μια κάρτα 3G SIM, όπως και στο σύστημα EPS.

#### 4.2.2 Δίκτυο πρόσβασης - NG-RAN

Το νέο δίκτυο πρόσβασης στην εποχή της 5G ονομάζεται Next Generation Radio Access Network<sup>238</sup>, και περιγράφεται από τα τεχνικά έγγραφα 3GPP TS 38.300 [33] και 3GPP TS 38.401 [34]. Αποτελείται από κόμβους NG-RAN, όπου κάθε κόμβος μπορεί να είναι ένα από τα παρακάτω:

- Ένας σταθμός βάσης gNB στον οποίο τερματίζουν τα NR πρωτόκολλα για το επίπεδο ελέγχου και χρήστη από το τερματικό UE, και είναι ο πρακτικά ο σταθμός βάσης για το 5G NR
- Ένα σταθμός βάσης ng-eNB στον οποίο τερματίζουν τα E-UTRA πρωτόκολλα για το επίπεδο ελέγχου και χρήστη από το τερματικό UE, δηλαδή είναι ένας αναβαθμισμένος σταθμός eNodeB, που μπορεί να συνδεθεί στο 5GC

---

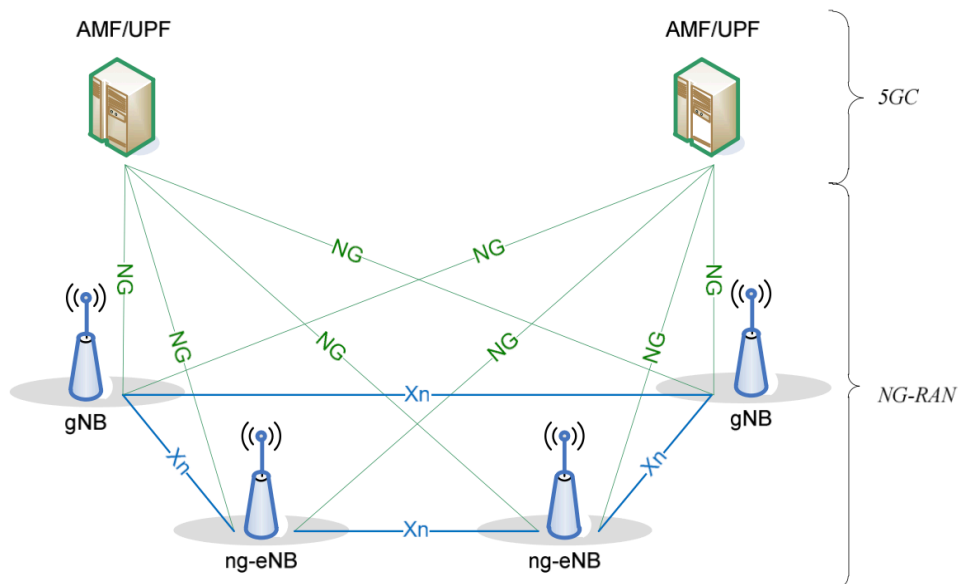
<sup>235</sup> Στο εξής: 5G-GUTI

<sup>236</sup> Στο εξής: GUAMI

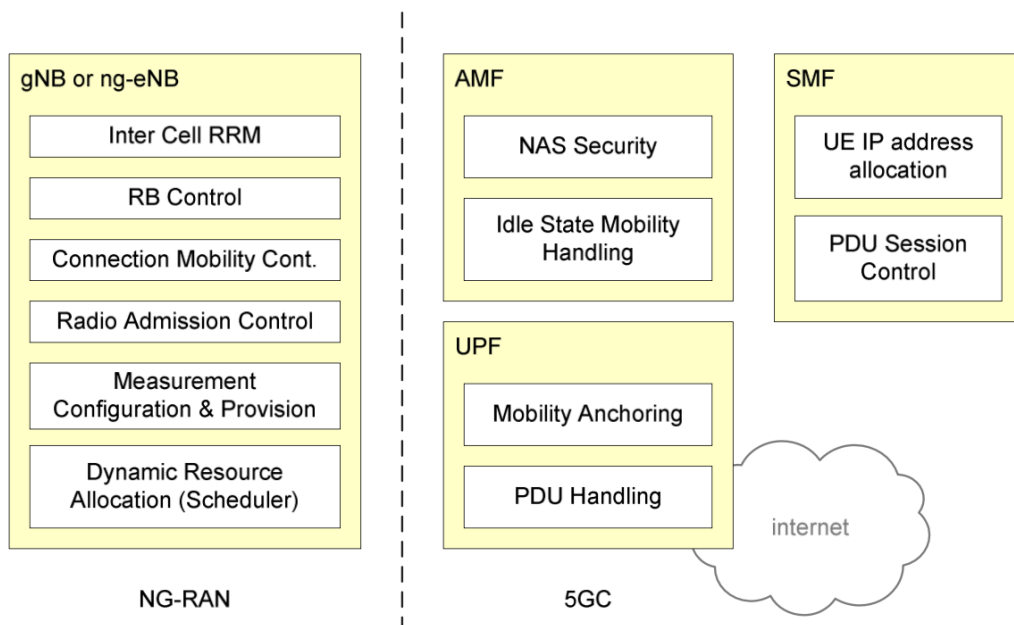
<sup>237</sup> Στο εξής: 5G-TMSI

<sup>238</sup> Στο εξής: NG-RAN

Συνεπώς έχουμε πλέον δύο είδη πρόσβασης, το E-UTRA από το σύστημα EPS και το 5G NR, όπου συνυπάρχουν κάτω από την ομπρέλα του δικτύου πρόσβασης NG-RAN. Όλοι οι σταθμοί βάσης, gNB και ng-eNB, μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους μέσω της διεπαφής Xn. Η σύνδεση με το Core Network γίνεται μέσω της διεπαφής NG. Και οι δύο αυτές διεπαφές χωρίζονται σε επίπεδο ελέγχου και επίπεδο χρήστη. Πιο αναλυτικά, τα Xn-C, τα NG-C ή αλλιώς N2 είναι οι διεπαφές για την σηματοδότηση του επιπέδου ελέγχου και τα Xn-U, τα NG-U ή αλλιώς N3 για την μεταφορά των πακέτων στο επίπεδο χρήστη.

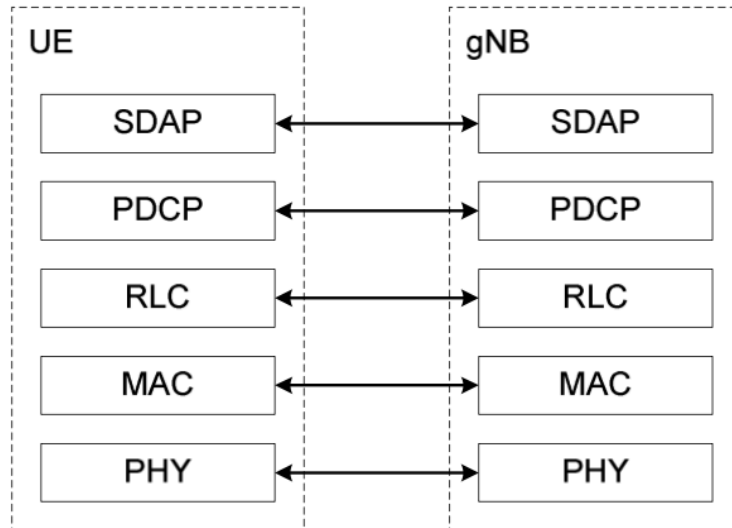


**Εικόνα 45: Αρχιτεκτονική δικτύου πρόσβασης NG-RAN**

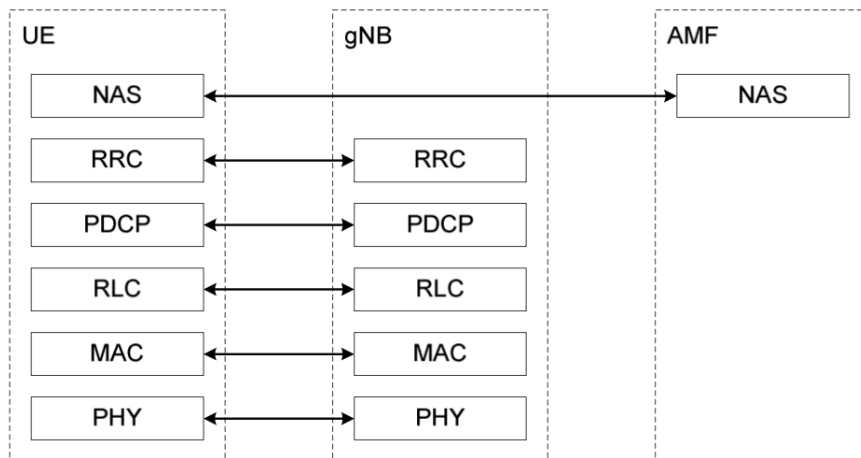


**Εικόνα 46: Οι διάφορες λειτουργίες στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN και στο 5GC**

Τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται στις διεπαφές είναι αρκετά παρεμφερή με το σύστημα EPS, καθώς για το επίπεδο χρήστη συνεχίζεται η χρήση του πρωτοκόλλου GTPv1-U, ενώ για το επίπεδο ελέγχου έχουμε πλέον τα πρωτόκολλα Xn Application Protocol<sup>239</sup> και NG Application Protocol<sup>240</sup>, που είναι ουσιαστικά η εξέλιξη των X2-AP και S1-AP αντίστοιχα από το σύστημα EPS.



Εικόνα 47: Στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου χρήστη στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN



Εικόνα 48: Στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου ελέγχου στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN

Μία διαφορά με το σύστημα EPS είναι ότι ενώ ο σταθμός βάσης eNodeB ήταν ένας κόμβος του οποίου ο τρόπος υλοποίησης ήταν στην διακριτική ευχέρεια των κατασκευαστών, πλέον η κοινοπραξία 3GPP ξεκίνησε την περαιτέρω αποδόμηση της λογικής οντότητας του σταθμού βάσης gNB σε πιο μικρά και ευέλικτα συστήματα, του

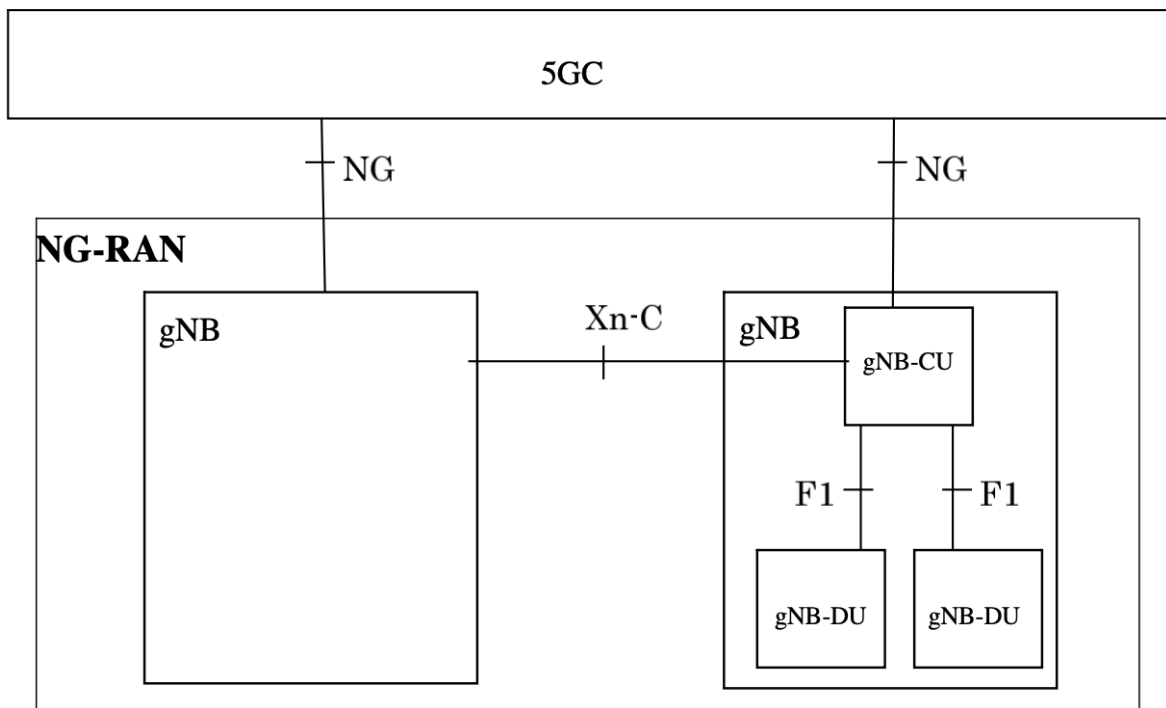
<sup>239</sup> Στο εξής: Xn-AP

<sup>240</sup> Στο εξής: NG-AP



οποίου η σύνδεση μεταξύ τους ορίζεται ρητά από τις τεχνικές προδιαγραφές. Συνεπώς έχουμε τις εξής δυνατές επιλογές:

- Το κλασικό μονολιθικό σταθμό βάσης gNB
- Τον διαχωρισμό του σταθμού βάσης gNB σε δύο επιμέρους μέρη, το τμήμα gNB Central Unit<sup>241</sup> και το τμήμα gNB Distributed Unit<sup>242</sup>. Η σύνδεση μεταξύ αυτών των τμημάτων πραγματοποιείται μέσω της διεπαφής F1. Ένα τμήμα gNB-CU μπορεί να συνδεθεί με ένα ή περισσότερα τμήματα gNB-DU.



**Εικόνα 49: Αρχιτεκτονική αποδόμησης του gNB στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN**

Το τμήμα gNB-CU μπορεί να χωριστεί ακόμη περισσότερο σε gNB-CU-CP και gNB-CU-UP. Ένα σταθμός βάσης gNB αποτελείται από ένα τμήμα gNB-CU-CP, ένα ή περισσότερα τμήματα gNB-CU-UP και ένα ή περισσότερα τμήματα gNB-DU. Το τμήμα gNB-CU-CP συνδέεται με το gNB-DU μέσω της διεπαφής F1-C και με το gNB-DU μέσω της διεπαφής F1-U. Το gNB-CU-UP συνδέεται με το gNB-CU-CP μέσω της διεπαφής E1. Ένα gNB-DU συνδέεται μόνο με ένα gNB-CU-CP και ένα gNB-CU-UP συνδέεται μόνο με ένα gNB-CU-CP.

Ένα τμήμα gNB-DU μπορεί να συνδεθεί με πολλά τμήματα gNB-CU-UP που είναι υπό τον έλεγχο του ίδιου gNB-CU-CP και ένα gNB-CU-UP μπορεί να συνδεθεί σε πολλά gNB-DU που είναι υπό τον έλεγχο του ίδιου gNB-CU-CP. Τα επίπεδα PHY, RLC και MAC τερματίζουν στο gNB-CU-UP, ενώ τα επίπεδα RRC, service data adaptation protocol<sup>243</sup>, και PDCP τερματίζουν στο τμήμα gNB-CU.

<sup>241</sup> Στο εξής: gNB-CU

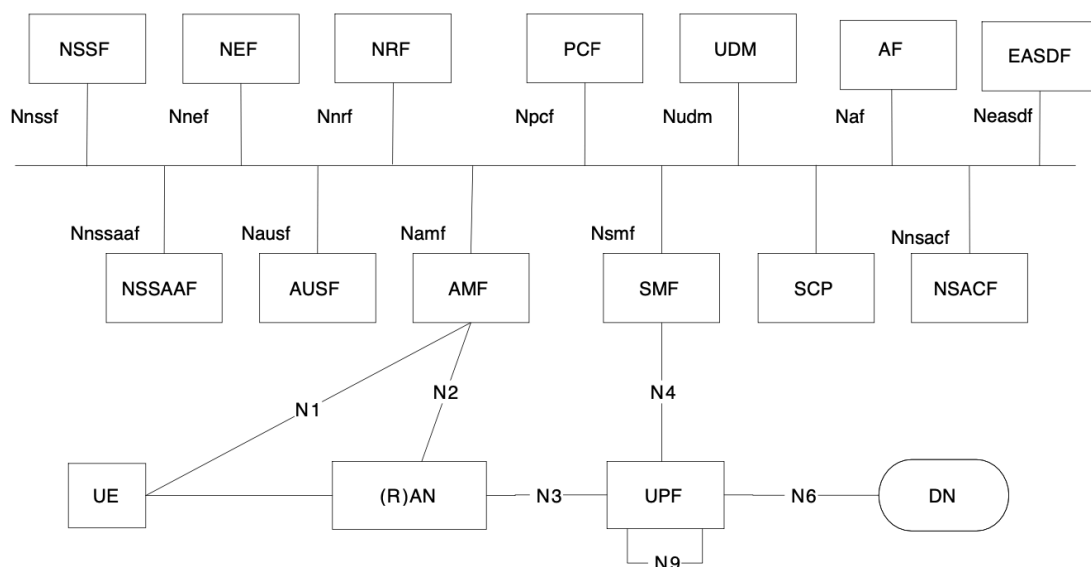
<sup>242</sup> Στο εξής: gNB-DU

<sup>243</sup> Στο εξής: SDAP

### 4.2.3 Το δίκτυο πυρήνα - 5GC

Το νέο Core Network στο δίκτυο 5G ονομάστηκε επισήμως 5GC [35][36]. Σε αντιπαροβολή με το EPC, έχει προφανώς κάποιες ομοιότητες αλλά και κάποιες σημαντικές διαφορές. Πλέον οι παραδοσιακές οντοτήτες (network elements) έχουν αντικατασταθεί από την έννοια της αυτόνομης λειτουργικής οντότητας<sup>244</sup> (Network Functions), το οποίο συμπίπτει με την συμπίεση με το cloud, και τη χρήση containers που απαιτούν οι νέες τεχνολογίες αιχμής. Πλέον το 5GC είναι πιο σημαντικό από ποτέ, καθώς εκτός από την ραχοκοκαλία για το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN, είναι πλέον και το Core Network για το δίκτυο πρόσβασης non-3GPP, όπως σύνδεση μέσω Wi-Fi, κ.α. Ο διαχωρισμός μεταξύ επιπέδου ελέγχου και επιπέδου χρήστη που είχε αρχίσει από τη 4G είναι πιο εμφανής από ποτέ και επιπρόσθετα υπάρχει η δυνατότητα του διαχωρισμού της λογικής και των δεδομένων για την λειτουργία των συστημάτων, οδηγούμενοι έτσι σε ακαταστασιακά NF, έχοντας ένα κεντρικό αποθηκευτικό μέρος.

Η μεγαλύτερη αλλαγή ίσως που αφορά τη σηματοδοσία μεταξύ των οντοτήτων NF στο 5GC, έγκειται σε αυτό που αναφέρεται ως οριζόντια αρχιτεκτονική Service Based Architecture<sup>245</sup>. Παλαιότερα, η επικοινωνία μεταξύ δύο οντοτήτων υλοποιούνταν με μία προδιαγεγραμμένη διεπαφή και ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο το οποίο ήταν σημείο σε σημείο. Πλέον η κάθε οντότητα NF μπορεί να είναι είτε ένας καταναλωτής υπηρεσίας (Service Consumer) ή ένας παραγωγός υπηρεσί-ας/ων (Service Producer) ή και τα δύο. Ένας Service Consumer μπορεί να καταναλώσει υπηρεσίες που παρέχονται από έναν Service Producer. Αντίστοιχα ένας Service Producer, παρέχει μία ή παραπάνω υπηρεσίες στους Service Consumer. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας αφορά μόνο το επίπεδο ελέγχου. Για αυτόν τον λόγο υπάρχουν 2 διαφορετικές απεικονίσεις του 5GC, η service-based απεικόνιση και η reference point απεικόνιση, όπως φαίνεται παρακάτω:

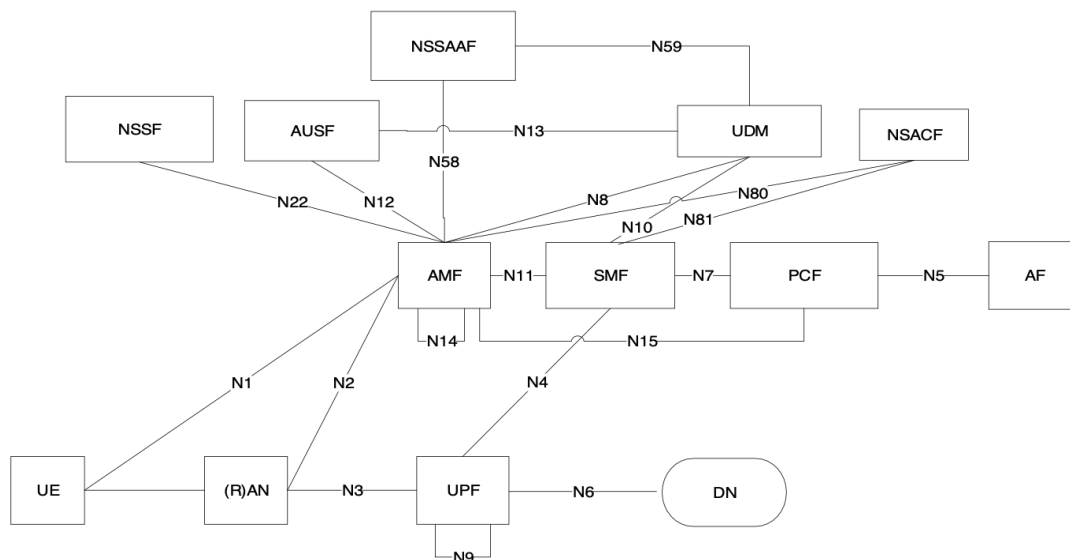


Εικόνα 50: Σύστημα 5GS με service-based απεικόνιση

<sup>244</sup> Στο εξής: NF

<sup>245</sup> Στο εξής: SBA

Η επικοινωνία στην SBA αρχιτεκτονική πραγματοποιεί αξιοποίηση του HTTP-based κλήσεων, που εφαρμόζεται ήδη από πολλές εφαρμογές ιστού, δηλαδή υπάρχει ένα πλαίσιο κανόνων που περιγράφει πως μπορεί να γίνει πρόσβαση σε μία απομακρυσμένη υπηρεσία με την χρήση προδιαγεγραμμένων API. Οπότε πλέον έχουμε τις διεπαφές Service Based Interface<sup>246</sup>. Στην ουσία έχουμε χρήση του πρωτοκόλλου HTTP/2 για την λειτουργία πάνω σε πόρους που γίνονται προσπέλαση με την χρήση Uniform Resource Identifiers<sup>247</sup>.



Εικόνα 51: Σύστημα 5GS με reference point απεικόνιση

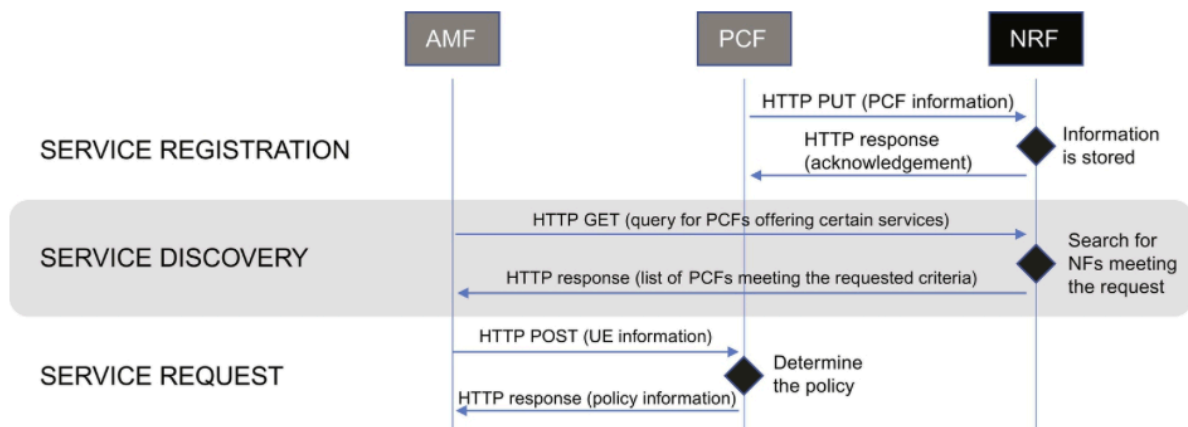
Η οντότητα NF που στέλνει ένα αίτημα μέσω της διαδικασίας Service Request διαδραματίζει τον ρόλο του Service Consumer, ενώ η οντότητα NF που λαμβάνει το αίτημα και το επεξεργάζεται και εν συνεχεία το απαντάει, διαδραματίζει τον ρόλο του Service Producer. Για τον εντοπισμό των παρεχόμενων υπηρεσιών από τους Service Consumers, πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαδικασία Service Discovery. Για να γίνει αυτό, θα πρέπει όλοι οι Service Producers να δηλώσουν σε ένα κεντρικό σημείο τις υπηρεσίες που προσφέρουν. Συνεπώς, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα στο δίκτυο να είναι εφικτό να βρίσκει τις υπηρεσίες που παρέχονται από όλες τις οντότητες NF που διαδραματίζουν τον ρόλο του Service Producer. Η οντότητα που κατέχει αυτές τις πληροφορίες ονομάζεται Network Repository Function<sup>248</sup>. Συνεπακόλουθα, η μόνη πληροφορία που πρέπει να είναι γνωστό στις υπόλοιπες οντότητες NF είτε ως Service Consumer είτε ως Service Producer, είναι το πως θα επικοινωνήσουν με την οντότητα του NRF. Μέσω του NRF μπορούν να εντοπίσουν κάθε παρεχόμενη υπηρεσία από τις υπόλοιπες οντότητες NF του δικτύου μέσω της διαδικασίας του Service Discovery και επίσης για να παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις υπηρεσίες που παρέχουν, μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται Service Registration.

<sup>246</sup> Στο εξής: SBI

<sup>247</sup> Στο εξής: URI(s)

<sup>248</sup> Στο εξής: NRF

Παρακάτω φαίνεται ένα παράδειγμα από τις 3 αυτές διαδικασίες συνοπτικά:



**Εικόνα 52: Service Registration, Service Discovery και Service Request**

Ακόμη, ένας Service Consumer μπορεί να εγγραφεί σε μία υπηρεσία ενός Service Producer. Όταν συντρέχουν οι κατάλληλοι λόγοι, ο Service Producer στέλνει μία ενημέρωση, μια λειτουργία που ονομάζεται *Subscribe & Notify*.

Οι απαραίτητες οντότητες NF, οι οποίες απαιτούνται για την λειτουργία του 5GC είναι οι εξής [36]:

- Authentication Server Function<sup>249</sup>
- Access and Mobility Management Function<sup>250</sup>
- Session Management Function<sup>251</sup>
- Unified Data Management<sup>252</sup>
- Unified Data Repository<sup>253</sup>
- User Plane Function<sup>254</sup>

Οι υπόλοιπες οντότητες NF που ορίζονται από το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 23.501 [37] είναι οι κάτωθι:

- Unstructured Data Storage Function<sup>255</sup>

<sup>249</sup> Στο εξής: AUSF

<sup>250</sup> Στο εξής: AMF

<sup>251</sup> Στο εξής: SMF

<sup>252</sup> Στο εξής: UDM

<sup>253</sup> Στο εξής: UDR

<sup>254</sup> Στο εξής: UPF

<sup>255</sup> Στο εξής: UDSF

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

- Network Exposure Function<sup>256</sup>
- Network Repository Function<sup>257</sup>
- Network Slice Admission Control Function<sup>258</sup>
- Network Slice-specific and SNPN Authentication and Authorization Function<sup>259</sup>
- Network Slice Selection Function<sup>260</sup>
- Policy Control Function<sup>261</sup>
- UE radio Capability Management Function<sup>262</sup>
- Application Function<sup>263</sup>
- 5G-Equipment Identity Register<sup>264</sup>
- Network Data Analytics Function<sup>265</sup>
- CHarging Function<sup>266</sup>
- Time Sensitive Networking AF<sup>267</sup>
- Time Sensitive Communication and Time Synchronization Function<sup>268</sup>
- Data Collection Coordination Function<sup>269</sup>
- Analytics Data Repository Function<sup>270</sup>
- Messaging Framework Adaptor Function<sup>271</sup>

---

<sup>256</sup> Στο εξής: NEF

<sup>257</sup> Στο εξής: NRF

<sup>258</sup> Στο εξής: NSACF

<sup>259</sup> Στο εξής: NSSAAF

<sup>260</sup> Στο εξής: NSSF

<sup>261</sup> Στο εξής: PCF

<sup>262</sup> Στο εξής: UCMF

<sup>263</sup> Στο εξής: AF

<sup>264</sup> Στο εξής: 5G-EIR

<sup>265</sup> Στο εξής: NWDAF

<sup>266</sup> Στο εξής: CHF

<sup>267</sup> Στο εξής: TSN AF

<sup>268</sup> Στο εξής: TSCTSF

<sup>269</sup> Στο εξής: DCCF

<sup>270</sup> Στο εξής: ADRF

- Non-Seamless WLAN Offload Function<sup>272</sup>
- Non-3GPP InterWorking Function<sup>273</sup>
- Trusted Non-3GPP Gateway Function<sup>274</sup>
- Wireline Access Gateway Function<sup>275</sup>
- Trusted WLAN Interworking Function<sup>276</sup>

Ορίζονται επίσης και οι δύο παρακάτω οντότητες - network entities, οι οποίες παρεμβάλλονται ανάμεσα στην επικοινωνία δύο οντοτήτων NF, συνεπώς νοούνται ως proxy εξυπηρετητές:

- Service Communication Proxy<sup>277</sup>
- Security Edge Protection Proxy<sup>278</sup>

Η οντότητα AUSF, όπως φαίνεται και από την ονομασία του, έχει ως κύριο μέλημά την επαλήθευση της ταυτότητας και την εξουσιοδότηση των συνδρομητών. Επιπρόσθετα προσφέρει υπηρεσίες δημιουργίας κλειδιών για την ασφαλή επικοινωνία με το τερματικό UE και το δίκτυο. Η οντότητα AUSF ανήκει πάντα στο πάτριο δίκτυο του συνδρομητή.

Η οντότητα AMF είναι ουσιαστικά το κεντρικό κομμάτι του δικτύου όσον αφορά τον έλεγχο πρόσβασης και την διαχείριση της κινητικότητας των συνδρομητών. Σε αυτή την οντότητα τερματίζει η διεπαφή NG-C και επίσης ελέγχει το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN. Ακόμη, τερματίζει η σηματοδότηση του επιπέδου NAS, για τη νοητή διεπαφή N1 με το τερματικό UE. Είναι επίσης υπεύθυνη για την έναρξη της επαλήθευσης της ταυτότητας των συνδρομητών και της εξουσιοδότησης των συνδρομητών το οποίο πραγματοποιεί ουσιαστικά η οντότητα του AUSF με την βοήθεια της AMF, ενώ ελέγχει επίσης τους περιορισμούς περιαγωγής (roaming restrictions) που μπορεί να ισχύουν για τον συνδρομητή στην εκάστοτε περιοχή. Στις αρμοδιότητες της AMF είναι η ενεργοποίηση της ασφάλειας των επικοινωνιών στα επίπεδα AS και NAS. Τέλος, ασχολείται με την κινητικότητα των συνδρομητών στο δίκτυο, ελέγχοντας και καταγράφοντας την περιοχή στην οποία βρίσκεται ο συνδρομητής, και επίσης ειδοποιεί τα ανενεργά τερματικά UE να συνδεθούν με το δίκτυο πρόσβασης όταν έχουν δεδομένα να λάβουν.

Αν και η οντότητα AMF φαίνεται να υλοποιεί τις περισσότερες λειτουργίες του κόμβου MME του συστήματος EPS, εντούτοις δεν ασχολείται καθόλου με την διαχείριση των συνεδριών, που πλέον διαχειρίζεται η οντότητα SMF, και πιο συγκεκριμένα ασχολείται

---

<sup>271</sup> Στο εξής: MFAF

<sup>272</sup> Στο εξής: NSWOF

<sup>273</sup> Στο εξής: N3IWF

<sup>274</sup> Στο εξής: TNGF

<sup>275</sup> Στο εξής: W-AGF

<sup>276</sup> Στο εξής: TWIF

<sup>277</sup> Στο εξής: SCP

<sup>278</sup> Στο εξής: SEPP

με την εγκαθίδρυση, την τροποποίηση καθώς και τον τερματισμό των διαφόρων ροών επικοινωνίας του συνδρομητή. Για να γίνει αυτό, έχει επικοινωνία με το τερματικό UE μέσω της AMF, που προωθεί τα αντίστοιχα μηνύματα σηματοδότησης στο επίπεδο NAS που αφορούν την διαχείριση συνεδριών. Επιπρόσθετα στέλνει τις κατάλληλες πληροφορίες που αφορούν τις ροές επικοινωνίας προς το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN διαμέσου της AMF ως διαμεσολαβητή. Στις αρμοδιότητές της SMF ανήκει και η ανάθεση εξωτερικής διεύθυνσης IP για τις συνεδρίες του συνδρομητή, καθώς και η επιλογή και έλεγχος της οντότητας UPF, που είναι το επίπεδο χρήστη στο 5GC. Τέλος, ελέγχει και εφαρμόζει τις διάφορες πολιτικές που ισχύουν για τα δεδομένα των συνδρομητών και έχει επίσης λειτουργίες χρέωσης της χρήσης των δεδομένων και λειτουργίες νόμιμης υποκλοπής (lawful interception).

Η οντότητα UDM είναι η αντίστοιχη βάση «HSS» στο 5GC. Μέσω της UDM μπορούν οι διάφορες οντότητες NF όπως η AMF και η SMF, να λάβουν τις πληροφορίες και στοιχεία του συνδρομητή, καθώς και να λαμβάνει την τοποθεσία του τερματικού UE από τη AMF και να το ενημερώνει καταλλήλως. Εγκρίνει επίσης την πρόσβαση των συνδρομητών ανάλογα τα τους περιορισμούς του κάθε συνδρομητή, και επίσης είναι ενήμερο για τη AMF με την οποία είναι συνδεδεμένος ο κάθε συνδρομητής. Παρέχει επίσης στη AUSF τις κατάλληλες κρυπτογραφικές τιμές για να μπορέσει να επαληθεύσει την ταυτότητα των συνδρομητών. Στην ουσία, η UDM είναι ενδιάμεση οντότητα για τις πληροφορίες των συνδρομητών που είναι αποθηκευμένα στην UDR. Συνεπώς η οντότητα UDR είναι η πραγματική βάση δεδομένων που περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες των συνδρομητών και τις διάφορες πολιτικές που ισχύουν στο δίκτυο. Η UDR παρέχει υπηρεσίες στην UDM, τη PCF και τη NEF.

Τέλος η οντότητα UPF είναι ουσιαστικά το σημείο του δικτύου 5GC από το οποίο διέρχονται τα πακέτα των συνδρομητών από και προς τα Data Networks<sup>279</sup> με τα οποία είναι συνδεδεμένο. Όπως γίνεται αντιληπτό, τερματίζει την διεπαφή NG-U του δικτύου πρόσβασης NG-RAN, και χειρίζεται και προωθεί τα πακέτα με τα δεδομένα των συνδρομητών. Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό στο 5GC είναι η δυνατότητα χρήσης πολλών οντοτήτων UPF μαζί, ως αλυσίδα.

Τέλος, η οντότητα NRF, αν και δεν είναι υποχρεωτικό να υπάρχει στο δίκτυο, είναι πολύ σημαντική, καθώς συμβάλλει στις διαδικασίες Service Registration και Service Discovery όπως έχει αναφερθεί ήδη. Χωρίς τη NRF, θα πρέπει κάθε οντότητα NF να έχει τοπικά τις πληροφορίες για τις υπηρεσίες των οντοτήτων NF που παρέχονται στο δίκτυο 5GC.

#### 4.2.4 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στο δίκτυο 5G

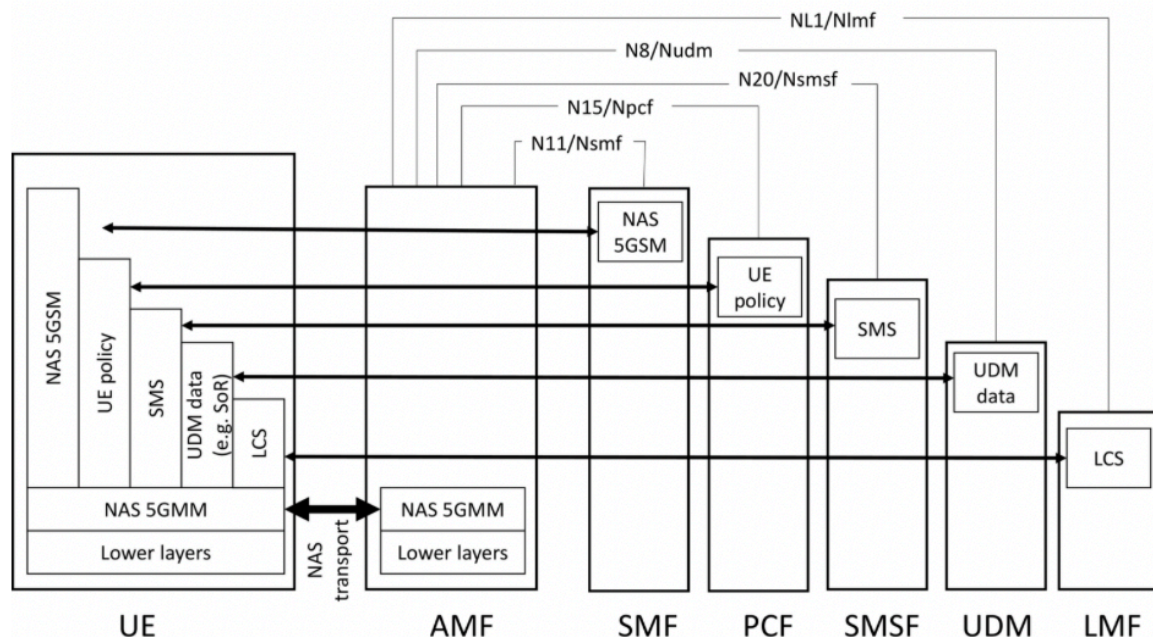
Ένα από τα βασικότερα πρωτόκολλα του 5GC είναι το 5GS-NAS [38], το οποίο είναι μεταξύ του τερματικού UE και του 5GC. Στην ουσία τα μηνύματα της σηματοδότησης του επιπέδου NAS μεταφέρονται μέσω του δικτύου πρόσβασης NG-RAN από και προς το τερματικό UE. Η «σύνδεση» αυτή παριστάνεται λογικά από τη διεπαφή N1. Κύριες λειτουργίες που υλοποιούνται στο πρωτόκολλο 5GS-NAS είναι η εγγραφή του τερματικού UE - UE registration με το 5GC, λειτουργίες που αφορούν την ασφάλεια και

---

<sup>279</sup> Στο εξής: DN(s)

την κινητικότητα των συνδρομητών στο δίκτυο, καθώς και λειτουργίες για την δημιουργία συνεδριών για την μεταφορά δεδομένων.

Καθώς το πρωτόκολλο 5GS-NAS είναι αρκετά παρόμοιο με το πρωτόκολλο EPS-NAS, χωρίζεται αντίστοιχα στο NAS 5GS Mobility Management<sup>280</sup> και στο NAS 5GS Session Management<sup>281</sup>. Επειδή η AMF δεν ασχολείται με τη σηματοδοσία για την διαχείριση των συνεδριών αλλά εκεί τερματίζεται η σηματοδοσία του επιπέδου NAS, τα μηνύματα NAS 5GSM προωθούνται από τη AMF προς τη SMF. Αντίστοιχα, οποιαδήποτε άλλη πληροφορία που μεταφέρεται μέσω του επιπέδου NAS και έχει αποδέκτη μία άλλη οντότητα NF πέρα από τη AMF, όπως τις οντότητες PCF, SMSF, UDM και LMF τότε αυτή προωθείται καταλλήλως.



**Εικόνα 53: Σηματοδοσία στο επίπεδο NAS μεταξύ του τερματικού UE και του 5GC**

Μία διαφορά σε σχέση με το πρωτόκολλο EPS-NAS, είναι ότι το πρωτόκολλο 5GS-NAS χρησιμοποιείται όχι μόνο με το δίκτυο πρόσβασης 3GPP, δηλαδή το NG-RAN, αλλά με οποιοδήποτε άλλο δίκτυο πρόσβασης συνδέεται με το 5GC, όπως τα δίκτυα πρόσβασης non-3GPP. Κάποιες βασικές που υλοποιούν τις διάφορες λειτουργίες του 5GMM και 5GSM συνοψίζονται παρακάτω.

Οι κυριότερες διαδικασίες (procedures) 5GMM είναι [38]:

- Η διαδικασία Registration, για την σύνδεση του τερματικού UE με το 5GC δίκτυο και να μπορεί να λάβει υπηρεσίες 5G
- Η διαδικασία De-registration, για την αποσύνδεση του τερματικού UE από το 5GC, π.χ. όταν ένα UE τοποθετείται σε λειτουργία πτήσης

<sup>280</sup> Στο εξής: 5GMM

<sup>281</sup> Στο εξής: 5GSM



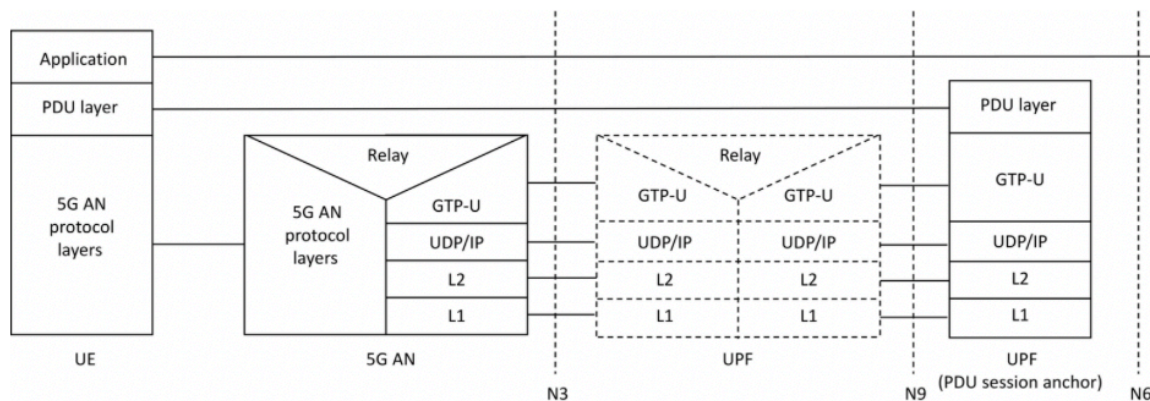
- Η διαδικασία Service request, όταν ένα αδρανές τερματικό UE θα μεταφερθεί στην ενεργή κατάσταση για να χρησιμοποιήσει υπηρεσίες 5G για τα οποία έχει συνδεθεί
- Η διαδικασία Paging, χρησιμοποιείται από το 5GC για να βρει ένα αδρανή τερματικό UE και να το ενημερώσει ότι πρέπει να μεταφερθεί στην ενεργή κατάσταση
- Οι διαδικασίες Primary authentication and key agreement, οι οποίες είναι για την επαλήθευση ταυτότητας του συνδρομητή και την δημιουργία των αρχικών κλειδιών ασφαλείας
- Η διαδικασία Security mode control, που χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση της ασφάλειας των επικοινωνιών, με βάση τα κλειδιά κρυπτογράφησης που έχουν δημιουργηθεί από την προηγούμενη διαδικασία
- Η διαδικασία Identification, όταν η AMF θέλει να μάθει είτε το αναγνωριστικό SUPI του συνδρομητή είτε το PEI της συσκευής ME
- Η διαδικασία Generic UE configuration update, όταν το 5GC πρέπει να ενημερώσει το τερματικό UE με κάποιες νέες τιμές 5GMM, όπως ένα νέο προσωρινό 5G-GUTI κ.α.
- Οι διαδικασίες NAS transport, για την μεταφορά μηνυμάτων που έχουν αποδέκτη άλλη οντότητα NF εκτός από τη AMF, και για την μεταφορά μηνυμάτων 5GSM από τη AMF προς το τερματικό UE
- Η διαδικασία 5GMM status, η οποία χρησιμοποιείται για την αναφορά προβλημάτων για συγκεκριμένες συνθήκες σφάλματος που αφορούν το επίπεδο 5GMM

Οι κυριότερες διαδικασίες (procedures) 5GSM είναι [38]:

- Η διαδικασία UE-requested PDU session establishment, που χρησιμοποιείται από το τερματικό UE για να ενεργοποιήσει μία νέα συνεδρία PDU
- Η διαδικασία UE-requested PDU session modification, που χρησιμοποιείται από το τερματικό UE για να αλλάξει τις παραμέτρους σε μία ήδη ενεργοποιημένη συνεδρία PDU.
- Η διαδικασία UE-requested PDU session release, που χρησιμοποιείται από το τερματικό UE για να απενεργοποιήσει μία ήδη ενεργοποιημένη συνεδρία PDU
- Η διαδικασία Network-requested PDU session modification, που χρησιμοποιείται από το 5GC για να αλλάξει τις παραμέτρους σε μία ήδη ενεργοποιημένη συνεδρία PDU
- Η διαδικασία Network-requested PDU session release, η οποία χρησιμοποιείται από το 5GC για να απενεργοποιήσει μία ήδη ενεργοποιημένη συνεδρία PDU
- Η διαδικασία 5GSM status, που χρησιμοποιείται για την αναφορά προβλημάτων για συγκεκριμένες συνθήκες σφάλματος που αφορούν το επίπεδο 5GSM

Άλλα πρωτόκολλα που υπάρχουν στο σύστημα 5GS είναι το πρωτόκολλο NG-AP, για την επικοινωνία της AMF με το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN μέσω της διεπαφής NG-C και το πρωτόκολλο Xn-AP, για την επικοινωνία των σταθμών βάσης gNB/ng-eNB μεταξύ τους μέσω της διεπαφής Xn. Για την προώθηση των πακέτων από το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN προς τη UPF μέσω της διεπαφής NG-U χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο GTPv1-U, όπως και στο σύστημα EPS. Το πρωτόκολλο GTPv2-C, με

μικρές αλλαγές από το σύστημα EPS, είναι το κατεξοχήν πρωτόκολλο για την επικοινωνία της AMF με τον κόμβο MME μέσω της διεπαφής N26. Για τις διεπαφές SBI γίνεται χρήση του πρωτοκόλλου HTTP/2, ενώ αν είναι αναγκαίο να εφαρμοστεί κρυπτογράφηση της επικοινωνίας του HTTP, τότε χρησιμοποιείται και TLS. Τέλος, το πρωτόκολλο Packet Forwarding Control Protocol<sup>282</sup> βρίσκεται στη σηματοδασία μεταξύ της SMF και της UPF μέσω της διεπαφής N4.



Εικόνα 54: Στοιβά πρωτοκόλλων στο επίπεδο χρήστη του συστήματος 5GS

#### 4.2.5 Διασφάλιση ποιότητας επικοινωνίας με QoS Flow

Η μεταφορά των δεδομένων στα πλαίσια του 5GC πραγματοποιείται με την χρήση των συνεδριών PDU, τα οποία δημιουργούνται από άκρο σε άκρο, από το τερματικό UE μέχρι και τη UPF, και γίνεται η σύνδεση με ένα εξωτερικό δίκτυο, το Data Network (DN). Κάθε δίκτυο DN διαχωρίζεται με το όνομα DN Name<sup>283</sup>. Η χρήση των συνεδριών PDU για την μεταφορά δεδομένων μεταξύ του τερματικού UE και του δικτύου DN ονομάζεται PDU Connectivity Service. Η εγκαθίδρυση των συνεδριών PDU γίνεται μετά από αίτημα του τερματικού UE, ενώ η αλλαγή παραμέτρων ή ο τερματισμός μίας ήδη ενεργής συνεδρίας PDU ξεκινάει είτε από την πλευρά του τερματικού UE είτε από την πλευρά του δικτύ, μέσω της χρήσης των κατάλληλων διαδικασιών 5GSM στο επίπεδο NAS.

Η οντότητα SMF είναι επιφορτισμένη με την αναζήτηση της κατάλληλης UPF ή των κατάλληλων UPF και την εγκαθίδρυση των συνεδριών PDU από την πλευρά του 5GC. Τα διαθέσιμα είδη των συνεδριών PDU είναι [37]:

- IPv4
- IPv6
- IPv4v6
- Ethernet
- Unstructured

<sup>282</sup> Στο εξής: PFCP

<sup>283</sup> Στο εξής: DNN

Κάποιες από τις παραμέτρους που είναι συσχετισμένες με μία συνεδρία PDU είναι οι εξής:

- Single-Network Slice Selection Assistance Information<sup>284</sup> του πάτριου δικτύου
- S-NSSAI του δικτύου επίσκεψης
- DNN
- PDU Session Type
- Service and Session Continuity<sup>285</sup> mode
- PDU Session ID
- Multi-access PDU Connectivity Service

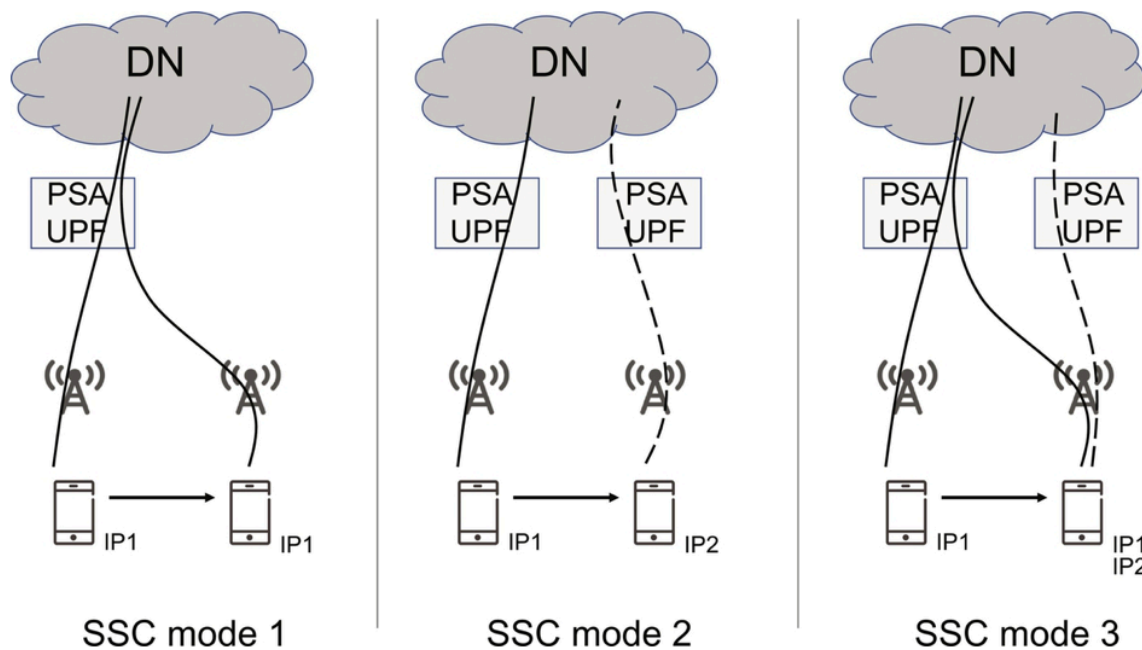
Το S-NSSAI είναι ουσιαστικά το αναγνωριστικό του τμήματος δικτύου (network slice) στο οποίο ανήκει η συνεδρία PDU από την πλευρά του δικτύου του συνδρομητή και του δικτύου επίσκεψης αντίστοιχα. Η τιμή SSC mode είναι πρακτικά ο τρόπος χειρισμού του συνεδριών PDU κατά την κινητικότητα του χρήστη όσον αφορά την συνέχεια των συνεδριών. Πιο αναλυτικά, η UPF, στην οποία βρίσκεται και η διεύθυνση IP του συνδρομητή με την οποία επικοινωνεί με το εκάστοτε δίκτυο DN:

- Στο SSC mode με τιμή 1 παραμένει αμετάβλητη η UPF ανεξάρτητα την περιοχή της κινητικότητας του χρήστη. Έτσι διατηρείται η συνέχεια των συνδέσεων μέσω της διατήρησης της διεύθυνσης IP.
- Στο SSC mode με τιμή 2 αλλάζει ανάλογα την περιοχή κινητικότητας του συνδρομητή με την τεχνική break-before-make, δηλαδή η συνεδρία PDU απενεργοποιείται και ενεργοποιείται εκ νέου στη νέα UPF. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μία μικρή διακοπή, η οποία μπορεί να επηρεάσει τις συνδέσεις των εφαρμογών του τερματικού UE.
- Στο SSC mode με τιμή 3 αλλάζει όπως και στο 2, με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται η τεχνική make-before-break. Πιο αναλυτικά, δημιουργείται είτε μία καινούρια συνεδρία PDU και μετέπειτα τερματίζεται η παλιά, είτε «μεταφέρεται» η υπάρχουσα σε μία UPF μέσω της εκχώρησης ενός νέου προθέματος IPv6, αλλά αυτό προϋποθέτει την χρήση του χαρακτηριστικού πολυεστίασης (multi-homing) του πρωτοκόλλου IPv6. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει διακοπή στην επικοινωνία, όμως η διεύθυνση IP του συνδρομητή για την συνεδρία PDU αλλάζει.

---

<sup>284</sup> Στο εξής: S-NSSAI

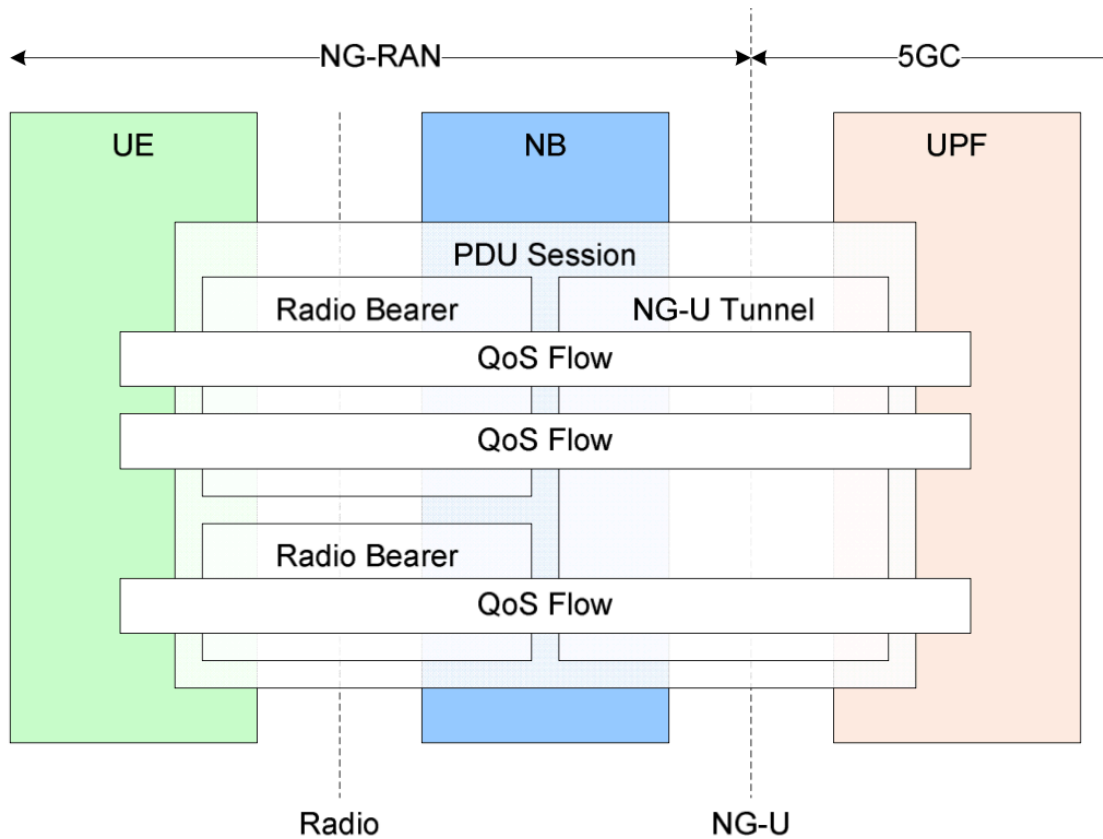
<sup>285</sup> Στο εξής: SSC



**Εικόνα 55: Τα τρία διαφορετικά είδη SSC mode για τις συνεδρίες PDU**

Ο αριθμός PDU session ID εκχωρείται από το τερματικό UE για τον διαχωρισμό των διαφόρων συνεδριών PDU στα πλαίσια του συνδρομητή, και χρησιμοποιείται για την αναγνώριση μίας συγκεκριμένης συνεδρίας PDU. Η τιμή Multi-access PDU Connectivity Service υποδεικνύει αν η συνεδρία PDU μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικό δίκτυο πρόσβασης. Για παράδειγμα αν μία συνεδρία PDU ενεργοποιηθεί στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN και η τιμή του Multi-access PDU Connectivity Service είναι αληθές, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στο δίκτυο πρόσβασης non-3GPP.

Μία συνεδρία PDU αποτελείται από ροές (flows), στις οποίες βασίζεται το 5G QoS μοντέλο. Μία ροή μπορεί να είναι είτε με εγγυημένη ταχύτητα, όπου ονομάζεται GBR QoS Flow, είτε χωρίς εγγύηση ταχύτητας, όπου ονομάζεται non-GBR QoS Flow. Κάθε ροή QoS Flow στα πλαίσια της ίδιας συνεδρίας PDU διαχωρίζεται από τα υπόλοιπα με το αναγνωριστικό QoS Flow ID. Η συσχέτιση των ροών QoS Flow στους φορείς Radio Bearers δεν είναι πάντα ένα προς ένα, καθώς διαφορετικές ροές QoS Flow στα πλαίσια της ίδιας συνεδρίας PDU μπορεί να συσχετιστούν με τον ίδιο φορέα Radio Bearer.



Εικόνα 56: Συνεδρία PDU και ροές QoS flow από άκρο σε άκρο

Οι παράμετροι 5G QoS που σχετίζονται με μία ροή QoS Flow είναι οι κάτωθι:

- Η παράμετρος 5G QoS Identifier<sup>286</sup> που είναι ουσιαστικά ένας αριθμός, δείκτης σε έναν πίνακα με παραμέτρους που αφορούν τον χειρισμό των πακέτων της αντίστοιχης ροής QoS Flow. Κάποιες τιμές 5QI είναι ορισμένες με βάση το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 23.501 [37]
- Η παράμετρος ARP που χρησιμοποιείται για την εξακρίβωση αν μία ροή QoS flow πρέπει να διατηρηθεί ή τερματιστεί όταν οι πόροι του δικτύου είναι περιορισμένοι
- Οι παράμετροι UL/DL Guaranteed Flow Bit Rate, οι οποίες ισχύουν μόνο για ροές GBR QoS Flow και είναι η ταχύτητα που εγγυάται το δίκτυο για την μεταφορά των πακέτων
- Οι παράμετροι UL/DL Maximum Flow Bit Rate<sup>287</sup>, οι οποίες ισχύουν μόνο για ροές GBR QoS Flow και είναι η μέγιστη ταχύτητα της ροής. Κάθε πακέτο που φθάνει όταν η τιμή MFBR έχει ξεπεραστεί, τότε απορρίπτεται

<sup>286</sup> Στο εξής: 5QI

<sup>287</sup> Στο εξής: MFBR

- Η παράμετρος Aggregate Maximum Bitrate per PDU session<sup>288</sup> που είναι για τις ροές non-GBR QoS Flow και αφορά τη συνολική μέγιστη ταχύτητα όλων των ροών QoS Flow της συνεδρίας PDU. Αυτή η παράμετρος γίνεται επιβολή στη UPF.
- Η παράμετρος UE-AMBR, που είναι η μέγιστη ταχύτητα όλων των ροών non-GBR QoS Flow σε όλες τις συνεδρίες PDU του τερματικού UE και γίνεται επιβολή στο δίκτυο πρόσβασης NG-RAN.
- Η παράμετρος UE-Slice-MBR, όπου είναι η μέγιστη ταχύτητα όλων των ροών QoS Flow, για non-GBR και GBR ροές, σε όλες τις συνεδρίες PDU για το ίδιο network slice.

#### 4.2.6 Τμηματοποίηση Δικτύου - Network Slicing

Η τμηματοποίηση του δικτύου (network slicing), αφορά το 5GC όσο και το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN, για την αξιοποίηση τμημάτων του δικτύου ανάλογα τον τύπο της του τερματικού UE και τις επιθυμητές υπηρεσίες που παρέχονται. Αποτελεί ουσιαστικά την δυνατότητα δημιουργίας πολλών δικτύων πάνω από μία κοινή φυσική υποδομή, όπου κάθε τμήμα του δικτύου καλύπτει τις ανάγκες συγκεκριμένης περίπτωσης χρήσης. Για παράδειγμα, κάποιες συσκευές έχουν άλλες απαιτήσεις σε σχέση με άλλες, και για την καλύτερη διαχείριση του δικτύου, το network slicing είναι το απαραίτητο εργαλείο.

Κάποια παραδείγματα απαιτήσεων όσον αφορά την λειτουργικότητα του δικτύου μπορεί να είναι η προτεραιότητα, η χρέωση, η πολιτική ελέγχου (policy control), η ασφάλεια, καθώς και η κινητικότητα, ενώ οι απαιτήσεις που αφορούν την απόδοση του δικτύου είναι η καθυστέρηση, η κινητικότητα, η διαθεσιμότητα, η αξιοπιστία και οι ταχύτητες.

Η οντότητα AMF, λαμβάνοντας υπόψιν και την επιλογή του network slice από την πλευρά του τερματικού UE, επιλέγει το τμήμα του δικτύου και τις αντίστοιχες οντότητες NF καθώς και συγκεκριμένους IMS.

Η πληροφορία Network Slice Selection Assistance Information<sup>289</sup> περιέχει μία λίστα που αποτελείται από τιμές S-NSSAI. Η κάθε τιμή S-NSSAI αναγνωρίζει ένα συγκεκριμένο network slice. Η επιλογή των network slices γίνεται με ή χωρίς την υποστήριξη της οντότητας NSSF. Στην τελευταία περίπτωση, η AMF είναι ρυθμισμένη τοπικά με τις όποιες πληροφορίες για τα network slices ώστε να μπορέσει να επιλέξει το κατάλληλο. Η τιμή S-NSSAI αποτελείται από:

- Την τιμή Slice/Service type<sup>290</sup>, το οποίο αφορά τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά και υπηρεσίες που προσφέρει το network slice
- Την προαιρετική τιμή Slice Differentiator<sup>291</sup>, η οποία βοηθά στο διαχωρισμό network slices του ίδιου τύπου

---

<sup>288</sup> Στο εξής: Session-AMBR

<sup>289</sup> Στο εξής: NSSAI

<sup>290</sup> Στο εξής: SST

<sup>291</sup> Στο εξής: SD

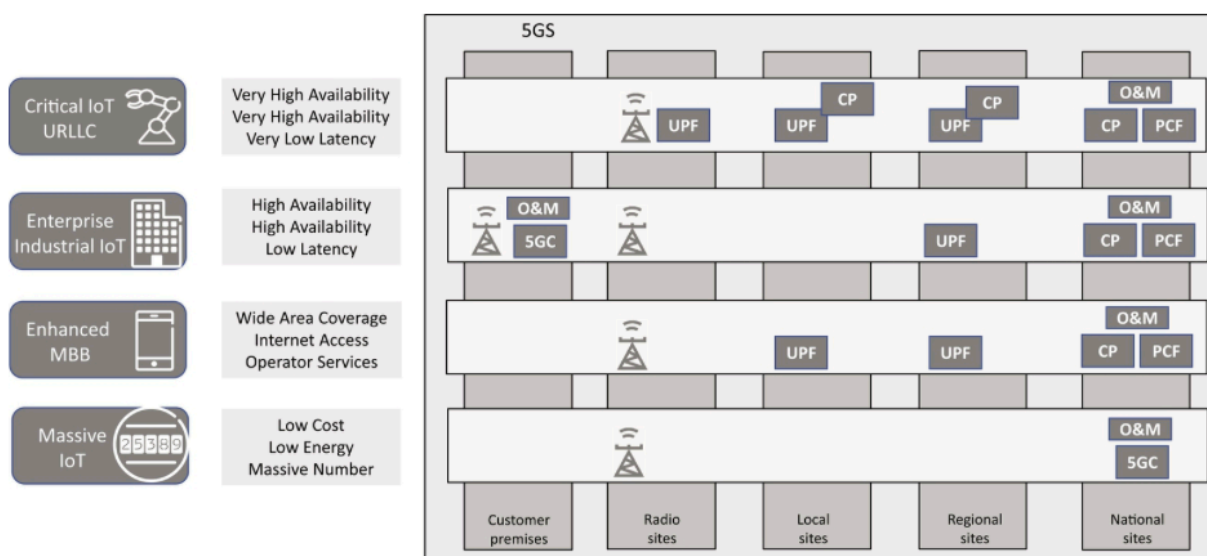
Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς

Το SST μπορεί να πάρει είτε μία τιμή που έχει οριστεί από τις τεχνικές προδιαγραφές, είτε να είναι μία τιμή επιλεγμένη από τον φορέα. Οι τιμές SST από το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 23.501 [37], είναι οι παρακάτω:

**Πίνακας 2: Διαθέσιμες τιμές SST από το 3GPP TS 23.501**

Τύπος Slice	Τιμή SST	Περίπτωση χρήσης (use case)
eMBB	1	5G enhanced Mobile Broadband
URLLC	2	ultra- reliable low latency communications
MIoTT	3	massive IoT
V2X	4	V2X services
HMTC	5	High-Performance Machine-Type Communication
HDLLC	6	High Data rate and Low Latency Communications

Από τη Release 17 υπάρχει η οντότητα NSACF, η οποία επιτρέπει την παρατήρηση και τον έλεγχο του αριθμού των τερματικών UEs ανά network slice και τον αριθμό των συνεδριών PDU ανά network slice, και οι πληροφορίες αυτές προωθούνται στην οντότητα AF για περαιτέρω έλεγχο και επεξεργασία.



**Εικόνα 57: Network slicing στο σύστημα 5G**

### 4.3 5G-Advanced

Όπως έγινε με το LTE και τις επόμενες σημαντικές βελτιώσεις του, το LTE Advanced και το LTE Advanced Pro, η επόμενη σημαντική αναβάθμιση του δικτύου 5G ονομάζεται 5G-Advanced, και συγκεκριμένα περιγράφεται από τις Release 18 και Release 19. Η Release 18 ολοκληρώθηκε το πρώτο εξάμηνο του 2024 και τα χαρακτηριστικά της αναμένεται να είναι εμπορικά διαθέσιμα μέσα στο 2025, ενώ η Release 19 αναμένεται να ολοκληρωθεί μέχρι τα τέλη του 2025 με αναμενόμενη εμπορική διάθεση το 2027.

Μία από τις υποστηριζόμενες περιπτώσεις χρήσης στα πλαίσια του δικτύου 5G-Advanced είναι το VR και AR, τα οποία συγκαταλέγονται στην εκτεταμένη πραγματικότητα<sup>292</sup> (extended reality). Για την υποστήριξή τους απαιτείται μεγάλη αξιοπιστία μετάδοσης και μικρή καθυστέρηση μετάδοσης, ενώ παράλληλα οι ταχύτητες που απαιτούνται είναι σχετικά μεγάλες. Χαρακτηριστικά, κυμαίνονται από 10 Mbps, για την περίπτωση του AR και γύρω στα 30 Mbps για την περίπτωση του VR. Ο πακετορρυθμός (packet rate) για επιτυχημένα πακέτα αναμένεται να είναι της τάξης του 99% ενώ η καθυστέρηση κυμαίνεται μεταξύ 7 και 13 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για την υποστήριξη των περιπτώσεων χρήσης XR υπάρχουν αλλαγές από την πλευρά του τερματικού UE μέχρι και το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN και το 5GC για την επέκταση του πλαισίου 5G QoS για την αναγνώριση και κατάλληλο χειρισμό των ροών που αφορούν το XR. Η εκτεταμένη χρήση μεγάλων ταχυτήτων σε συνδυασμό με τη μικρή καθυστέρηση για εκτεταμένες περιόδους οδηγεί σε μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις των τερματικών UE, το οποίο συνεπάγεται αναγκαίες βελτιώσεις στις διαδικασίες εξοικονόμησης ενέργειας που υφίστανται ήδη.

Η βελτίωση της ακρίβειας της τοποθεσίας (positioning accuracy) είναι ένας από τους στόχους βελτίωσης της Release 18. Η μεγαλύτερη βελτίωση πραγματοποιείται μέσω της χρήσης του Carrier Phase Positioning<sup>293</sup>, που είναι ουσιαστικά η αξιοποίηση της ίδιας τεχνικής που χρησιμοποιείται στα συστήματα εντοπισμού μέσω δορυφόρων. Έτσι θα είναι εφικτή η ακρίβεια θέσης σε επίπεδο εκατοστών σε υπόγεια, εσωτερικούς χώρους και γενικά σε σημεία όπου η κάλυψη μέσω δορυφόρων είναι αδύνατη.

Τέλος, υπάρχουν βελτιώσεις όσον αφορά την κάλυψη δικτύου και την κινητικότητα των συνδρομητών, καθώς και την ταχύτητά και χωρητικότητα σε πλήθος χρηστών στο σύστημα, μέσω βελτιώσεων στην απόδοση των κεραίων MIMO. Η δυνατότητα συγχρονισμού της ώρας μέσω του δικτύου 5G θα είναι εφικτή με την υπηρεσία Time as a Service<sup>294</sup> που θα παρέχεται από το σύστημα 5GS, με την ώρα να παρέχεται από το 5GC προς το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN, και αυτό θα μεταδίδει την ώρα προς τις συνδεδεμένες συσκευές.

Η αυτοματοποίηση του δικτύου και η ενεργειακή του απόδοση θα βελτιωθούν μέσω της χρήσης τεχνητής νοημοσύνης<sup>295</sup> (artificial intelligence) και μηχανικής μάθησης<sup>296</sup> (machine learning). Στα πλαίσια της Release 18 είναι και το NR-Light ή γνωστό ως Reduced Capability<sup>297</sup>, το οποίο προσφέρει μεγαλύτερο διεκπεραιωτικότητα, μικρότερη καθυστέρηση, μεγαλύτερη διάρκεια μπαταρίας, και καλύτερη ασφάλεια δικτύου για NB-IoT συσκευές σε σχέση με τις LTE Cat-1bis και LTE 4 συσκευές.

Περαιτέρω βελτιώσεις στις περιπτώσεις χρήσης XR και στην κινητικότητα των συνδρομητών είναι στα πλάνα για τη Release 19, συνεχίζοντας ουσιαστικά την δουλειά που είχε ξεκινήσει με τη Release 18. Άλλα σημεία βελτίωσης είναι μέσω της χρήσης

---

<sup>292</sup> Στο εξής: XR

<sup>293</sup> Στο εξής: CPP

<sup>294</sup> Στο εξής: TaaS

<sup>295</sup> Στο εξής: AI

<sup>296</sup> Στο εξής: ML

<sup>297</sup> Στο εξής: RedCap



AI/ML τεχνικών στο δίκτυο πρόσβασης, καθώς και την προσθήκη νέων περιπτώσεων χρήσης για ambient IoT, δηλαδή συσκευές IoT χαμηλού κόστους και μικρής εμβέλειας.

#### 4.4 IMT-2030 και 6G

Η κοινοπραξία ITU έχει δημοσιεύσει τη σύσταση IMT-2030 [39] για τις περιπτώσεις χρήσης και τις αρχικές προδιαγραφές που πρέπει να πληρούν τα συστήματα της 6G. Πιο αναλυτικά, στις προτεινόμενες περιπτώσεις χρήσης υπάρχουν οι εξής:

- Η περίπτωση χρήσης Immersive Communication, όπου επεκτείνονται οι δυνατότητες του eMBB για να υποστηρίξει παροχή ροών βίντεο υπερύψηλης ποιότητας το οποίο είναι εμβυθιστικό (immersive), καθώς και σενάρια XR
- Η περίπτωση χρήσης Hyper Reliable and Low-Latency Communication, όπου επεκτείνονται οι δυνατότητες του URLLC για να υποστηρίξει επιπρόσθετα σενάρια όπου απαιτείται ακόμα μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης και ακόμη μεγαλύτερη αξιοπιστία από ότι με το IMT-2020
- Η περίπτωση χρήσης Massive Communication, όπως και το mMTC του IMT-2020, με διευρυμένα σενάρια και την χρησιμοποίηση ακόμη περισσότερων συσκευών
- Η περίπτωση χρήσης Ubiquitous Connectivity, για την κάλυψη των πιο δυσμενών περιοχών και την δημιουργία μίας ενοποιημένης ψηφιακής υπηρεσίας
- Η περίπτωση χρήσης Artificial Intelligence and Communication, που περιλαμβάνει αυτόνομη οδήγηση, αυτόνομη σύνδεση συσκευών για την παροχή ιατρικής βοήθειας κ.α.
- Η περίπτωση χρήσης Integrated Sensing and Communication, όπως έλεγχος δραστηριότητας και καταγραφή της κίνησης καθώς και του περιβάλλοντος για εφαρμογές AI και XR

Κάποιες από τις σημαντικότερες ικανότητες για τις οποίες έχουν τεθεί στόχοι στα πλαίσια της σύστασης IMT-2030 είναι οι εξής:

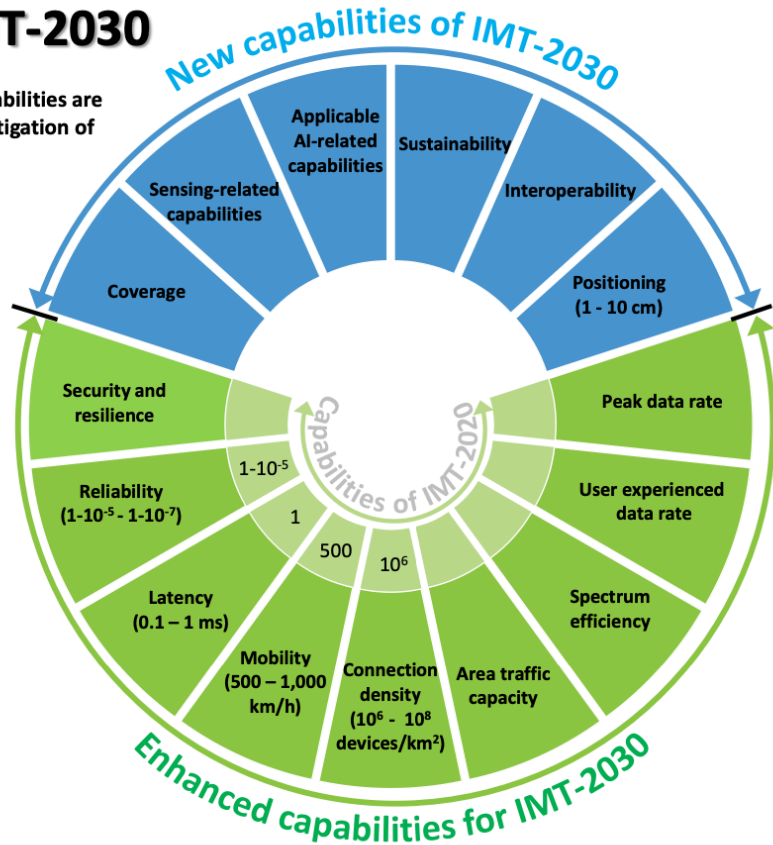
- Peak data rate, με τις μέγιστες ταχύτητες να είναι της τάξεως των 50, 100, 200 Gbit/s
- User experienced data rate, όπου είναι η ταχύτητα που επιτυγχάνεται από όλους τους συνδρομητές σε όλη την περιοχή κάλυψης του δικτύου και οι στόχοι που έχουν τεθεί είναι της τάξεως των 300 και 500 Mbps
- Spectrum efficiency, η οποία αναμένεται να είναι 1,5 έως και 3 φορές από τη φασματική απόδοση που ορίζει το IMT-2020,
- Area traffic capacity, με τις τιμές να αναμένονται από 30 Mbit/s/m<sup>2</sup> έως και 50 Mbit/s/m<sup>2</sup>
- Connection density, με την πυκνότητα να έχει οριστεί στις 10<sup>6</sup> έως 10<sup>8</sup> συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.
- Mobility, με την μέγιστη ταχύτητα για την υποστήριξη μεταπομπών να έχει οριστεί στα 500 με 1000 km/h
- Latency, με την αναμενόμενη τιμή να ορίζεται από 0,1 έως 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου
- Positioning, με την ακρίβεια τοποθεσίας να τοποθετείται από 1 έως 10 εκατοστά

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

Με βάση το χρονοδιάγραμμα που έχει δημοσιεύσει η κοινοπραξία ITU, από το 2024 έως και τα τέλη του 2026 θα ολοκληρώσει τις τεχνικές προδιαγραφές καθώς και τις αντίστοιχες μεθοδολογίες για την αποτίμησή τους. Από το 2027 μέχρι και τις αρχές του 2029 θα μπορούν να υποβληθούν οι τεχνολογίες που καλύπτουν τις προδιαγραφές του IMT-2030, με την απόφαση να θεωρηθούν ως τεχνολογία IMT-2030 να οριστικοποιείται το 2030, ίδιο έτος όπου αναμένεται να εμφανιστούν τα πρώτα δίκτυα 6G.

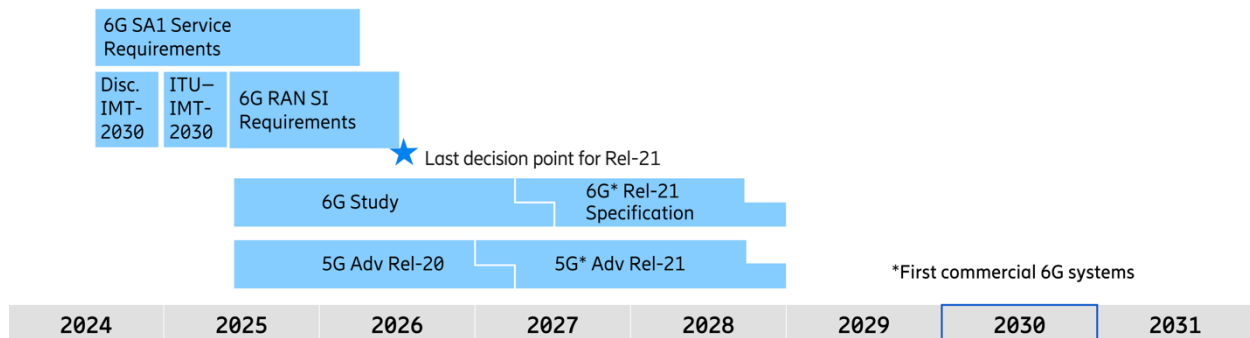
## Capabilities of IMT-2030

NOTE: The range of values given for capabilities are estimated targets for research and investigation of IMT-2030.



Εικόνα 58: Δυνατότητες που ορίζονται στη σύσταση IMT-2030

Η εξέλιξη του δικτύου 6G από την κοινοπραξία 3GPP αποφασίστηκε το 2023, και τον Μάρτιο του 2024 ορίστηκε και το επίσημο χρονοδιάγραμμα, όπως φαίνεται παρακάτω [40]:



Εικόνα 59: Χρονοδιάγραμμα της κοινοπραξίας 3GPP για την εξέλιξη του δικτύου 6G

## 5. Επικοινωνία μεταξύ λειτουργικών οντοτήτων

Στα πλαίσια της οριζόντιας αρχιτεκτονικής SBA, η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων NF μεταξύ τους γίνεται πρωτίστως για λόγους σηματοδότησης και λειτουργίας του ίδιου του δικτύου. Σε αυτό το πλαίσιο περιλαμβάνεται η ανταλλαγή μηνυμάτων για την εγγραφή των οντοτήτων NF και των υπηρεσιών που προσφέρουν στη NRF μέσω του Service Registration, η διαδικασία της αναζήτησης αυτών των διαθέσιμων υπηρεσιών μέσω του Service Discovery, καθώς και η ίδια η ανταλλαγή των μηνυμάτων για την χρήση των υπηρεσιών μέσω της διαδικασίας Service Request. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα του 5GC να αξιοποιηθεί και από οντότητες εκτός του 5GC, οδηγεί στην ύπαρξη επιπλέον κίνησης στην επικοινωνία μεταξύ των λειτουργικών οντοτήτων NF.

Η αξιοποίηση του πρωτοκόλλου HTTP/2 για σχεδόν το σύνολο της σηματοδότησης μεταξύ των οντοτήτων NF του 5GC, το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο βασισμένο σε «κείμενο», σε αντίθεση με τα παραδοσιακά τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα, όπως το GTP-C, τα οποία είναι δυαδικά, οδηγεί στην δημιουργία μεγαλύτερων μηνυμάτων σηματοδότησης. Παράλληλα η αύξηση του πλήθους των συνδρομητών 5G, οδηγεί σε μεγαλύτερο αριθμό συναλλαγών προς το 5GC, το οποίο αυξάνει με την σειρά του τον όγκο της σηματοδότησης. Οι αρχικές εκτιμήσεις ανέφεραν ότι η κίνηση αυτή θα ήταν δέκα ή και είκοσι φορές μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη σηματοδότηση Diameter στο σύστημα EPS, με την αναφορά των φορέων κινητής τηλεφωνίας στην Κίνα να μιλούν για έως και εκατό φορές μεγαλύτερο όγκο σηματοδότησης [41].

Η λειτουργία του δικτύου 5GC από τους φορείς κινητής τηλεφωνίας θα πρέπει να λάβει υπόψη την ύπαρξη και των προηγούμενων τεχνολογιών όπως του συστήματος GPRS και του EPC. Αυτό είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο, αν αναλογιστεί κανείς ότι πλέον μιλάμε για πολλούς διαφορετικούς τομείς δικτύων, όπως δίκτυα κυκλωματομεταγωγής, τον τομέα IMS, δίκτυα πακετομεταγωγής, καθώς και τις αντίστοιχες σηματοδοσίες SS7, Session Initiation Protocol<sup>298</sup>, και Diameter. Όλη αυτή η σηματοδοσία που υφίσταται ήδη λόγω της ύπαρξης των παλαιότερων αυτών τεχνολογιών, θα πρέπει να υπολογιστεί ως ένα επιπρόσθετο βάρος στην διαχείριση της κίνησης του 5GC και πιο συγκεκριμένα της επικοινωνίας στα πλαίσια του ίδιου του 5GC.

Συγκεντρωτικά λοιπόν, η κίνηση στο ίδιο το δίκτυο 5GC είναι μεγάλη και επίσης χαρακτηρίζεται από διαφορετικές προτεραιότητες, με τον κίνδυνο η πιο σημαντική σηματοδοσία να επηρεαστεί από κίνηση χαμηλής προτεραιότητας, καθώς το μέσο μεταφοράς είναι κοινό και απαιτείται η χρήση πολιτικών για την διασφάλιση των προτεραιοτήτων.

Εκτός όμως από την αναμενόμενη σηματοδοσία υπό φυσιολογικές συνθήκες λειτουργίας, υπάρχει πάντα η πιθανότητα ενός προβλήματος στο δίκτυο, και πιο αναλυτικά, αν ένας κόμβος ή λειτουργική οντότητα NF αποτύχει ή/και επανέλθει, τότε είναι αρκετά σύνηθες η ύπαρξη της λεγόμενης καταιγίδας σηματοδοσίας (signaling storm). Κάθε κόμβος ή οντότητα NF χειρίζεται αιτήματα που αφορούν εκατοντάδες χιλιάδες ή και εκατομμύρια συνδρομητές, συνεπώς ο αναπάντεχος και άμεσος τερματισμός της σηματοδοσίας ενός τέτοιου πλήθους οδηγεί στην επανέναρξη πολλών συναλλαγών σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, όπου οδηγεί σε υπέρμετρη αύξηση της σηματοδοσίας, το οποίο μπορεί να οδηγήσει στην εμφάνιση κλυματών στο Core Network. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα στα πλαίσια του 5GC, είναι η

---

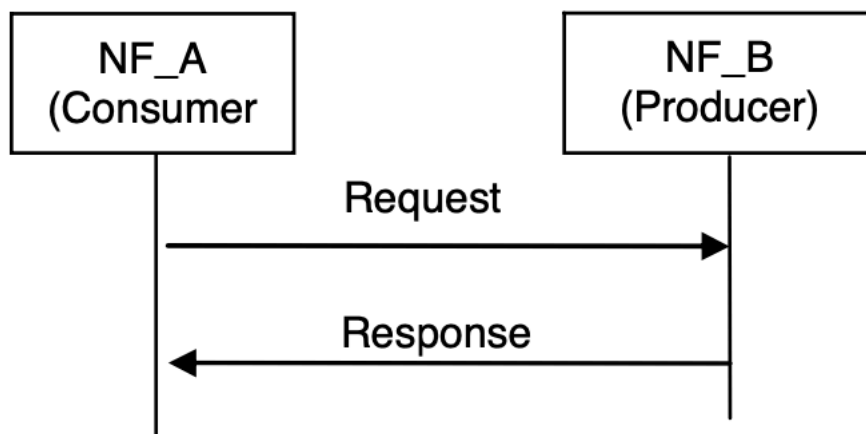
<sup>298</sup> Στο εξής: SIP

επικοινωνία των διαφόρων οντοτήτων NF με τη NRF, όπου η συγκέντρωση της πληροφορίας των διαθέσιμων υπηρεσιών του δικτύου σε ένα κεντρικό σημείο είναι ένα πιθανό σημείο κωλύματος αν τα αιτήματα προς τη NRF αυξηθούν ραγδαία, δημιουργώντας έτσι πρόβλημα στο δίκτυο συνολικά.

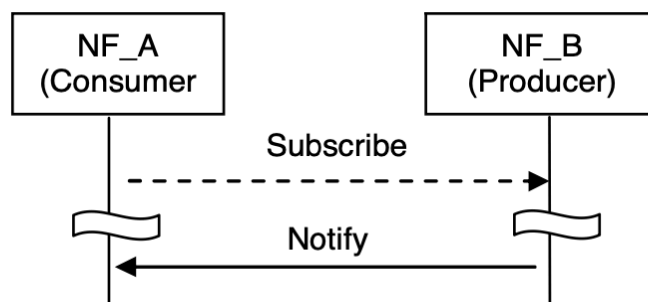
Συνεπώς γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η μεταφορά των μηνυμάτων σηματοδότησης στο 5GC είναι ιδιαίτερα απαιτητική και έχει την ανάγκη ύπαρξης ενός συστήματος διαχείρισης κίνησης (traffic management) μέσω της κατάλληλης δρομολόγησης των μηνυμάτων σηματοδότησης με την ύπαρξη προτεραιοτήτων δρομολόγησης (routing priorities), την δυνατότητα ανακατεύθυνσης, για την συνολικότερη διαχείριση του συνολικού φόρτου και την αποδοτικότερη διαχείριση του δικτύου μεταφοράς.

### 5.1 Άμεσα και έμμεσα μοντέλα επικοινωνίας λειτουργικών οντοτήτων

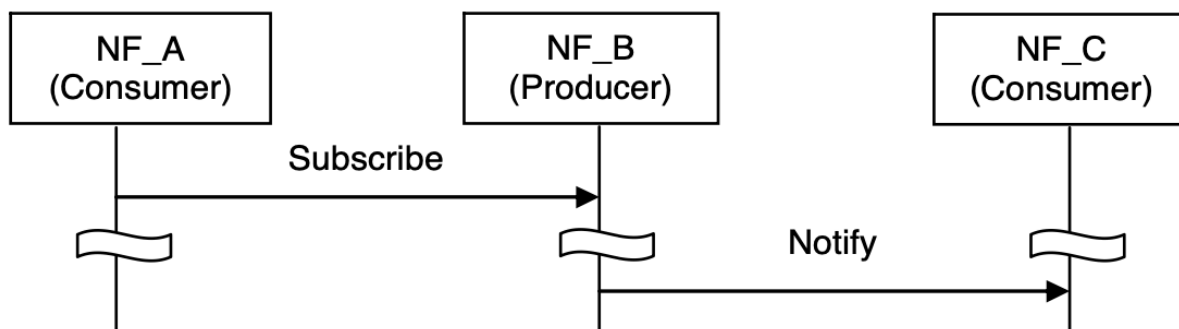
Στη Release 15, ήτοι στην αρχική έκδοση του 5GC, η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων NF μεταξύ τους πραγματοποιείται απευθείας, γνωστό και ως direct communication. Κάθε οντότητα NF μπορεί να έχει τις πληροφορίες για τις υπηρεσίες των υπολοίπων NF ρυθμισμένες τοπικά, ενώ σε διαφορετική περίπτωση γίνεται επικοινωνία με τη NRF για την ανάκτηση των αναγκαίων πληροφοριών για την επιλογή της επιθυμητής υπηρεσίας.



Εικόνα 60: Request-Response στην άμεση επικοινωνία



Εικόνα 61: Subscribe-Notify στην άμεση επικοινωνία



**Εικόνα 62: Subscribe-Notify για άλλο Service Consumer στην άμεση επικοινωνία**

Ο συγκεκριμένος άμεσος τρόπος επικοινωνίας όμως, με την χρήση ή όχι της NRF, σε συνδυασμό με την επίπεδη αρχιτεκτονική του δικτύου του 5GC που επιτρέπει την επικοινωνία από όλους προς όλους, δηλαδή μία οντότητα NF μπορεί δυνητικά να μιλήσει με οποιοδήποτε άλλη NF, αποτελεί μία μεγάλη πρόκληση για την απρόσκοπτη λειτουργία και την αδιάλειπτη επικοινωνία μέσα στα πλαίσια του 5GC. Αυτό αμβλύνεται με την αυξημένη κίνηση της σηματοδosis του δικτύου που αναφέρθηκε προηγουμένως, και δυσκολεύει σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες κλιμάκωσής του 5GC.

Η σηματοδosis μεταξύ των οντοτήτων NF μπορεί να εμφανίζει καθυστερήσεις με την σταδιακή συμφόρηση του δικτύου. Επίσης η εφαρμογή πολιτικών κατανομής φόρτου τοπικά στις ίδιες τις οντότητες NF, μπορεί να οδηγήσει στην χρήση διαφορετικών πολιτικών ανά NF, συνεπώς αυτή η μη ομογενοποιημένη λύση μπορεί να οδηγήσει σε μη ορθή κατανομή της σηματοδosis στο δίκτυο.

Πάρα ταύτα, η χρήση της άμεσης επικοινωνίας θεωρήθηκε ικανοποιητική καθώς χρησιμοποιήθηκε στα πρώτα δίκτυα 5GC, τα οποία είτε ήταν κυρίως για δοκιμαστικούς και πειραματικούς σκοπούς είτε ήταν πολύ μικρά δεδομένου ότι η εμφάνιση του συστήματος 5G SA ήταν στα πρώιμα στάδια της.

Με τη Release 16 όμως, έχουμε την εμφάνιση ενός νέου network entity, του SCP, το οποίο παρεμβάλλεται στην επικοινωνία μεταξύ δύο οντοτήτων NF. Αυτό οδηγεί στην εμφάνιση του indirect communication μεταξύ των NF, όπου το αίτημα ενός Service Consumer μεταφέρεται προς έναν Service Producer μέσω του SCP, και αντίστοιχα οι αποκρίσεις αυτών των αιτημάτων αποστέλλονται μέσω του SCP.

Η χρήση του SCP θυμίζει την αντίστοιχη ύπαρξη του Signal Transfer Point<sup>299</sup> στο δίκτυο σηματοδosis SS7 καθώς και του Diameter Routing Agent<sup>300</sup> στη σηματοδosis Diameter, όπου δρομολογούσαν την κίνηση καταλλήλως εφαρμόζοντας τις κατάλληλες τεχνικές διαχείρισης κίνησης.

Συνοπτικά, οι αλληλεπιδράσεις των οντοτήτων NF μεταξύ τους χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες πλέον:

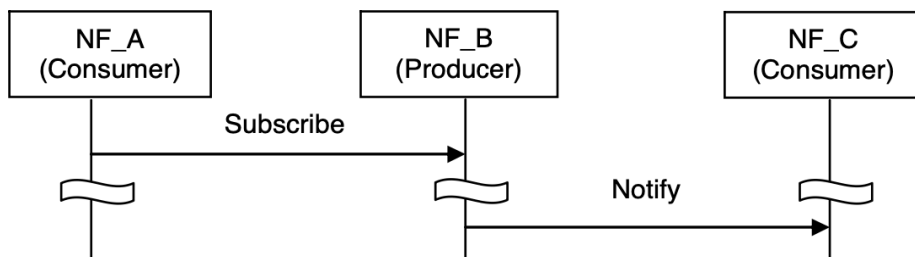
- Την άμεση επικοινωνία - Direct Communication
- Την έμμεση επικοινωνία - Indirect Communication με την χρήση του SCP

<sup>299</sup> Στο εξής: STP

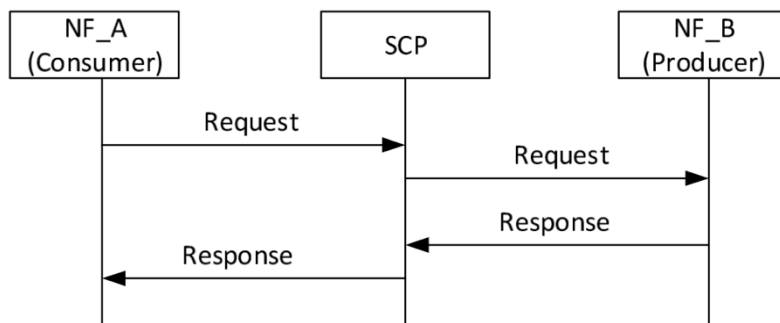
<sup>300</sup> Στο εξής: DRA



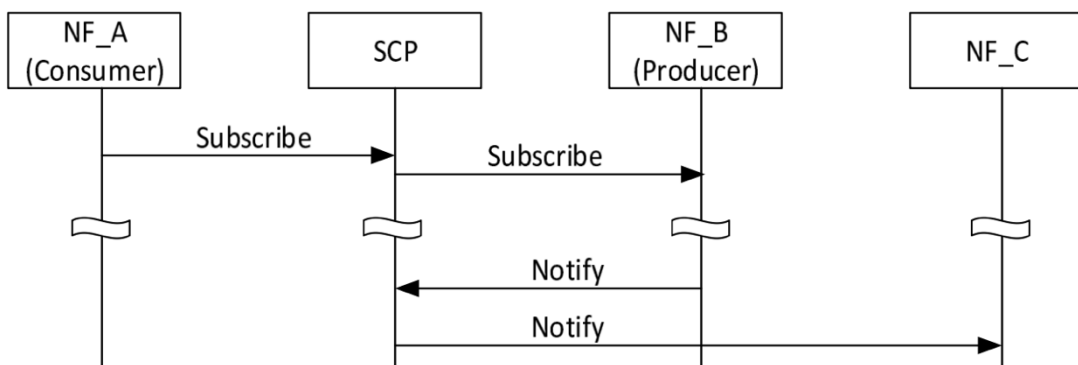
**Εικόνα 63: Άμεση και έμμεση επικοινωνία**



**Εικόνα 64: Request-Response στην έμμεση επικοινωνία**



**Εικόνα 65: Subscribe-Notify στην έμμεση επικοινωνία**



**Εικόνα 66: Subscribe-Notify για άλλο Service Consumer στην έμμεση επικοινωνία**

Με την έμμεση επικοινωνία πλέον, η διαχείριση της κίνησης μεταξύ των οντοτήτων NF του 5GC είναι δυνατή καθώς πλέον υπάρχει ένα επιπλέον σημείο ελέγχου για την εφαρμογή της επιθυμητής δρομολόγησης, την χρήση της κατανομής φόρτου καθώς και γενικότερα την διαχείριση και έλεγχο της κίνησης, υπολογίζοντας την προτεραιότητα των μηνυμάτων σηματοδosis, διασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο την εξυπηρέτηση της συνολικής κίνησης του δικτύου. Ακόμη, η κλιμάκωση του δικτύου μπορεί να γίνει πιο εύκολα και να διαχειριστεί με πιο βέλτιστο τρόπο.

Με βάση το [42], η χρήση του SCP παρέχει την δυνατότητα για την καλύτερη αντιμετώπιση διαφόρων προκλήσεων. Η τμηματοποίηση του δικτύου καθώς και η εφαρμογή πολιτικών σηματοδosis είναι μία τέτοια πρόκληση. Κατά την σύνδεση διαφόρων τμημάτων του ίδιου δικτύου μεταξύ τους, είτε την σύνδεση ενός ιδιωτικού δικτύου με το 5GC ενός φορέα κινητής τηλεφωνίας, είναι πολλές φορές επιθυμητή η χρήση πολιτικών που ρυθμίζουν την σηματοδosis από και προς το κάθε τμήμα. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να γίνει έλεγχος και ταξινόμηση της σηματοδosis ανάλογα το τμήμα από το οποίο προέρχονται. Ακόμη, παρέχεται εύκολα πλέον η δυνατότητα επιβολής ορίων για την προστασία από signaling storms είτε από μη εγκεκριμένη σηματοδosis, καθώς και η δυνατότητα απόκρυψης της εσωτερικής δομής των τμημάτων μεταξύ τους.

Η ασφάλεια της σηματοδosis μεταξύ των δικτύων δύο διαφορετικών παρόχων μπορεί να πραγματοποιηθεί με το SCP, όπως γίνεται ήδη με το intelligent/Internet Signal Transfer point<sup>301</sup> και το Diameter Edge Agent<sup>302</sup> για το SS7 και τη σηματοδosis Diameter αντίστοιχα. Σε αυτή την περίπτωση, τις λειτουργίες του SCP για αυτά τα σενάρια τις αναλαμβάνει το SEPP.

Η ανάγκη ελέγχου της κίνησης για σκοπούς μέτρησης καθώς και ελέγχου της συμβατότητας μεταξύ των διαφορετικών υλοποιήσεων μεταξύ τους επιτυγχάνεται πλέον πιο εύκολα. Μέχρι πρότινος, απαιτούνταν η χρήση συγκεκριμένων μηχανημάτων στα διάφορα τμήματα του δικτύου για αυτόν τον έλεγχο, όμως η ανάγκη για την διασφάλιση της ασφάλειας των επικοινωνιών με την χρήση του TLS στις διεπαφές SBI οδηγεί στην αδυναμία ελέγχου της σηματοδosis καθώς πλέον η κίνηση είναι κρυπτογραφημένη. Το SCP όμως λειτουργεί σε ανώτερο στρώμα από το TLS, καθώς λαμβάνει ένα μήνυμα από μία οντότητα NF, και αφού το ελέγξει, το προωθεί καταλλήλως. Πέρα από τον έλεγχο της συμβατότητας μεταξύ των NF μεταξύ τους, το SCP μπορεί να τροποποιήσει καταλλήλως την σηματοδosis μεταξύ των NF, με την αλλαγή είτε προσθήκη των κατάλληλων επικεφαλίδων HTTP καθώς και την τροποποίηση της σηματοδosis καταλλήλως, και με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η αλλαγή στο επίπεδο της ίδιας της οντότητας NF, το οποίο θα σήμαινε τις περισσότερες περιπτώσεις αναβάθμιση στο λογισμικό της οντότητας NF.

Στο [43] έχουμε την περιγραφή ενός ανιχνευτή για τον έλεγχο κακόβουλης σηματοδosis - runtime anomaly detector τόσο από την πλευρά του τερματικού UE, που θεωρείται απειλή εκτός δικτύου, όσο και από την πλευρά μίας παραβιασμένης οντότητας NF, το οποίο νοείται ως απειλή εντός του δικτύου. Μέσω της δυνατότητας του ελέγχου της κίνησης που αναφέραμε προηγουμένως ότι παρέχει το SCP, δημιουργείται ένα σύστημα ανάλυσης της κίνησης όσον αφορά την αλληλουχία των μηνυμάτων

---

<sup>301</sup> Στο εξής: ISTP

<sup>302</sup> Στο εξής: DEA

σηματοδοσίας μεταξύ των NF και των πληροφοριών που μεταφέρουν, και έτσι επιτυγχάνεται αναγνώριση ενδεχόμενων απειλών.

Ακόμη, η κατανομή του φόρτου και οι μηχανισμοί αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρεία μέσω του SCP, οδηγεί στην εφαρμογή τους με έναν ενοποιημένο τρόπο. Αν αυτές οι πολιτικές είχαν υλοποιηθεί στο επίπεδο των ίδιων των οντοτήτων NF, η έλλειψη ύπαρξης ενός κοινού τρόπου λειτουργίας, καθώς η κοινοπραξία 3GPP δεν έχει ορίσει τις συγκεκριμένες λειτουργίες, θα οδηγούσε σε μία μη βέλτιστη υλοποίηση της συνολικής κατανομής φόρτου στο δίκτυο. Με το SCP, το ο φόρτος των αιτημάτων από οποιοδήποτε οντότητα NF, ανεξαρτήτως των υλοποιήσεων, θα μπορεί να καταναεμηθεί με έναν ενοποιημένο και κοινό τρόπο.

Ένα ζήτημα που ανακύπτει με την χρήση του SCP, πέρα από την προώθηση της σηματοδοσίας μεταξύ των οντοτήτων NF, είναι και ο ρόλος του στην αναζήτηση και επιλογή των κατάλληλων υπηρεσιών, όταν αυτό απαιτείται. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η χρήση του NRF από όλες τις οντότητες NF για την αναζήτηση των υπηρεσιών, είναι ένα πιθανό σημείο κωλύματος στο δίκτυο. Ένας τρόπος είναι η μεταφορά αυτής της αναζήτησης και επιλογής στο ίδιο το SCP, έτσι ώστε και αυτού του είδους η σηματοδοσία, δηλαδή του Service Discovery, να μπορεί να διαχειριστεί και να ελεγχθεί από το SCP.

Η αρχιτεκτονική SBA, μέσω της λογικής του Service-Producer, βασίζεται στην δημιουργία και διαχείριση των πόρων που δημιουργούνται σε ένα Service Producer, έπειτα από τα αντίστοιχα αιτήματα από ένα Service Consumer. Τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η πληροφορία συνεδρίας - session context στη SMF, το charging reference στη CHF και άλλα.

Συνεπώς, πριν ένα πόρος δημιουργηθεί, ο Service Consumer πρέπει να επιλέξει τον κατάλληλο Service Producer, και πιο συγκεκριμένα την υπηρεσία που θέλει να χρησιμοποιήσει. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, θα πρέπει να γίνουν τα παρακάτω στάδια:

- Η αναζήτηση των υποψηφίων υπηρεσιών με βάση τα εκάστοτε κριτήρια αναζήτησης. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Service Discovery και ως αποτέλεσμα παρέχει μία λίστα από υποψήφιες υπηρεσίες και τις αντίστοιχες οντότητες NF που είναι Service Producer. Για παράδειγμα, για την αναζήτηση της κατάλληλης AUSF ή UDM και της επιθυμητής υπηρεσίας από τη AMF ως Service Consumer, τα κριτήρια είναι το PLMN ID, το routing indicator εφόσον υπάρχει, και το αναγνωριστικό SUPI. Αντίστοιχα, για την αναζήτηση της κατάλληλης SMF και της επιθυμητής υπηρεσίας της, τα κριτήρια είναι η τοποθεσία του τερματικού UE, το όνομα DNN, η τιμή S-NSSAI, η ένδειξη PGW Indicator και πολλά άλλα.
- Η επιλογή της επιθυμητής υπηρεσίας και οντότητας από την λίστα υποψηφίων που προέρχεται από την διαδικασία του Service Discovery. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Service Selection. Ουσιαστικά, ενώ η λίστα των υποψηφίων καλύπτει τα κριτήρια, αν περιλαμβάνει παραπάνω από μία επιλογές, θα πρέπει να επιλεγεί μία, τελικώς, η οποία μπορεί να γίνει με βάση άλλα κριτήρια όπως το φόρτο της κάθε οντότητας NF και άλλα.

Εδώ πρέπει να τονιστεί, ότι πολλές φορές, ενώ έχει επιλεγεί ένας Service Producer και δημιουργείται ο πόρος, τα επόμενα μηνύματα σηματοδοσίας για το συγκεκριμένο πόρο χρησιμοποιούν τον ίδιο Service Producer. Μία εξαίρεση είναι όταν ο Service Producer είναι είτε μη υγιής είτε σε υπερφόρτωση είτε για κάποιον άλλο λόγο πρέπει να επιλεγεί ένας νέος Service Producer, οπότε σε αυτή την περίπτωση γίνεται επανεπιλογή



(Service Reselection), όπου ουσιαστικά είναι η ίδια διαδικασία που περιγράφεται στο βήμα 2 πιο πάνω. Συνοπτικά, το αν οι παραπάνω λειτουργίες μεταφερθούν προς την πλευρά του SCP ή όχι, έχουμε τρεις δυνατές επιλογές. Η διαδικασία Service Selection μπορεί να αναφερθεί και ως Non-functional Selection, ενώ το Service Discovery μπορεί να αναφερθεί ως Functional Selection [42].

Το Service Discovery και το Service (Re-)Selection πραγματοποιείται από την ίδια την οντότητα NF, και το SCP λαμβάνει το αίτημα καθώς και την επιλεγμένη υπηρεσία στην οποία θα προωθήσει το μήνυμα. Πιο συγκεκριμένα, το SCP θα λάβει την επικεφαλίδα 3gpp-Sbi-Target-apiRoot η οποία υποδεικνύει το apiRoot της επιλεγμένης οντότητας NF [44]. Επίσης, εδώ υπάρχει η εναλλακτική να πραγματοποιηθεί η διαδικασία του Service Discovery από την οντότητα NF και την διαδικασία του Service Selection από το SCP. Συνεπώς, το SCP λαμβάνει το αίτημα καθώς και την λίστα των υποψηφίων οντοτήτων NF, έτσι ώστε να υλοποιήσει την διαδικασία του Service Selection. Η λίστα των υποψηφίων οντοτήτων NF σηματοδοτείται προς το SCP μέσω των επικεφαλίδων 3gpp-Sbi-Discovery-target-nf-set-id, 3gpp-Sbi-Discovery-target-nf-service-set-id, 3gpp-Sbi-Discovery-amf-region-id ή/και 3gpp-Sbi-Discovery-amf-set-id, τα οποία ουσιαστικά περιλαμβάνουν την πληροφορία των οντοτήτων NF από τα οποία θα επιλέξει το SCP μέσω της διαδικασίας του Service Selection [44]. Αυτός ο τρόπος όπου κανένα σκέλος ή μόνο η διαδικασία Service Selection μεταφέρεται στο SCP, ονομάζεται Model C επικοινωνία.

Αν όμως η οντότητα NF δεν ασχοληθεί καθόλου με τις διαδικασίες Service Discovery και Service Selection, τότε μεταφέρει προς το SCP τις κατάλληλες παραμέτρους, για να πραγματοποιήσει τις προαναφερθείσες διαδικασίες. Πιο αναλυτικά, η οντότητα NF μεταφέρει τις παραμέτρους μέσω των επικεφαλίδων 3gpp-Sbi-Discovery-\*. Έτσι το SCP πραγματοποιεί την διαδικασία του Service Discovery, βρίσκει τις υποψήφιες οντότητες NF και επιλέγει το επιθυμητό, δηλαδή υλοποιεί την διαδικασία και του Service Selection. Αυτός ο τρόπος επικοινωνίας ονομάζεται Model D.

Το Model C μαζί με τις δύο παραλλαγές του, και το Model D, παρέχουν τα οφέλη της χρήσης του SCP όσον αφορά την δρομολόγηση, τη γενικότερη διαχείριση της κίνησης, την διαχείριση και τμηματοποίηση των δικτύων, την προστασία του δικτύου από μη εγκεκριμένη σηματοδότηση καθώς και τον έλεγχο και τροποποίηση της κίνησης του δικτύου.

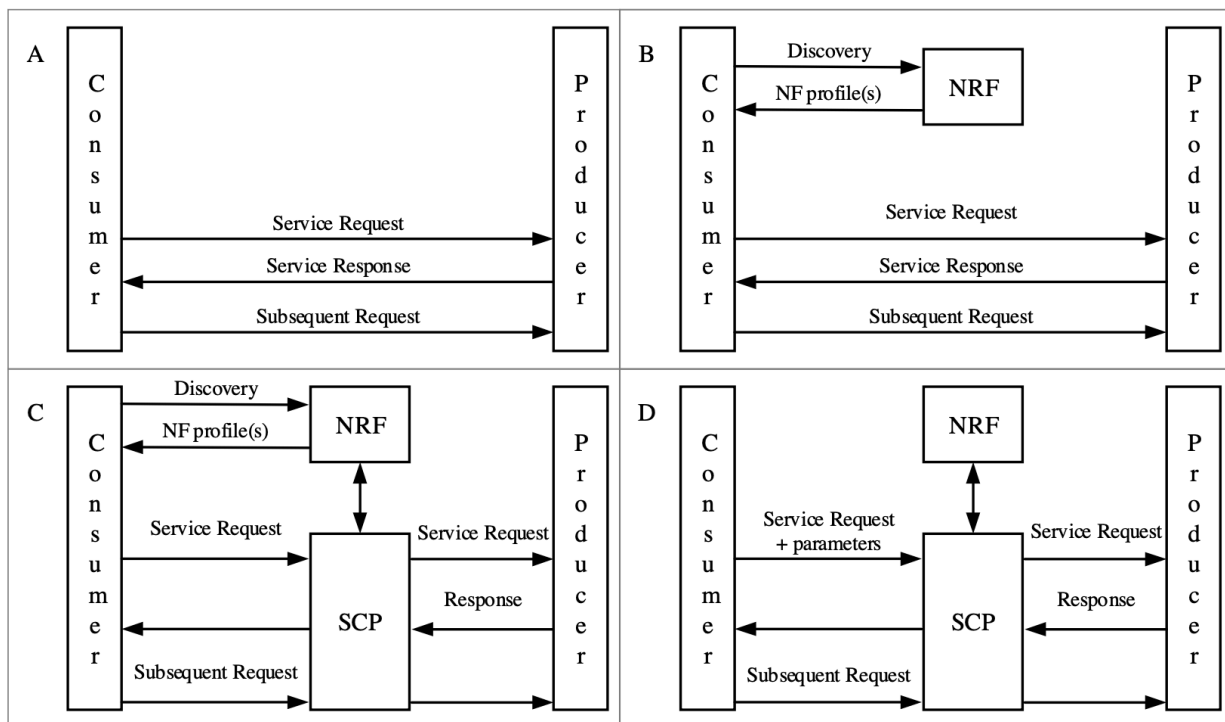
Από την άλλη, το Model C με την μεταφορά της διαδικασίας του Service Selection και το Model D παρέχουν την ενοποιημένη χρήση τεχνικών κατανομής φόρτου και μηχανισμών αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρεία. Συνοψίζοντας όλες οι δυνατές επιλογές επικοινωνίας που ορίζονται από τη Release 16 είναι οι εξής:

- Το Model A – Direct Communication χωρίς την χρήση NRF. Σε αυτόν τον τρόπο επικοινωνίας, δεν απαιτείται η ύπαρξη της NRF ούτε του SCP. Ο κάθε Service Consumer έχει τοπικά τις πληροφορίες των οντοτήτων NF που είναι Service Producer, και επικοινωνούν απευθείας
- Το Model B – Direct Communication με την χρήση της NRF. Πραγματοποιείται από τον Service Consumer η διαδικασία του Service Discovery με την χρήση της NRF και εν συνεχεία πραγματοποιείται τοπικά η διαδικασία του Service Selection με βάση τα αποτελέσματα του Service Discovery. Αφού επιλεγθεί ο κατάλληλος Service Producer, η επικοινωνία γίνεται απευθείας.
- Το Model C – Indirect Communication without delegated discovery. Πραγματοποιείται από τον Service Consumer η διαδικασία του Service

Discovery με την χρήση της NRF, και επιλέγει είτε μία συγκεκριμένη οντότητα NF, είτε ένα πλήθος NF γνωστό και ως NF Set. Καθώς η επικοινωνία γίνεται έμμεσα μέσω του SCP, στέλνεται το αίτημα προς το SCP μαζί με την επιλεγμένη NF ή το NF Set. Αν το SCP λάβει το NF Set, τότε πραγματοποιεί την διαδικασία του Service Selection και αν είναι εφικτό επικοινωνεί με την NRF για την ανάκτηση πληροφοριών που αφορούν το NF Set που έλαβε, όπως τοποθεσία, χωρητικότητα κ.α. Το SCP δρομολογεί το αίτημα προς το επιλεγμένο Service Producer.

- Το Model D – Indirect Communication with delegated discovery. Ο Service Consumer δεν πραγματοποιεί ούτε Service Discovery ούτε Service Selection, παρά μόνο στέλνουν στο SCP τις παραμέτρους αναζήτησης μαζί με το αίτημα. Το SCP, τρέχει την διαδικασία του Service Discovery με την χρήση της NRF, και εν συνεχεία επιλέγει το κατάλληλο Service Producer μέσω της διαδικασίας του Service Selection και προωθεί το αίτημα. Οπότε η επικοινωνία γίνεται διαμέσου του SCP.

Οι τεχνικές προδιαγραφές παρέχουν την δυνατότητα στην NRF να είναι τοποθετημένη μαζί με το SCP, καθώς για παράδειγμα στο Model D, η επικοινωνία του SCP με την NRF είναι πολύ συχνή, οπότε έτσι μειώνονται οι όποιες καθυστερήσεις στην μεταξύ τους επικοινωνία.



Εικόνα 67: Μοντέλα επικοινωνίας A, B, C και D από την κοινοπραξία 3GPP

Τα πρώτα δίκτυα 5G SA χρησιμοποιούσαν το Model B, το οποίο είναι αρκετό για τις περιπτώσεις μικρών δικτύων ή για πειραματικά δίκτυα. Εν συνεχεία, με την έλευση της Release 16, οι προοπτικές των Model C και D δίνουν την δυνατότητα για την λειτουργία μεγάλων και πολύπλοκων δικτύων 5GC.

Όλα τα παραπάνω μοντέλα επικοινωνίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα στα πλαίσια του ίδιου του δικτύου και να συνυπάρχουν. Έτσι μπορεί να υπάρχουν κάποιες οντότητες NF που χρησιμοποιούν model A, κάποια μπορεί να έχουν model C και άλλα model D κ.ο.κ. Ακόμη, η συνύπαρξη των model C και D είναι εφικτή στα

πλαίσια του ίδιου SCP, καθώς κάθε φορά, ανάλογα τις επικεφαλίδες HTTP, το SCP μπορεί να επιλέξει αν θα προχωρήσει σε Service Discovery ή/και Service (Re-)selection η θα επικοινωνήσει απευθείας με το προεπιλεγμένο Service Producer που έχει λάβει από την οντότητα NF που είναι Service Consumer.

Αυτή η ευελιξία επιλογής του μοντέλου επικοινωνίας δεν περιορίζεται μόνο στα πλαίσια μίας οντότητας NF. Μπορεί ίδια οντότητα NF να χρησιμοποιεί Model C με μία συγκεκριμένου τύπου NF, και model D με μία άλλη οντότητα, με βάση τις πολιτικές και ρυθμίσεις που έχει. Ακόμη η εναλλαγή από το ένα μοντέλο επικοινωνίας στο άλλο είναι ουσιαστικά μία γρήγορη διαδικασία, καθώς μπορεί να επιλεγθεί ανά πάσα στιγμή.

Αυτή η ευελιξία επιλογής μοντέλου επικοινωνίας παρέχει επίσης την δυνατότητα χρήσης του καταλληλότερου ανάλογα την περίπτωση. Για παράδειγμα, υπάρχουν περιπτώσεις όπου η διαδικασία Service Discovery είναι προτιμότερο να πραγματοποιηθεί από την πλευρά της οντότητας NF αντί του SCP, λαμβάνοντας υπόψιν συγκεκριμένες απαιτήσεις. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η επιλογή SMF από τη AMF και πιο συγκεκριμένα η υποστήριξη της κινητικότητας των χρηστών με την αξιοποίηση της δυνατότητας Enhancing Topology of SMF and UPF in 5G Networks<sup>303</sup> για γεωγραφική τμηματοποίηση. Ουσιαστικά, ανάλογα την νέα περιοχή του συνδρομητή, όπου μπορεί να είναι εκτός της περιοχής κάλυψης της SMF και της αντίστοιχης UPF, θα πρέπει να τοποθετηθεί μία επιπλέον SMF και αντίστοιχα UPF, οι Intermediate-SMF<sup>304</sup> και Intermediate-UPF<sup>305</sup> αντίστοιχα. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί να αλλαχθεί μία ήδη υπάρχουσα I-SMF και I-UPF είτε να αφαιρεθεί τελείως αν ο συνδρομητής επιστρέψει στην περιοχή κάλυψης της αρχικής SMF. Για να γίνουν οι προαναφερθείσες διαδικασίες από την οντότητα AMF, θα πρέπει κατά την κινητικότητα των χρηστών να ελέγχεται η περιοχή του συνδρομητή και η περιοχή κάλυψης της SMF και της I-SMF, αν υπάρχει. Αυτή η πληροφορία λαμβάνεται μέσω της διαδικασίας του Service Discovery. Συνεπώς αν μεταφερθεί στο SCP, δηλαδή έχουμε model D, η AMF δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει την λειτουργία ETSUN, και από την άλλη το SCP δεν θα πρέπει και δεν μπορεί να το επωμιστεί.

Από την άλλη, υπάρχουν άλλες περιπτώσεις όπου η διαδικασία του Service Discovery είναι πιο απλή περίπτωση, όπως είναι η εύρεση της κατάλληλης AUSF ή UDM από τη AMF, όπου το model D μπορεί να χρησιμοποιηθεί και προτείνεται.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχει η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών SCP εξυπηρετητών μεταξύ της επικοινωνίας δύο οντοτήτων NF, όπου το αίτημα στέλνεται από την οντότητα NF στο πρώτο SCP, το οποίο το στέλνει εν συνεχεία στο δεύτερο και καταλήγει στην οντότητα NF που είναι ο Service Producer.

## 5.2 Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών - Service Mesh

Γενικά, ένα service mesh [45] είναι ένα στρώμα αποκλειστικής υποδομής (dedicated infrastructure layer) το οποίο υπάρχει σε κάθε εφαρμογή που είναι μέρος του service mesh, και ουσιαστικά ελέγχει το πως επικοινωνούν οι υπηρεσίες μεταξύ τους, χωρίς την εφαρμογή να χρειάζεται να αντιλαμβάνεται την ύπαρξή του. Η έννοια του service

---

<sup>303</sup> Στο εξής: ETSUN

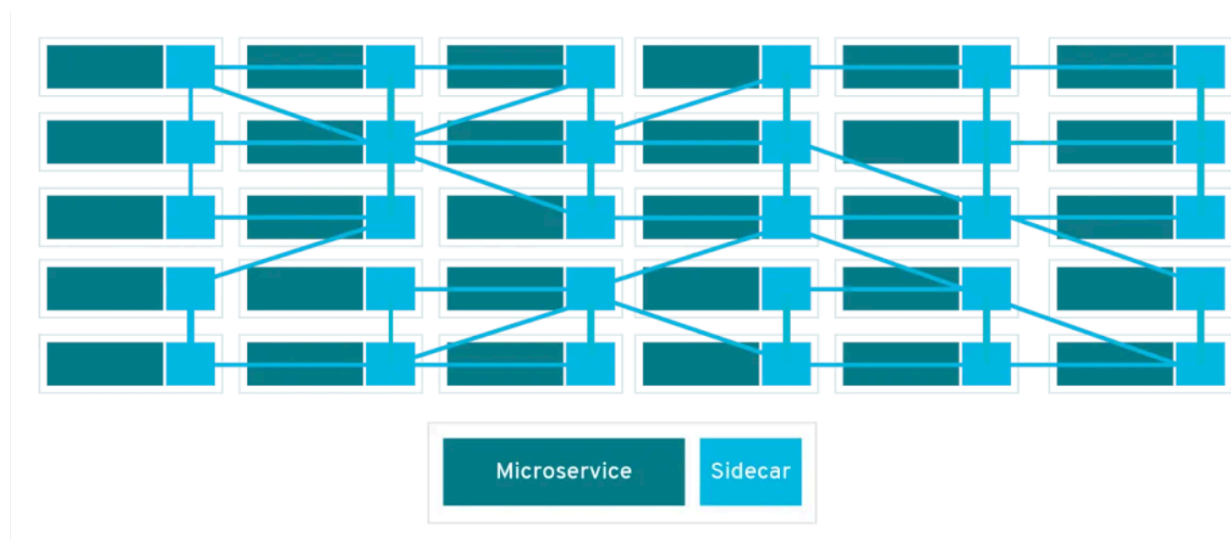
<sup>304</sup> Στο εξής: I-SMF

<sup>305</sup> Στο εξής: I-UPF

mesh είναι άρρηκτά συνδεδεμένη με την έννοια των μικρουπηρεσιών και του cloud native.

Για την δημιουργία του service mesh, θα πρέπει κάθε μικρουπηρεσία ή υπηρεσία να έχει έναν proxy, και με αυτόν τον τρόπο η service-to-service επικοινωνία γίνεται μέσω του δικτύου που σχηματίζουν αυτοί οι proxies μεταξύ τους. Ο κάθε proxy που είναι μέρος του service mesh ονομάζεται sidecar proxy, καθώς «τρέχει» παράλληλα με την μικρουπηρεσία ή υπηρεσία.

Η δημιουργία του mesh network ως μία ξεχωριστή οντότητα που υπάρχει παράλληλα με κάθε εφαρμογή, οδηγεί στην αποφυγή της υλοποίησης στα πλαίσια των ίδιων των εφαρμογών, το οποίο θα ήταν πολύ δαπανηρό και ασύμφορο. Απεναντίας, η ανάπτυξη των εφαρμογών μπορεί να εστιάσει καθαρά στην επιχειρηματική λογική (business logic).



Εικόνα 68: Αρχιτεκτονική mesh network με την τεχνική sidecar

### 5.2.1 Istio mesh network

Το Istio [46] είναι ένα service mesh ανοιχτού κώδικα το οποίο εγκαθίσταται ως ένα διαφανές στρώμα επικοινωνίας στην υποδομή για κατανεμημένες εφαρμογές και γενικότερα για υπηρεσίες. Μέσω αυτού του στρώματος, παρέχεται ένας κοινός και αποδοτικός τρόπος για την εξασφάλιση της ασφάλειας, της σύνδεσης και της παρακολούθησης της επικοινωνίας των υπηρεσιών μεταξύ τους, χωρίς την ανάγκη αλλαγής στον κώδικα των ίδιων των υπηρεσιών και γενικότερα των εφαρμογών τα οποία απαρτίζουν. Το Istio παρέχει συνοπτικά:

- Ασφαλής επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών με την χρήση:
  - Κρυπτογράφηση TLS από άκρο σε άκρο
  - Επαλήθευση ταυτότητας και εξουσιοδότησης
- Αυτοματοποιημένη κατανομή φόρτου για τα παρακάτω είδη κίνησης:
  - Κίνηση HTTP

- Κίνηση gRPC Remote Procedure Calls<sup>306</sup>
- Κίνηση WebSocket
- Κίνηση TCP
- Διαχείριση της κίνησης μέσω κανόνων δρομολόγησης, επαναπροσπάθειας και ανακατεύθυνσης. Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα προσθήκης τεχνικών προβλημάτων στην επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών, για έλεγχο των εφαρμογών σε μη ιδεατές συνθήκες δικτύου.
- Ένα πλαίσιο πολιτικών για την εφαρμογή ορίων και τον έλεγχο της πρόσβασης.
- Αυτοματοποιημένη και κεντριοποιημένη συλλογή μετρικών και αρχείων καταγραφής.
- Την δυνατότητα επέκτασής της λειτουργικότητάς του με την χρήση WebAssembly modules<sup>307</sup>, για την εφαρμογή πιο περίπλοκων λογικών για την διαχείριση της κίνησης και καταγραφής της.

Ο τρόπος λειτουργίας του Istio βασίζεται κατά κύριο λόγο στην τεχνική του sidecar, όπως αναφέρθηκε, και στην αρχιτεκτονική του mesh network με την χρήση νοήμων (intelligent) proxies, και πιο συγκεκριμένα του Envoy proxy. Η τεχνική του sidecar είναι ουσιαστικά η επέκταση των δυνατοτήτων μίας υπηρεσίας χωρίς την αλλαγή του πηγαίου κώδικα της, αλλά με την προσθήκη αυτών των επιπλέον λειτουργιών δίπλα στην κύρια εφαρμογή. Συνήθως αυτές οι λειτουργίες, όπως service discovery, service routing, load balancing, TLS security κ.α., είναι κοινές για πολλά διαφορετικά είδη υπηρεσιών και έτσι είναι προτιμότερο να είναι αποκομμένες από την κυρίως επιχειρηματική λογική της υπηρεσίας. Ουσιαστικά, η υπηρεσία δεν πρέπει στην πραγματικότητα να γνωρίζει καν την ύπαρξη του sidecar, εξ ου και ο διαφανής τρόπος λειτουργία του mesh network συνολικότερα.

Το Istio διαχωρίζεται λογικά σε δύο επίπεδα:

- το επίπεδο ελέγχου - control plane
- το επίπεδο δεδομένων - data plane

Το επίπεδο ελέγχου, με βάση τις επιθυμητές ρυθμίσεις και την γνώση των διαθέσιμων υπηρεσιών, ελέγχει δυναμικά τους proxies παρέχοντάς τους τις κατάλληλες ρυθμίσεις και εντολές και εν συνεχεία, ανάλογα τις αλλαγές που μπορεί να προέλθουν ή την αλλαγή των ρυθμίσεων στο service mesh, ενημερώνει κατάλληλα τις νέες καταστάσεις που πρέπει να έχουν.

Από την άλλη, το επίπεδο δεδομένων εμπεριέχει και απαρτίζεται ουσιαστικά από το πλήθος των sidecar proxies και είναι η ίδια η επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών μέσω αυτών, δημιουργώντας έτσι το service mesh.

Το επίπεδο δεδομένων μπορεί να λειτουργήσει σε δύο διαφορετικές παραλλαγές:

- το Sidecar mode, όπου ο Envoy proxy τοποθετείται μαζί με κάθε υπηρεσία

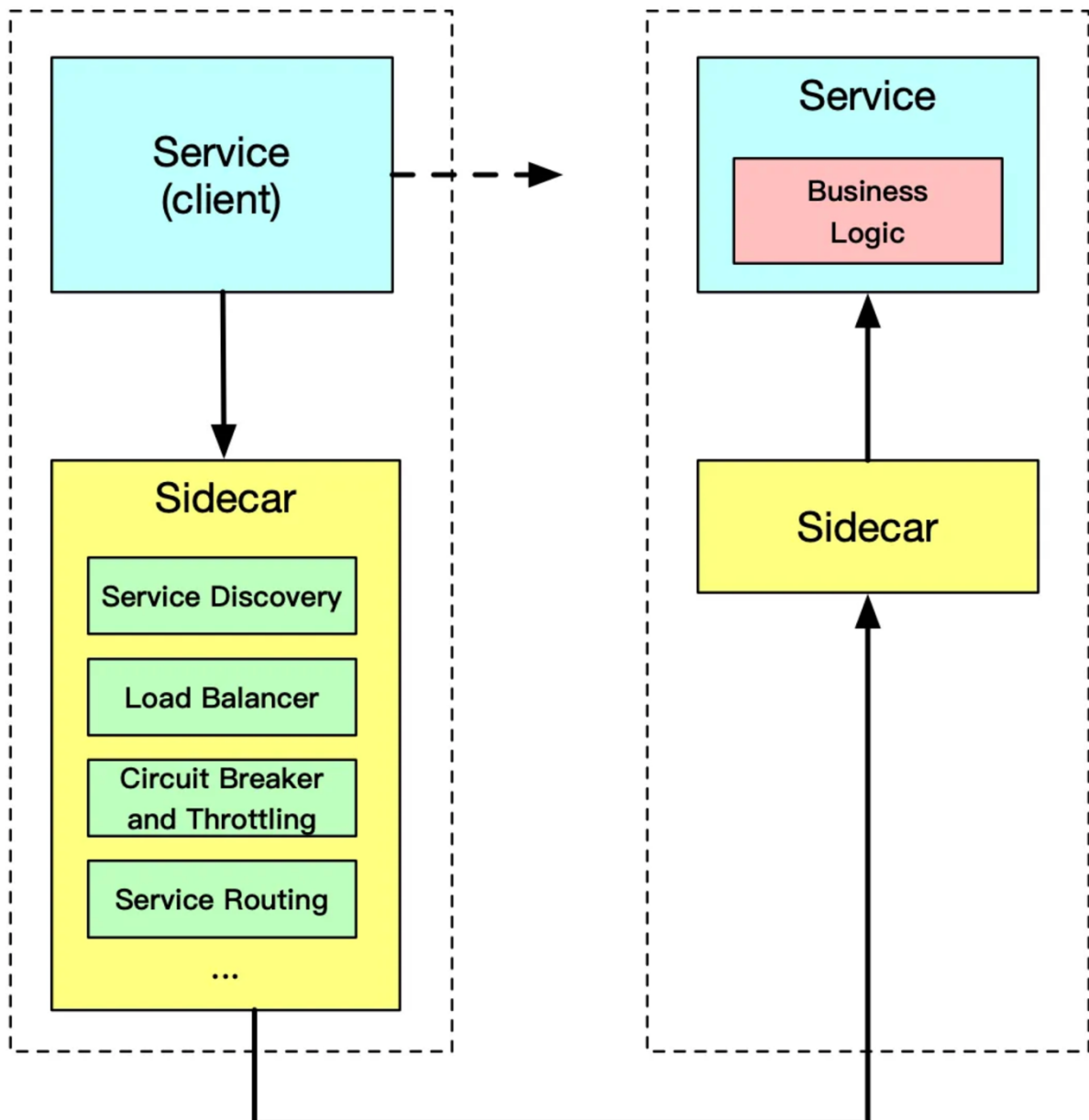
---

<sup>306</sup> Στο εξής: gRPC

<sup>307</sup> Στο εξής: WASM

- το Ambient mode, όπου χρησιμοποιείται ένας συγκεντρωτικός proxy επιπέδου 4, και προαιρετικά και ένας συγκεντρωτικός proxy επιπέδου 7.

Ο Envoy proxy είναι ένας proxy, από τον οποίο περνάει όλη η κίνηση από και προς μία υπηρεσία. Όλοι οι proxies αυτοί ελέγχονται από το istiod, το οποίο πρακτικά είναι ο κεντρικός ελεγκτής του mesh network συνολικά.

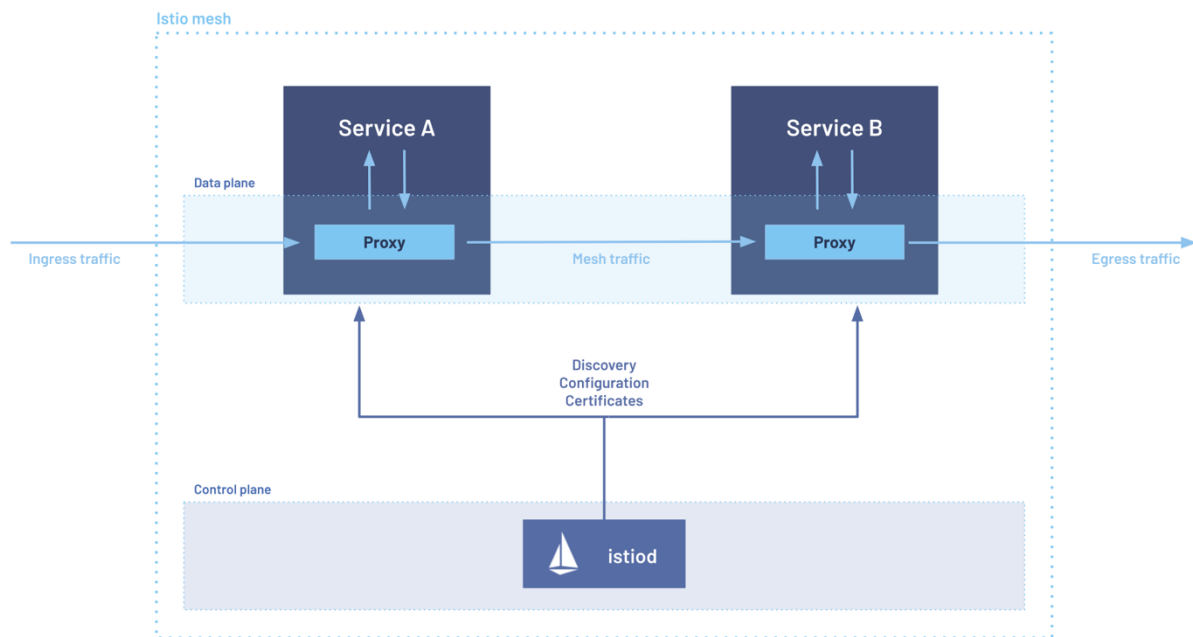


Εικόνα 69: Sidecar pattern

Οι κύριες λειτουργίες που μπορεί να πραγματοποιηθούν στα πλαίσια του mesh network που δημιουργεί το Istio μπορεί να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Διαχείριση της κίνησης δικτύου (Traffic Management)
- Ασφάλεια (Security)
- Τηλεμετρία της κίνησης δικτύου (Observability)
- Επεκτασιμότητα (Extensibility)

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς



**Εικόνα 70: Istio σε sidecar mode**

Με την έννοια της διαχείρισης της κίνησης, το Istio παρέχει την δυνατότητα μέσω κανόνων δρομολόγησης να κατευθύνει καταλλήλως την ροή της κίνησης μεταξύ των υπηρεσιών. Καθίσταται έτσι δυνατή η δημιουργία A/B δοκιμών, ο διαχωρισμός της κίνησης ποσοστιαία μεταξύ των ίδιου τύπου υπηρεσιών, καθώς και η κατανομή του φόρτου του δικτύου με βάση την επιλεγμένο αλγόριθμο, όπως round robin, least request ή με τυχαία επιλογή. Ένα σύνολο από τις δυνατότητες της διαχείρισης της κίνησης μέσω Istio είναι οι εξής:

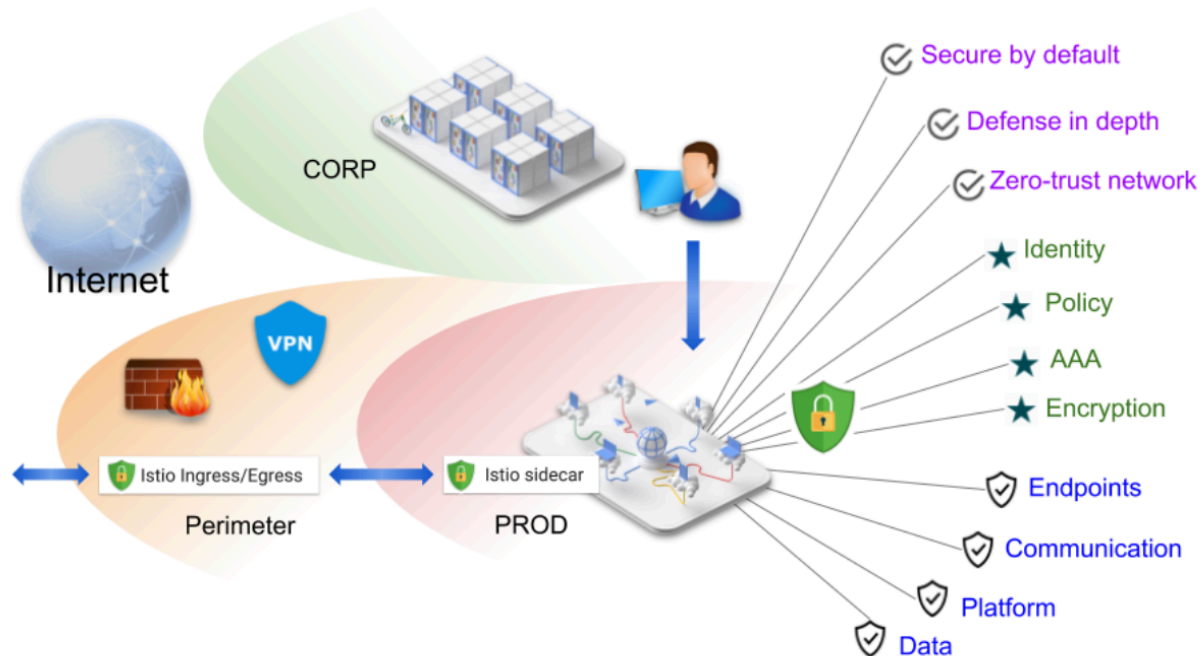
- Request Routing
- Fault Injection
- Traffic Shifting
- TCP Traffic Shifting
- Request Timeouts
- Circuit Breaking
- Mirroring
- Locality Load Balancing
- Ingress
- Egress

Επίσης με την εφαρμογή κατάλληλων πολιτικών, υπάρχει η δυνατότητα για οριοθέτηση του ρυθμού μεταφοράς, σε καθολικό (global) επίπεδο και σε τοπικό (local) επίπεδο. Το local rate limit αφορά τον περιορισμό των αιτημάτων σε επίπεδο service. Και τα δύο είδη rate limit μπορεί να συνυπάρχουν στα πλαίσια του ίδιου service mesh.

Με την έννοια της ασφάλειας, το Istio προσφέρει προστασία από επιθέσεις man-in-the-middle, τον έλεγχο πρόσβασης στις υπηρεσίες με την χρήση των κατάλληλων

Κατακεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς

μηχανισμών πρόσβασης υπηρεσιών και την παροχή εργαλείων ελέγχου των ενεργειών των υπηρεσιών με χρονολογική σειρά.



Εικόνα 71: Ασφάλεια μέσω Istio mesh network

Τα μέρη που δομούν την ασφάλεια μέσω Istio είναι τα κάτωθι:

- Ένας Certificate Authority<sup>308</sup> για την διαχείριση των κλειδιών και πιστοποιητικών κρυπτογράφησης
- Πολιτικές για επαλήθευση της ταυτότητας, της εξουσιοδότησης και πληροφορία Secure Naming
- Σημεία επιβολής πολιτικών, τα οποία είναι ουσιαστικά τα ίδια τα sidecar proxies και οι περιμετρικοί proxies (ingress και egress)
- Επεκτάσεις Envoy proxy για την τηλεμετρία και τον έλεγχο

Με την έννοια της παρατήρησης της κίνησης, το Istio παρέχει την δυνατότητα της ανακάλυψης και επίλυσης προβλημάτων στην επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών. Για τον σκοπό αυτό παρέχονται τα εξής:

- Metrics
- Distributed traces
- Access logs

Με τα metrics νοείται η πληροφορία όπως ο συνολικός όγκος της κίνησης στα πλαίσια του service mesh, τα ποσοστά σφάλματος, και οι χρόνοι απόκρισης των αιτημάτων των

<sup>308</sup> Στο εξής: CA



υπηρεσιών. Επίσης, πέρα από τις μετρικές για την λειτουργία των υπηρεσιών, υπάρχουν και μετρικές για τον έλεγχο της λειτουργίας του ίδιου του επιπέδου ελέγχου του Istio. Αυτές οι μετρικές κατηγοριοποιούνται σε:

- Μετρικές Proxy-level
- Μετρικές Service-level
- Μετρικές Control plane

Οι μετρικές proxy-level, όπως μαρτυρά και η ονομασία τους, συλλέγονται στους sidecar proxies. Οι μετρικές service-level metrics αφορούν την κίνηση μεταξύ των υπηρεσιών στα πλαίσια του service mesh και καλύπτουν τέσσερις κύριες κατηγορίες, την καθυστέρηση, την κίνηση, τα σφάλματα, και τον κορεσμό. Οι μετρικές service-level που υπάρχουν εξ ορισμού στο Istio, συνοψίζονται στον κάτωθι πίνακα:

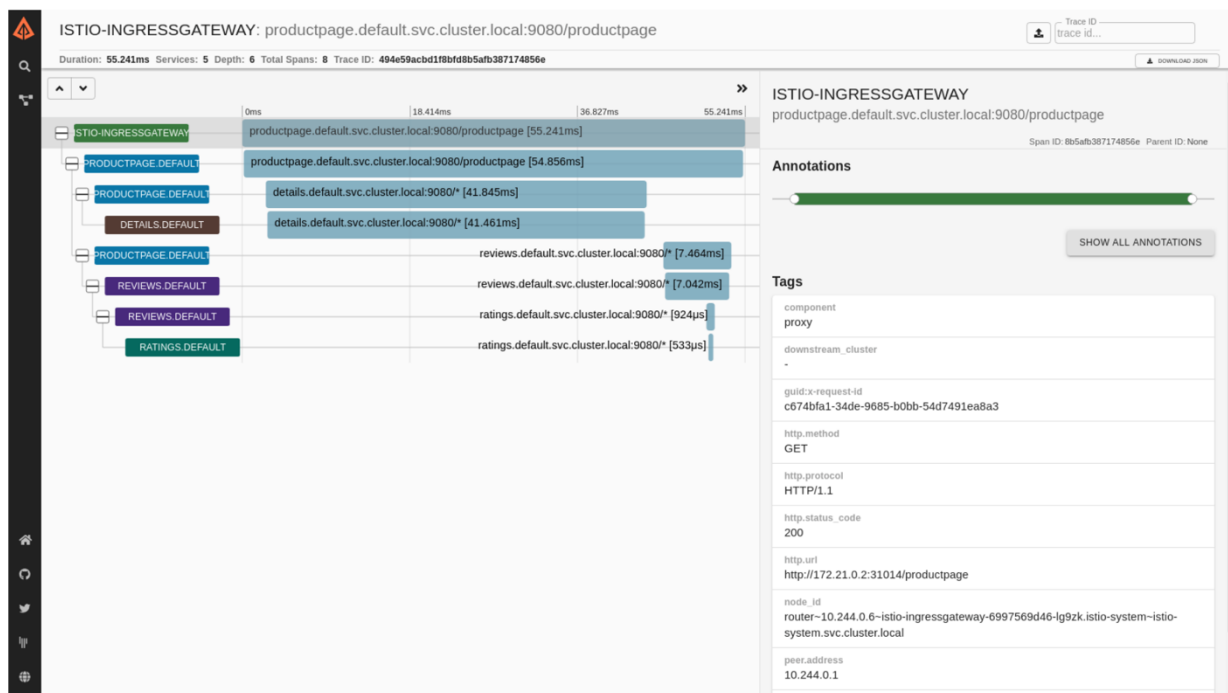
**Πίνακας 3: Σύνολο διαθέσιμων μετρικών Istio**

<b>Service-level μετρική</b>	<b>Όνομα μετρητή</b>
Request Count	istio_requests_total
Request Duration	istio_request_duration_milliseconds
Request Size	istio_request_bytes
Response Size	istio_response_bytes
gRPC Request Message Count	istio_request_messages_total
gRPC Response Message Count	istio_response_messages_total
TCP Bytes Sent	istio_tcp_sent_bytes_total
TCP Bytes Received	istio_tcp_received_bytes_total
TCP Connections Opened	istio_tcp_connections_opened_total
TCP Connections Closed	istio_tcp_connections_closed_total

Με τα distributed traces γίνεται καταγραφή της υπηρεσίας σε επίπεδο αιτημάτων, όπου μπορεί να εξετασθούν οι διάφορες εξαρτήσεις μεταξύ των υπηρεσιών που υπάρχουν καθώς και η καθυστέρηση στην εξυπηρέτηση των αιτημάτων. Το Istio υποστηρίζει ένα πλήθος από εργαλεία εμφάνισης tracing, όπως:

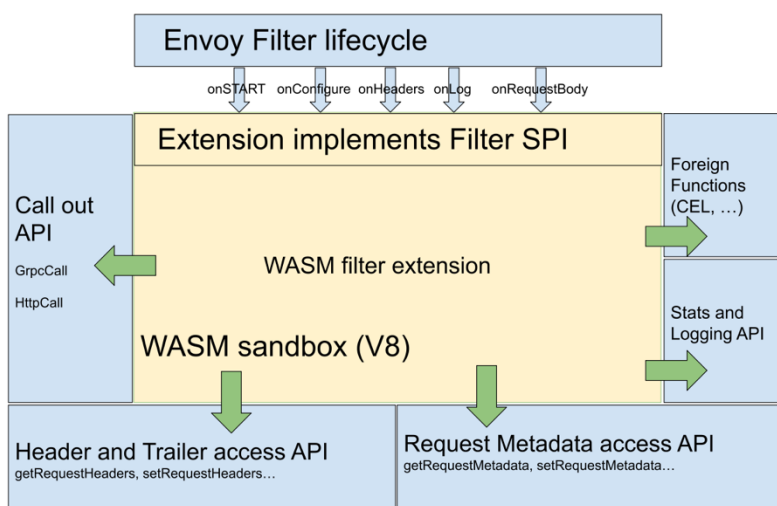
- Zipkin
- Jaeger
- Lightstep
- Datadog

Καταναημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς



**Εικόνα 72: Εμφάνιση distributed traces στο ZipKin**

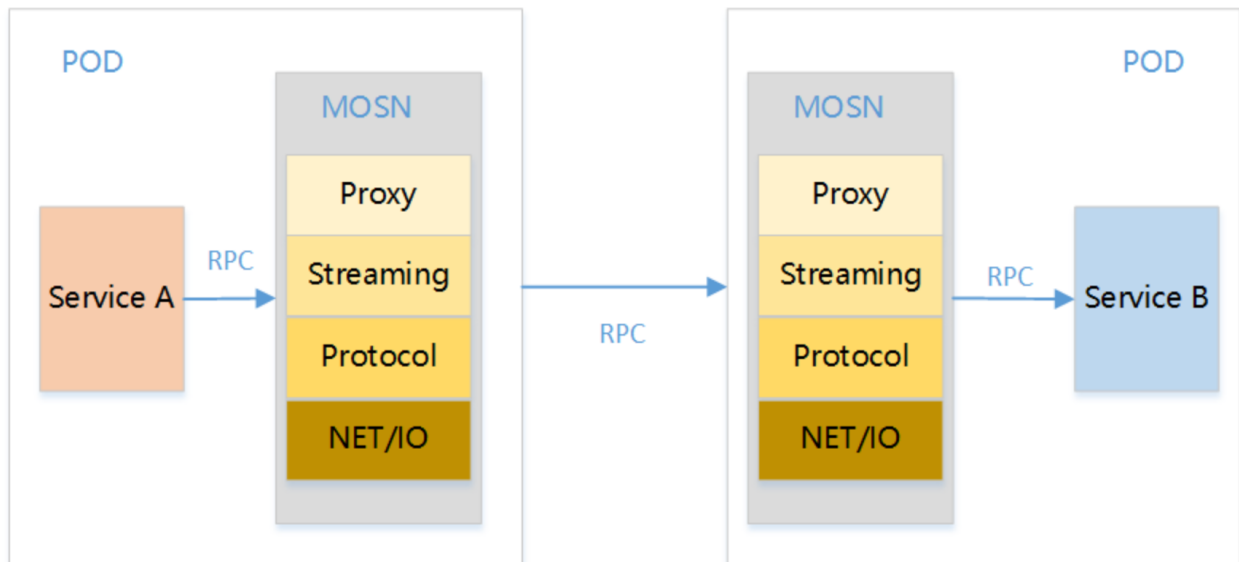
Με την έννοια της επεκτασιμότητας το Istio παρέχει την δυνατότητα προσθήκης νέων λειτουργιών και χαρακτηριστικών που δεν μπορούν να υλοποιηθούν από τα ήδη διαθέσιμα χαρακτηριστικά του Istio. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της τεχνολογίας του WebAssembly sandboxing, με την παροχή ενός Proxy-Wasm sandbox API για την δυνατότητα δημιουργίας WASM, τα οποία μπορούν να φορτωθούν δυναμικά κατά την λειτουργία του service mesh.



**Εικόνα 73: Αρχιτεκτονική επέκτασεων WASM**

## 5.2.2 Service Mesh μέσω MOSN

Αντί της χρήσης του Envoy proxy ως sidecar proxy, υπάρχει και η δυνατότητα της χρήσης του Modular Open Smart Network proxy<sup>309</sup> [47]. Ο MOSN proxy είναι υλοποιημένος στην γλώσσα προγραμματισμού Go, και καθώς έχει υποστήριξη για τα xDS API, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ο κατεξοχήν sidecar proxy στο Istio service mesh.



Εικόνα 74: Αρχιτεκτονική Istio με MOSN proxy

Παραπάνω φαίνεται η αρχιτεκτονική του MOSN proxy, όπου έχει τέσσερα στρώματα:

- NET/IO που είναι το επίπεδο δικτύου
- Protocol layer, το οποίο ελέγχει τα πακέτα και χρησιμοποιεί τα αντίστοιχα πρωτόκολλα για κωδικοποίηση και αποκωδικοποίηση
- Stream layer, το οποίο είναι ένα επίπεδο ενθυλάκωσης των αποκωδικοποιημένων πακέτων σε ροές για την χρήση φίλτρων
- Proxy layer, το οποίο ασχολείται με την προώθηση και τον χειρισμό των ροών από το stream layer.

## 5.2.3 Service Mesh μέσω eBPF

Η λειτουργία των sidecar proxies του Istio service mesh βασίζεται στην χρήση του iptables για την μεταφορά όλης της κίνησης από και προς την υπηρεσία διαμέσου του sidecar. Η χρήση όμως της λειτουργία του iptables ενέχει κάποια μειονεκτήματα.

Για αρχή, το iptables χρησιμοποιεί το connection tracking<sup>310</sup> το οποίο είναι ένα χαρακτηριστικό του πυρήνα των Linux που επιτρέπει την καταγραφή όλων των λογικών συνδέσεων και ροών και την αναγνώριση όλων των πακέτων για αυτά, για τον χειρισμό

<sup>309</sup> Στο εξής: MOSN

<sup>310</sup> Στο εξής: conntrack

τους. Η χρήση του conntrack όμως για ένα μεγάλος πλήθος συνδέσεων μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη χρήση πόρων και κατ' επέκταση μπορεί να είναι πρόβλημα για ένα mesh network όπου κάθε υπηρεσία χαρακτηρίζεται από ένα μεγάλο πλήθος συνδέσεων.

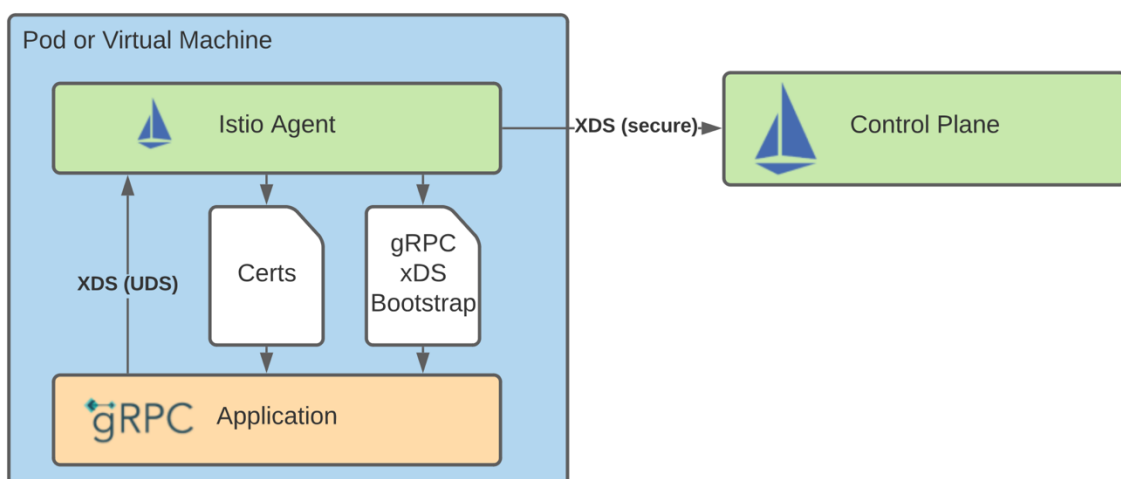
Ακόμη, το iptables είναι ένα κοινό εργαλείο με καθολική χρήση των κανόνων του που το καθιστά δύσκολο στην διαχείρισή του. Ακόμη, η ανακατεύθυνση μέσω του iptables γίνεται μέσω της διεπαφής loopback, το οποίο συνεπάγεται ότι η κίνηση θα περάσει από τα διάφορα επίπεδα δικτύου δύο φορές, το οποίο συνεπάγεται μεγαλύτερη καθυστέρηση.

Για την αποφυγή της χρήσης του iptables και των μειονεκτημάτων του, έχει προταθεί η δυνατότητα της λειτουργίας του Istio μέσω του Cilium [48]. Το Cilium είναι ένα ανοιχτού κώδικα λογισμικό το οποίο παρέχει δικτύωση, παρατήρηση της κίνησης και ασφάλεια με την αξιοποίηση του Extended Berkeley Packet Filter<sup>311</sup>. Το eBPF είναι ένα χαρακτηριστικό του πυρήνα των Linux, το οποίο παρέχει την δυνατότητα εκτέλεσης προσαρμοσμένου κώδικα στο ίδιο το λειτουργικό σύστημα με ασφάλεια και ταχύτητα.

Αντί για το Cilium, υπάρχει επίσης και η δυνατότητα χρήσης του Merbridge, το οποίο βασίζεται και αυτό στο eBPF, για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του service mesh μέσω της εξάλειψης του iptables [49].

#### 5.2.4 Service Mesh μέσω gRPC

Ένα ενδιαφέρον νέο χαρακτηριστικό από την έκδοση 1.11 του Istio είναι η υποστήριξη του mesh network χωρίς την χρήση του Envoy proxy [50]. Μέχρι πρότινος, το Istio αξιοποιεί τα sidecar proxies τα οποία ελέγχονται από το istiod δυναμικά μέσω των xDS APIs. Η υποστήριξη αυτών των APIs έχει γίνει σε ένα μεγάλο βαθμό από το gRPC, και έτσι οι εφαρμογές που βασίζονται στην βιβλιοθήκη gRPC για την επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών τους μπορούν να βασίζονται στο mesh network χωρίς την ύπαρξη του sidecar proxy.



Εικόνα 75: Αρχιτεκτονική Istio χωρίς sidecar proxy

<sup>311</sup> Στο εξής: eBPF

Πλέον η επικοινωνία με το istiod, γίνεται μέσω ενός Istio agent. Ο Istio agent επικοινωνεί με την βιβλιοθήκη gRPC για να το κατευθύνει στην επικοινωνία του με το istiod, για να παρέχει τα κατάλληλα πιστοποιητικά για την ασφαλή επικοινωνία στο mesh network, και το ποια μεταδεδομένα να στείλει προς το επίπεδο ελέγχου του Istio. Αυτή η επικοινωνία του Istio agent και της βιβλιοθήκης gRPC γίνεται μέσω ενός αρχείου bootstrap, που εμπεριέχει όλες τις προαναφερθείσες πληροφορίες.

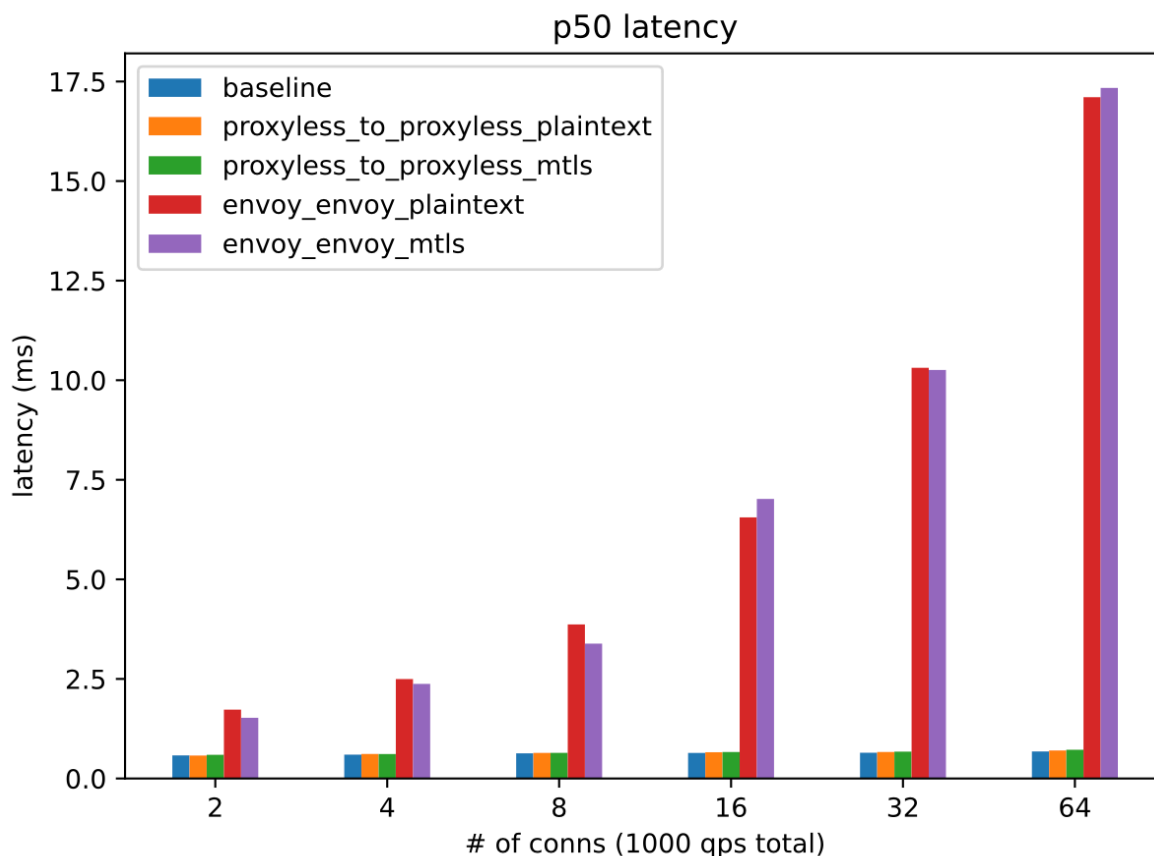
Τα πλεονεκτήματα του service mesh μέσω gRPC είναι ότι πλέον δεν υπάρχει ο ενδιάμεσος proxy στον οποίο γίνεται ανακατεύθυνση όλη η κίνηση μέσω iptables, το οποίο έχει κόστος σε πόρους και ανεβάζει την καθυστέρηση και έτσι είναι πιο αποδοτικό από άποψη μνήμης και επεξεργαστικής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τους πόρους αυτούς, με βάση την πειραματική διάταξη στο [50], απαιτούνται λιγότερο από το μισό σε σχέση με την χρήση sidecar proxies, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 4: Σύγκριση χρήσης πόρων μνήμης και επεξεργαστή**

	<b>Client mCPU</b>	<b>Client (MiB)</b>	<b>Memory</b>	<b>Server mCPU</b>	<b>Server Memory (MiB)</b>
<b>Envoy Plaintext</b>	320.44	66.93		243.78	64.91
<b>Envoy mTLS</b>	340.87	66.76		309.82	64.82
<b>Proxyless Plaintext</b>	0.72	23.54		0.84	24.31
<b>Proxyless mTLS</b>	0.73	25.05		0.78	25.43

Επιπρόσθετα, στο Istio mesh network με gRPC, μειώνεται και η καθυστέρηση σε σχέση με το mesh network με sidecar proxies καθώς δεν απαιτείται η λειτουργία ενός sidecar proxy σε κάθε υπηρεσία, και κατ' επέκταση δεν γίνεται χρήση του iptables με όλα τα μειονεκτήματα που αναφέρθηκαν.

Στα μειονεκτήματα, συγκαταλέγονται το ότι δεν υποστηρίζονται όλα τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του Istio. Ακόμη, απαιτείται η χρήση της βιβλιοθήκης του gRPC, το οποίο ίσως να μην ήταν μέρος της υλοποίησης της υπηρεσίας, το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε αλλαγές στον πηγαίο κώδικα, που ουσιαστικά είναι από τα πλεονεκτήματα του Istio μέσω sidecar proxy.



Εικόνα 76: Καθυστέρηση μεταξύ του Istio με gRPC και του Istio με sidecar proxy

### 5.2.5 Κατανεμημένος εξυπηρετητής SCP μέσω service mesh

Αν και η προσθήκη του SCP στα πλαίσια της Release 16 ήταν ένα πολύ σημαντικό εργαλείο για την χρήση ενός ενοποιημένου τρόπου δρομολόγησης, κατανομής φόρτου, μηχανισμών αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρεία καθώς και ενός ενοποιημένου συστήματος παρατήρησης και γενικότερα ένα εργαλείο διαχείρισης της κίνησης, οι τεχνικές προδιαγραφές αφήνουν αρκετές λεπτομέρειες υλοποίησης στην διακριτική ευχέρεια των κατασκευαστών.

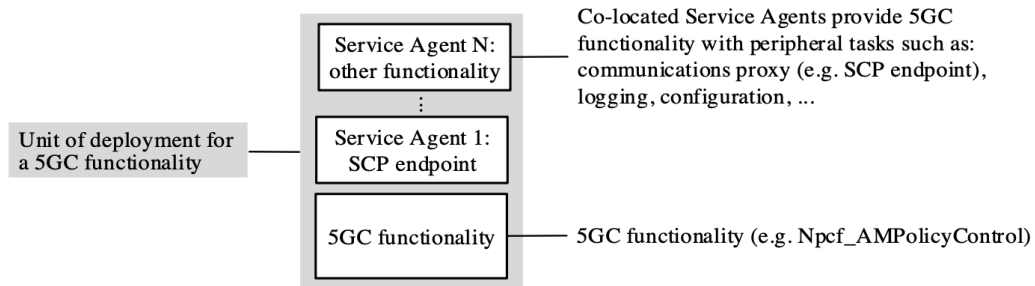
Για παράδειγμα, το SCP ως μία λογική οντότητα, μπορεί να υλοποιηθεί ως μία κεντρική οντότητα, δηλαδή ως ένα ξεχωριστό cloud native Network Function<sup>312</sup>, είτε να υλοποιηθεί κατανεμημένα. Αυτή η επιλογή παρέχεται ως δυνατότητα από τις ίδιες τις τεχνικές προδιαγραφές, ανατρέχοντας στο Annex G.2 του 3GPP TS 23.501 [37]. Ουσιαστικά υπάρχει η πρόθεση για την αξιοποίηση ενός service mesh για την υλοποίηση των λειτουργιών ενός SCP.

Συνεπώς, στα πλαίσια του δικτύου 5G και του SCP, το ίδιο το mesh network θα είναι η βάση για την υλοποίηση του κατανεμημένου SCP, με την προσθήκη κάποιων αλλαγών για την πλήρη υποστήριξη της λειτουργίας ενός SCP.

Πιο αναλυτικά, τα τελικά σημεία του SCP θα είναι κατανεμημένα στο 5GC functionality, όπου ως 5GC functionality νοείται μία οντότητα NF, μία υπηρεσία NF, ή ένα σύνολο

<sup>312</sup> Στο εξής: CNF

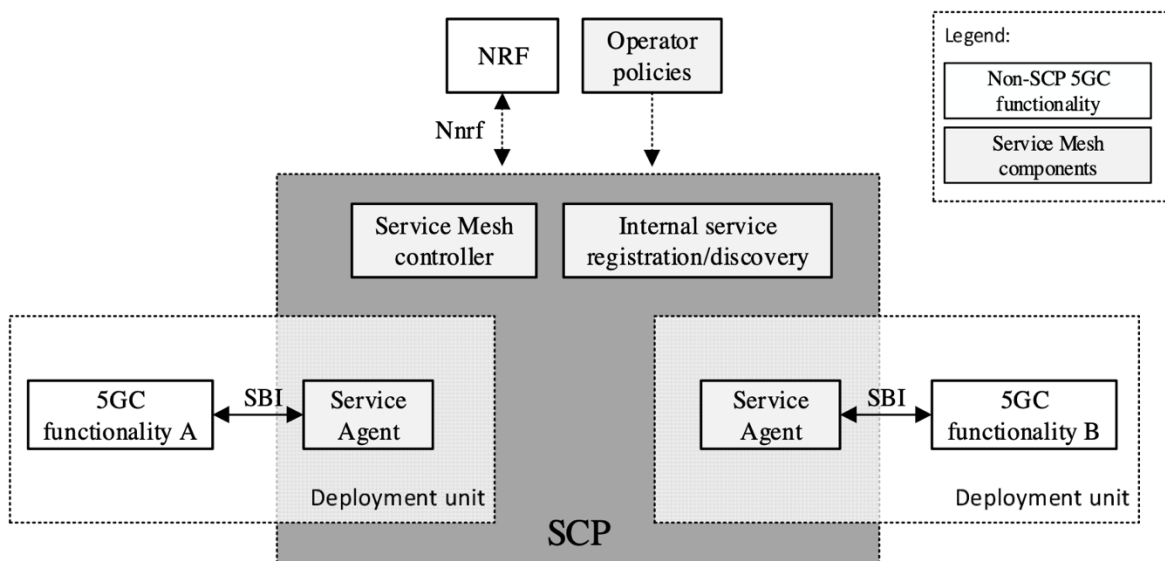
από μικρουπηρεσίες που υλοποιούν την οντότητα NF ή ένα υπερσύνολο από NF, υπηρεσίες ή μικρουπηρεσίες NF. Οι λειτουργίες ενός τελικού σημείου του καταναμημένου SCP υλοποιούνται από έναν SCP Service agent ο οποίος είναι τοποθετημένος μαζί με το 5GC functionality, όπως φαίνεται παρακάτω



**Εικόνα 77: Καταναμημένος SCP agent**

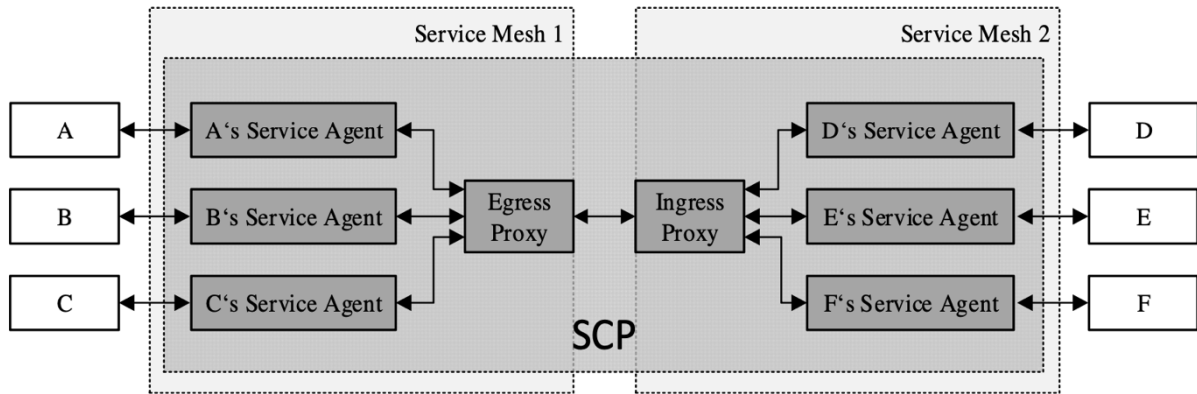
Οι SCP Service agent παρέχουν τις λειτουργίες του SCP όσον αφορά την έμμεση επικοινωνία και την διαδικασία του Service Discovery, δηλαδή model D. Όλοι οι SCP Service agent που είναι καταναμημένοι και δίπλα στο 5GC functionality, ελέγχονται από τον ελεγκτή mesh controller, ο οποίος στέλνει τις πολιτικές για την δρομολόγηση και το γενικότερη διαχείριση της κίνησης. Η ύπαρξη των SCP Service agent είναι άγνωστη ως προς το 5GC functionality. Για την διαδικασία του Service Discovery και του Service (Re-)Selection στα πλαίσια του ίδιου του mesh network, υπάρχει μία εσωτερική υπηρεσία για αυτούς τους σκοπούς, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα επικοινωνίας με μία εξωτερική οντότητα NRF όταν πρέπει να επιλεγεί μία οντότητα NF εκτός του τρέχοντος mesh network, δηλαδή η επικοινωνία με ένα άλλο mesh network.

Για παράδειγμα, ο Service Consumer, δηλαδή ένα 5GC functionality, στέλνει το αίτημα προς το SCP Service agent, ο οποίος στα πλαίσια του ίδιου του mesh network, βρίσκει το επιλεγμένο Service Producer και δρομολογεί το μήνυμα προς το αντίστοιχο SCP Service agent, που βρίσκεται δίπλα με το επιλεγμένο 5GC functionality.



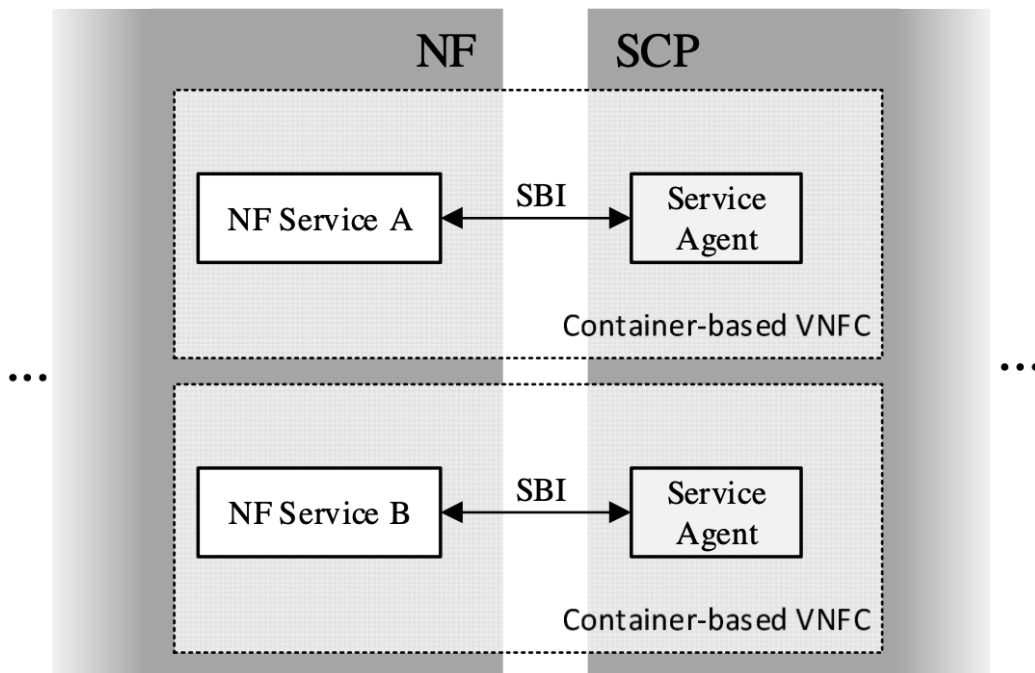
**Εικόνα 78: Καταναμημένο SCP μέσω service mesh**

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς



**Εικόνα 79: Πολλαπλά πλέγματα SCP**

Σε αυτό το παράδειγμα, ο Service Producer ανήκει στο ίδιο mesh network, οπότε η αναζήτησή του στα πλαίσια της εσωτερικής υπηρεσίας για σκοπούς εύρεση του προορισμού αρκεί. Αντιθέτως, αν άνηκε εκτός του mesh network, τότε θα έπρεπε να γίνει χρήση της εξωτερικής NRF και να σταλθεί το αίτημα εκτός των ορίων του mesh network μέσω της χρήσης του egress proxy. Ο egress proxy θα στείλει το μήνυμα προς τον ingress proxy του άλλου mesh δικτύου, ο οποίος θα το προωθήσει προς τον κατάλληλο SCP service agent του επιλεγμένου 5GC functionality.



**Εικόνα 80: NF Service και κατανεμημένος SCP**

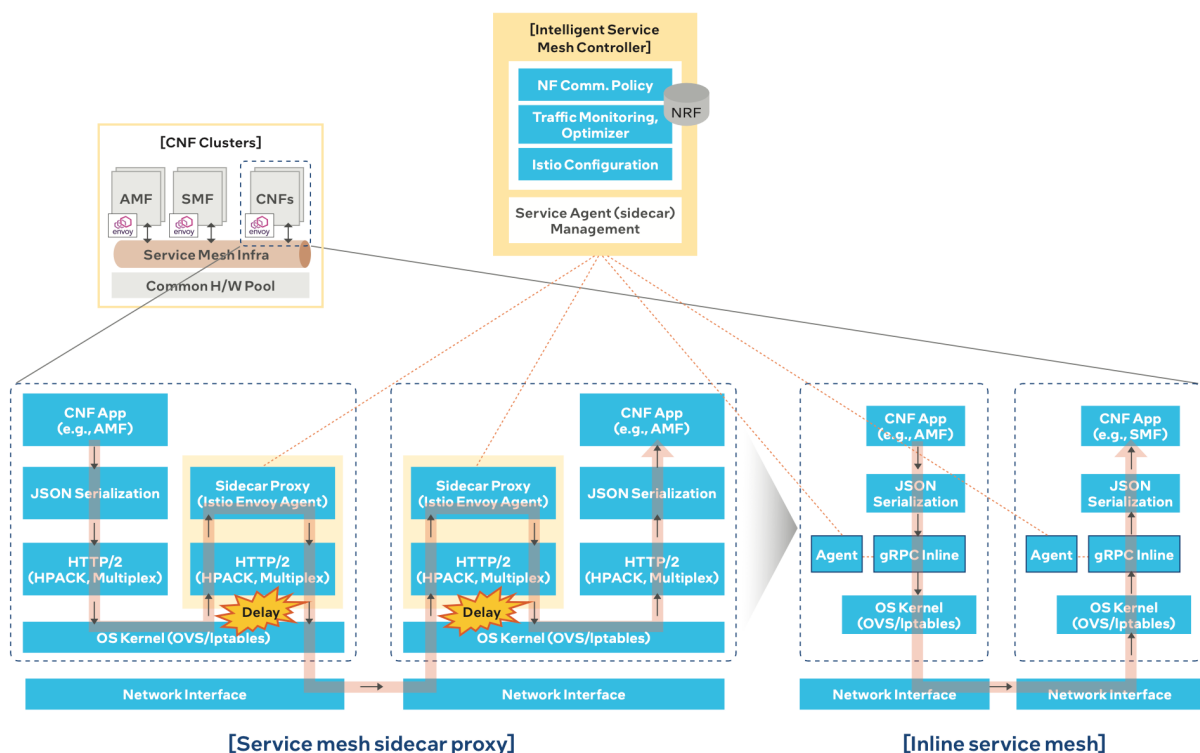
Η ύπαρξη πολλών mesh network τα οποία επικοινωνούν μεταξύ τους, ή η χρήση ενός μεγάλου mesh network είναι θέμα υλοποίησης και ανάπτυξης του δικτύου. Η χρήση ενός κατανεμημένου SCP δίνει την δυνατότητα για ενδιαφέρουσες υλοποιήσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η εφαρμογή ενός κατανεμημένου πλαισίου εξουσιοδότησης για network slices, που ονομάζεται 5G-Wave [51]. Με την κατανεμημένη φύση του SCP μέσω service mesh, τα sidecar proxies υλοποιούν το αποκεντριοποιημένο πλαίσιο



εξουσιοδότησης και επαλήθευσης που ονομάζεται Wave. Με αυτόν τον τρόπο το SCP αναλαμβάνει τον ρόλο εξουσιοδότησης.

Μία ενδιαφέρουσα προσέγγιση για καταναμημένο SCP παρουσιάζεται στο [52]. Σε αυτό, αντί της χρήσης του mesh network με την αξιοποίηση sidecar proxies, πραγματοποιείται η αξιοποίηση της βιβλιοθήκης gRPC, για την λειτουργία της λήψης των κανόνων και των πολιτικών του service mesh και καθώς η επικοινωνία μεταξύ των υπηρεσιών πραγματοποιείται μέσω της βιβλιοθήκης gRPC, δεν απαιτείται ο εγκλωβισμός της κίνησης για τον χειρισμό της, καθώς αυτό επιτυγχάνεται στα πλαίσια της ίδιας της εφαρμογής. Συνεπώς η λογική του χειρισμού και ελέγχου της κίνησης μεταφέρεται από το sidecar proxy στην βιβλιοθήκη gRPC, και συνεπώς εμπεριέχεται στα πλαίσια της επικοινωνίας της υπηρεσίας.

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση ενός ενσωματωμένου service mesh βασισμένο στην επικοινωνία μέσω gRPC μειώνει την καθυστέρηση στην επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων NF, λόγω της έλλειψης των sidecar proxies σε συνδυασμό με την εφαρμογή των λειτουργιών τους εγγενώς στα πλαίσια της επικοινωνίας της ίδιας της υπηρεσίας. Επιπρόσθετα, η χρήση πόρων επεξεργαστικής ισχύος είναι μικρότερη με το ενσωματωμένο service mesh. Το αξιοσημείωτο είναι ότι με το ενσωματωμένο service mesh η καθυστέρηση και οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι πολύ κοντά με την λειτουργία ενός δικτύου χωρίς την χρήση ενός service mesh.



Εικόνα 81: Ενσωματωμένο Service mesh-based SCP

Η απαίτηση όμως της χρήσης του gRPC στα πλαίσια των διεπαφών SBI, προϋποθέτει την υποστήριξη αυτού του πλαισίου και κανόνων επικοινωνίας από τα API που ορίζονται από την κοινοπραξία 3GPP. Αν και η επικοινωνία μέσω gRPC βασίζεται στην λειτουργία του πρωτοκόλλου HTTP/2, υπό την έννοια ότι είναι ένα ανώτερο στρώμα στο οποίο βασίζεται, ένα σημείο επικοινωνίας HTTP/2 δεν μπορεί να επικοινωνήσει απευθείας με ένα σημείο επικοινωνίας gRPC. Συνεπώς, για το μελλοντικό δίκτυο 6G θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν η υποστήριξη της χρήσης του gRPC, με την πιθανή ύπαρξη

και των δύο τρόπων μέσω της δυνατότητας χρήσης τόσο gRPC, όσο και HTTP/2 για λόγους υποστήριξης συμβατότητας προς τα πίσω.

Η χρήση του gRPC μπορεί να γίνει όμως ελεύθερα και χωρίς περιορισμούς μεταξύ των υπηρεσιών που απαρτίζουν ένα NF. Το κατανεμημένο SCP και οι δυνατότητές του μπορεί να επεκταθούν και στα πλαίσια της επικοινωνίας μέσα στην οντότητα NF, εφόσον αυτό είναι δομημένο από ένα σύνολο υπηρεσιών που επικοινωνούν μεταξύ τους. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η κοινοπραξία 3GPP ορίζει την επικοινωνία και τα πρωτόκολλα μεταξύ των οντοτήτων NF, αλλά η δόμησή τους είναι στην διακριτική ευχέρεια των κατασκευαστών, συνεπώς το SCP μπορεί να χρησιμοποιηθεί και εκεί, μία δυνατότητα που είναι εφικτή μόνο μέσω του κατανεμημένου SCP και του service mesh στο οποίο βασίζεται.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του κατανεμημένου SCP είναι το γεγονός ότι δεν είναι ένα κεντρικό σημείο αποτυχίας πλέον, καθώς η κατανεμημένη φύση του οδηγεί στον επηρεασμό μόνο μέρος του δικτύου που σχετίζεται άμεσα με το sidecar proxy που ενδεχομένως έχει προβλήματα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ανεκτικότητα στην έμμεση επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων NF του δικτύου.

## 6. Διάταξη δοκιμών με το μοντέλο Service mesh

### 6.1 Open5GS

Το Open5GS [53] είναι ένα σύνολο από υπηρεσίες ανοιχτού κώδικα τα οποία υλοποιούν το σύστημα EPS, παρέχοντας παράλληλα και υποστήριξη για την επέκταση 5G NSA. Ακόμη έχει υλοποιημένο ένα πλήθος οντοτήτων NF του 5GC, για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου 5G SA δικτύου.

Οι δικτυακές οντότητες του open5GS για το σύστημα EPS / 5G NSA είναι οι κάτωθι:

- MME
- HSS
- Policy and Charging Rules Function<sup>313</sup>
- Serving Gateway Control Plane Function<sup>314</sup>
- Serving Gateway User Plane Function<sup>315</sup>
- Packet Gateway Control Plane Function<sup>316</sup> μαζί με SMF, γνωστό ως SMF/PGW-C
- Packet Gateway User Plane Function<sup>317</sup> μαζί με UPF, γνωστό ως UPF/PGW-U

Οι οντότητες NF του 5GC που υλοποιεί το open5GS είναι οι εξής:

- NRF
- SCP
- SEPP
- AMF
- SMF
- UPF
- AUSF
- UDM
- UDR
- PCF
- NSSF
- BSF

---

<sup>313</sup> Στο εξής: PCRF

<sup>314</sup> Στο εξής: SGW-C

<sup>315</sup> Στο εξής: SGW-U

<sup>316</sup> Στο εξής: PGW-C

<sup>317</sup> Στο εξής: PGW-U

Τα στοιχεία των συνδρομητών, τόσο για το EPS καθώς και για το 5G SA, τοποθετούνται σε μία βάση δεδομένων, και πιο συγκεκριμένα την βάση mongoDB. Οι υπηρεσίες του Open5GS μπορούν να τρέξουν σε Debian/Ubuntu καθώς και openSUSE διανομές Linux, καθώς υπάρχουν τα κατάλληλα πακέτα λογισμικού για την εγκατάστασή του open5GS. Υπάρχει και η δυνατότητα να χτίσει κανείς τις υπηρεσίες του open5GS για CentOS, Fedora και Alpine διανομές Linux, καθώς και για macOS και FreeBSD λειτουργικά συστήματα. Το open5GS παρέχει επίσης και ένα γραφικό περιβάλλον ιστού για την προσθήκη, αφαίρεση καθώς και αλλαγή των στοιχείων και ρυθμίσεων των συνδρομητών. Η ρύθμιση των υπηρεσιών του open5GS γίνεται μέσω αρχείων ρυθμίσεων, τα οποία είναι μορφοποιημένα σε YAML.

Τα χαρακτηριστικά που υποστηρίζει το open5GS, μέχρι την έκδοση 2.7.0, είναι τα εξής:

- 3GPP Release 17
- AES, Snow3G και ZUC αλγόριθμοι για κρυπτογράφηση και έλεγχο εγκυρότητας
- USIM καρτών συνδρομητών και του Milenage αλγόριθμου
- IPv6 διεπαφές
- Πολλαπλές συνεδρίες PDU ανά συνδρομητή
- Xn και N2 Μεταπομπή (Handover) για το 5GC
- S1 και X2 Μεταπομπή (Handover) για το EPC
- CSFB και SMS Over SGs
- SWx, S6b και S2b διεπαφές για δίκτυα πρόσβασης non-3GPP access στο EPS
- VOLTE
- VONR (Voice over NR)
- 5G Roaming

Οι γνωστοί περιορισμοί του open5GS είναι οι κάτωθι:

- Δεν υπάρχει υποστήριξη του EPC και 5GC interworking
- Δεν υποστηρίζει NB-IoT συσκευές
- Δεν υποστηρίζει συστήματα χρέωσης συνδρομητών όπως Offline Charging System<sup>318</sup> και Online Charging System<sup>319</sup>
- Δεν υποστηρίζει το evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service<sup>320</sup>
- Δεν υποστηρίζει την λειτουργία SRVCC
- Δεν υποστηρίζει κλήσεις εκτάκτου ανάγκης (emergency calls)

Αν οι υπηρεσίες του open5GS τοποθετηθούν σε εικονικές μηχανές, τότε έχουμε VNF ενώ αν τοποθετηθούν σε containers, τότε έχουμε CNF.

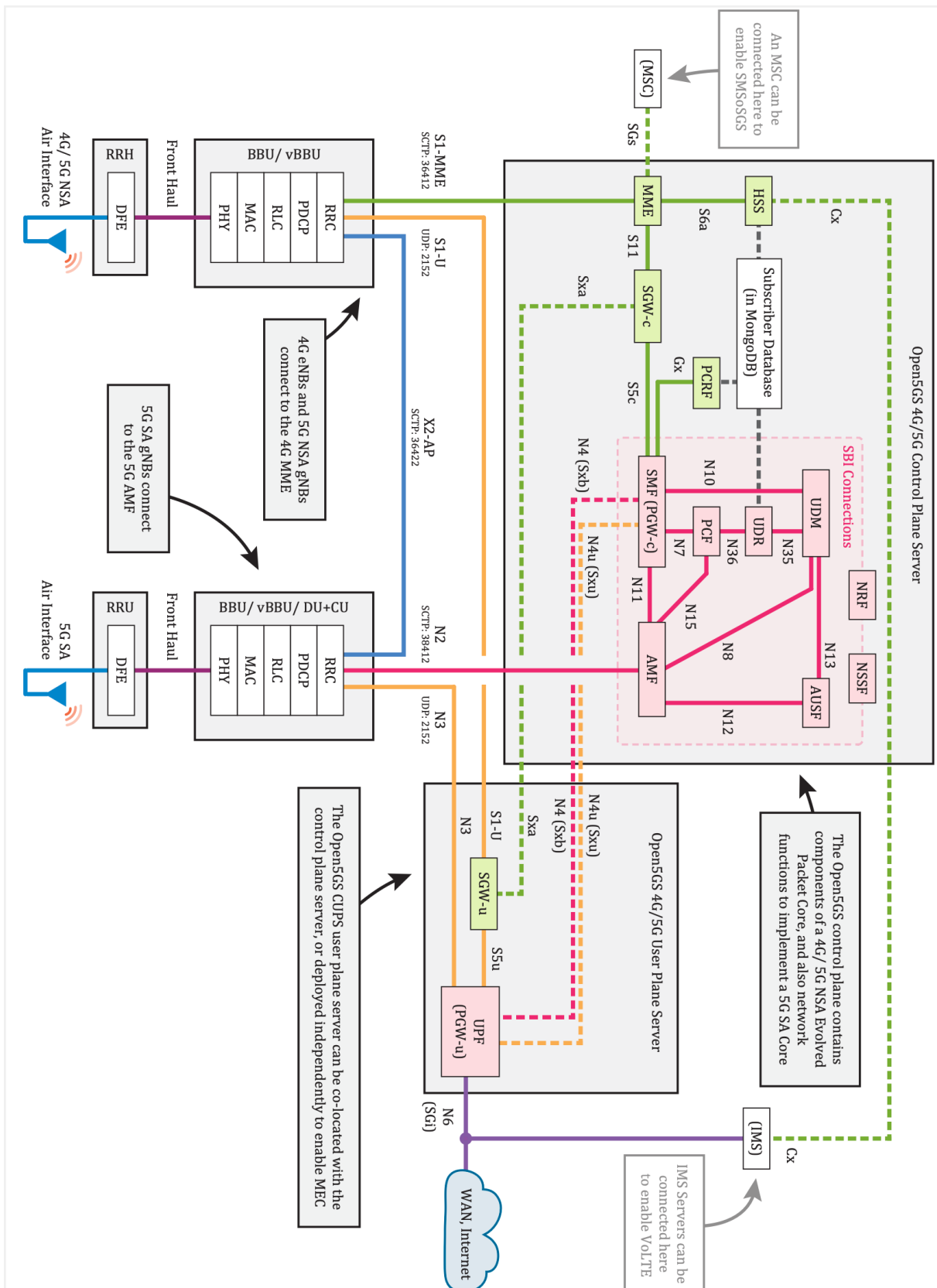
---

<sup>318</sup> Στο εξής: OFCS

<sup>319</sup> Στο εξής: OCS

<sup>320</sup> Στο εξής: eMBMS

Καταμεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς



Εικόνα 82: Αρχιτεκτονική open5GS

## 6.2 UERANSIM

Για την εμφάνιση κίνησης σηματοδοσίας στο 5GC, είναι αναγκαία η ύπαρξη συνδρομητών και πιο συγκεκριμένα τερματικών UE. Για την σύνδεση του UE με το 5GC, απαιτείται επίσης και ένα δίκτυο πρόσβασης, όπου το πιο σύνηθες είναι το NG-RAN. Για τους σκοπούς της πειραματικής διάταξης, το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN και τα τερματικά UE θα προσομοιώνονται, και πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί το εργαλείο προσομοίωσης UERANSIM [54].

Το UERANSIM είναι ένας προσομοιωτής τερματικού 5G UE και σταθμού βάσης gNB, το οποίο είναι ανοιχτού κώδικα και υλοποιημένο στην γλώσσα προγραμματισμού C++. Παρέχει τις βασικές λειτουργίες ενός UE και gNB, με το 5G NR να είναι προσομοιωμένο. Πιο αναλυτικά, το UERANSIM δεν υλοποιεί τα πρωτόκολλα κάτω από το επίπεδο του RRC, δηλαδή τα επίπεδα PHY, MAC, RLC, PDCP. Επίσης, όσον αφορά το επίπεδο χρήστη μεταξύ UE και gNB, το επίπεδο SDAP δεν είναι υλοποιημένο. Ουσιαστικά, η επικοινωνία του 5G UE και του gNB πραγματοποιείται μέσω προσομοιωμένης επικοινωνίας UDP στην θύρα 4997, με την χρήση του πρωτοκόλλου Radio Link Simulation<sup>321</sup>, το οποίο είναι ένα ιδιοταγές πρωτόκολλο του UERANSIM. Για την ανάγνωση πακέτων του RLS στο Wireshark, απαιτείται η χρήση του RLS wireshark dissector [55]. Το πρωτόκολλο RRC και οι βασικές του διαδικασίες είναι υλοποιημένες.

Η επικοινωνία του UERANSIM με το 5GC πραγματοποιείται όπως ορίζουν οι προδιαγραφές, με την διεπαφή NG-C για την επικοινωνία με την οντότητα AMF, την διεπαφή NG-U για την επικοινωνία με τη UPF, μέσω του πρωτοκόλλου GTPv1-U. Στο επίπεδο χρήστη υποστηρίζεται μόνο το πρωτόκολλο IPv4.

Όσον αφορά την επικοινωνία στο επίπεδο NAS, υποστηρίζει τα εξής χαρακτηριστικά αλλά και περιορισμούς:

- Υποστηρίζει την διαδικασία Registration
- Υποστηρίζει τις διαδικασίες UE και Network initiated Deregistration
- Υποστηρίζει την διαδικασία Identification
- Υποστηρίζει την διαδικασία Generic UE Configuration Update
- Υποστηρίζει την διαδικασία UE initiated PDU session establishment
- Υποστηρίζει τις διαδικασίες UE και Network initiated PDU session release
- Υποστηρίζει την διαδικασία Service Request
- Υποστηρίζει τις διαδικασίες Authentication και Security Mode Control
- Υποστηρίζει όλους τους αλγορίθμους κρυπτογράφησης και διασφάλισης εγκυρότητας που ορίζει το 3GPP καθώς και τις μεθόδους ταυτοποίησης συνδρομητών που ορίζει το 3GPP.
- Δεν υποστηρίζει λειτουργίες εκτάκτου ανάγκης στο επίπεδο NAS, όπως διαδικασία Registration για υπηρεσίες εκτάκτου ανάγκης.
- Δεν υποστηρίζει τις διαδικασίες για PDU session authorization και PDU session modification.

---

<sup>321</sup> Στο εξής: RLS

Οι λειτουργίες στο επίπεδο NGAP οι οποίες είναι υλοποιημένες από το σταθμό βάσης gNB του προσομοιωτή UERANSIM είναι οι εξής:

- Η διαδικασία PDU Session Resource Setup
- Η διαδικασία PDU Session Resource Release
- Η διαδικασία Initial Context Setup
- Η διαδικασία NG-RAN node initiated UE Context Release
- Η διαδικασία AMF initiated UE Context Release
- Η διαδικασία UE Context Modification
- Η διαδικασία Initial UE Message
- Η διαδικασία Paging
- Η διαδικασία Downlink NAS Transport
- Η διαδικασία Uplink NAS Transport
- Η διαδικασία NAS Non Delivery Indication
- Η διαδικασία Reroute NAS Request
- Η διαδικασία NG Setup
- Η διαδικασία Error Indication

### 6.3 Εγκατάσταση διάταξης δοκιμών

Για την εκτέλεση των πειραμάτων και την γενικότερη προσομοίωση ενός πλήρους συστήματος δικτύου 5G με την χρήση του open5GS και του UERANSIM που περιεγράφηκαν προηγουμένως, πραγματοποιήθηκε εγκαθίδρυση των υπηρεσιών του open5GS και του UERANSIM σε ένα Kubernetes cluster.

Για την εγκατάσταση των κατάλληλων πακέτων λογισμικού, θα γίνει χρήση του helm και των helm charts που έχουν δημιουργηθεί από την Gradient. Το helm είναι ένα εργαλείο για την διαχείριση εφαρμογών Kubernetes, με το οποίο γίνεται ορισμός της εφαρμογής, η εγκατάσταση καθώς και η αναβάθμισή της. Το πιο σημαντικό στοιχείο του helm είναι το chart, το οποίο εμπεριέχει όλη εκείνη την πληροφορία που απαιτείται για την δημιουργία και εκκίνηση μίας εφαρμογής Kubernetes.

Με τον όρο εφαρμογή Kubernetes νοείται το πλήθος των Pod στα οποία τρέχουν οι υπηρεσίες που υλοποιούν το την επιχειρηματική λογική της εφαρμογής. Με βάση τα αρχεία Gradient helm chart που χρησιμοποιούμε, στην περίπτωση του open5GS ως CNF, είναι τα Pod που τρέχουν τις υπηρεσίες των οντοτήτων NF, και καθώς ένα τέτοιο Pod τρέχει τις υπηρεσίες που απαρτίζουν μία συγκεκριμένη οντότητα NF, ένα Pod του open5GS ταυτίζεται με μία NF. Αντίστοιχα, στο UERANSIM, είναι το Pod που προσομοιώνει τον σταθμό βάσης gNB και το Pod που προσομοιώνει τα τερματικά UE. Το Istio mesh network εγκαθίσταται στο cluster και αυτό μέσω του helm, ακολουθώντας τις οδηγίες στο [56]. Η εφαρμογή των sidecar proxies σε κάθε οντότητα NF πραγματοποιείται αυτόματα, καθώς το Kubernetes namespace στο οποίο γίνεται εγκατάσταση των εφαρμογών Kubernetes, έχει το κατάλληλο Kubernetes label, ήτοι το:

*istio-injection=enabled*

Το συγκεκριμένο Kubernetes label υποδεικνύει στο Kubernetes cluster να προσθέσει τα sidecar proxies σε όλα τα Pod που ανήκουν στο συγκεκριμένο Kubernetes namespace.

### 6.3.1 Εγκατάσταση open5GS ως CNF

Για την εγκατάσταση του open5GS γίνεται χρήση των Gradiant open5GS helm chart [57], σε συνδυασμό με την εισαγωγή παραμετροποιήσεων μέσω του αρχείου helm values, για την αλλαγή κάποιων εξ ορισμού τιμών του chart. Πιο αναλυτικά, μέσω του αρχείου helm values θα απενεργοποιήσουμε το EPS / 5G NSA μέρος του open5GS, και θα ρυθμίσουμε την οντότητα NSSF με την κατάλληλη πληροφορία network slice και τη AMF με τις κατάλληλες ρυθμίσεις δικτύου, όπως το PLMN, το NSSAI, τις περιοχές TAI και το GUAMI. Οι οντότητες NF του 5GC που θα έχουμε στη διάταξη δοκιμών είναι οι απαραίτητες, που είναι η AMF, η SMF, η UPF, η AUSF, η UDM, η UDR, καθώς και η NRF, η BSF, η NSSF, η PCF σε συνδυασμό με την χρήση του SCP network entity. Επίσης, μέσω του αρχείου helm values θα προσθέσουμε και έναν συνδρομητή στην βάση δεδομένων κατά την εκκίνηση του open5GS. Η προσθήκη περαιτέρω συνδρομητών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του open5GS είτε μέσω εντολών τερματικού.

Το περιεχόμενο του αρχείου helm values για το open5GS ως CNF είναι το εξής:

```
dbURI: "mongodb://{{ .Release.Name }}-mongodb/open5gs"
```

```
populate:
```

```
  enabled: true
```

```
  image:
```

```
    registry: docker.io
```

```
    repository: gradiant/open5gs-dbctl
```

```
    tag: 0.10.3
```

```
    pullPolicy: IfNotPresent
```

```
  commonLabels:
```

```
    app: open5gs-model-d-populate
```

```
    version: "2.7.0"
```

```
  initCommands:
```

```
  - open5gs-dbctl add_ue_with_slice 9997000000000001  
465B5CE8B199B49FAA5F0A2EE238A6BC  
E8ED289DEBA952E4283B54E88E6183CA internet 1 111111
```

```
mongodb:
```

```
  enabled: true
```

```
  auth:
```

```
    enabled: false
```

```
  commonLabels:
```

```
    app: open5gs-model-d-mongodb
```

```
    version: "2.7.0"
```



Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*metrics:*

*enabled: true*

*smf:*

*enabled: true*

*config:*

*scp:*

*enabled: true*

*pcrf:*

*enabled: false*

*metrics:*

*enabled: true*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-smf*

*version: "2.7.0"*

*upf:*

*enabled: true*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-upf*

*version: "2.7.0"*

*metrics:*

*enabled: true*

*webui:*

*enabled: true*

*ingress:*

*hostname: open5gs-model-d.k8s.nkua.internal*

*ingressClassName: nginx*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-webui*

*version: "2.7.0"*

*hss:*

*enabled: false*

*mongodb:*

*enabled: false*

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-hss*

*version: "2.7.0"*

*mme:*

*enabled: **false***

*metrics:*

*enabled: **true***

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-mme*

*version: "2.7.0"*

*pcrf:*

*enabled: **false***

*mongodb:*

*enabled: **false***

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-pcrf*

*version: "2.7.0"*

*sgwc:*

*enabled: **false***

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-sgwc*

*version: "2.7.0"*

*sgwu:*

*enabled: **false***

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-sgwu*

*version: "2.7.0"*

*amf:*

*config:*

*sbi:*

*client:*

*scp:*

*enabled: **true***

*guamiList:*

*- plmn\_id:*

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

```
mcc: "999"
mnc: "70"
amf_id:
  region: 2
  set: 1
taiList:
  - plmn_id:
      mcc: "999"
      mnc: "70"
      tac: [1]
plmnList:
  - plmn_id:
      mcc: "999"
      mnc: "70"
s_nssai:
  - sst: 1
    sd: "0x1111111"
metrics:
  enabled: true
containerSecurityContext:
  runAsUser: 0
  runAsNonRoot: false
commonLabels:
  app: open5gs-model-d-amf
  version: "2.7.0"
ausf:
  config:
    sbi:
      client:
        scp:
          enabled: true
commonLabels:
  app: open5gs-model-d-ausf
  version: "2.7.0"
bsf:
  config:
```

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*sbi:*

*client:*

*scp:*

*enabled: true*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-bsf*

*version: "2.7.0"*

*nrf:*

*config:*

*scp:*

*enabled: true*

*containerSecurityContext:*

*runAsUser: 0*

*runAsNonRoot: false*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-nrf*

*version: "2.7.0"*

*nssf:*

*config:*

*scp:*

*enabled: true*

*nsiList:*

*- nrf:*

*hostname: ""*

*port: 7777*

*sst: 1*

*sd: "0x11111111"*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-nssf*

*version: "2.7.0"*

*pcf:*

*config:*

*scp:*

*enabled: true*

*mongodb:*

*enabled: false*

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*metrics:*

*enabled: true*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-pcf*

*version: "2.7.0"*

*udm:*

*config:*

*scp:*

*enabled: true*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-udm*

*version: "2.7.0"*

*udr:*

*config:*

*scp:*

*enabled: true*

*mongodb:*

*enabled: false*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-udr*

*version: "2.7.0"*

*scp:*

*mongodb:*

*enabled: false*

*containerSecurityContext:*

*runAsUser: 0*

*runAsNonRoot: false*

*commonLabels:*

*app: open5gs-model-d-scp*

*version: "2.7.0"*

### 6.3.2 Εγκατάσταση UERANSIM

Αντίστοιχα, για την εγκατάσταση του UERANSIM, γίνεται χρήση του Gradiant ueransim-gnb helm chart [57], σε συνδυασμό με την εισαγωγή παραμετροποιήσεων μέσω των αρχείων helm values, ένα για το Pod του σταθμού βάσης gNB και ένα για το Pod των τερματικών UE. Για τα τερματικά UE τοποθετούνται πληροφορίες όπως το IMSI των συνδρομητών, το όνομα DNN για την συνεδρία PDU στο αντίστοιχο network slice καθώς και το μυστικό κλειδί K που βρίσκεται στην κάρτα USIM, ενώ για το σταθμό

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5ης γενιάς

βάσης gNB οι τιμές αφορούν το network slice στο οποίο ανήκει, την τιμή TAC, το PLMN καθώς και την διεύθυνση της διεπαφής NG-C.

Το αρχείο helm values για τα τερματικά UE είναι το εξής:

```
kubeVersion: ""
nameOverride: ""
fullnameOverride: ""
commonLabels: {}
commonAnnotations: {}
clusterDomain: cluster.local
extraDeploy: []

image:
  registry: docker.io
  repository: gradient/ueransim
  tag: 3.2.6
  pullPolicy: Always
  pullSecrets: []
  debug: false

name: ueransim-ues

count: 1
initialMSISDN: '0000000001'
mcc: '999'
mnc: '70'
key: 465B5CE8B199B49FAA5F0A2EE238A6BC
op: E8ED289DEBA952E4283B54E88E6183CA
opType: OPC
gnb:
  hostname: ueransim-gnb
sst: 1
sd: "0x111111"
apnList:
  - type: 'IPv4'
    apn: 'internet'
  slice:
```

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*sst: 1*

*sd: "0x111111"*

*emergency: **false***

*command: []*

*args: []*

*resources:*

*limits: {}*

*requests: {}*

*podSecurityContext:*

*enabled: **false***

*containerSecurityContext:*

*enabled: **false***

*podLabels:*

*app: ueransim-ues*

*version: "3.2.6"*

*podAnnotations: {}*

*affinity: {}*

*nodeSelector: {}*

*tolerations: []*

Το αρχείο helm values για τον σταθμό βάσης gNB είναι το κάτωθι:

*global:*

*imageRegistry: ""*

*imagePullSecrets: []*

*storageClass: ""*

*kubeVersion: ""*

*nameOverride: ""*

*fullnameOverride: ""*

*commonLabels: {}*

*commonAnnotations: {}*

*clusterDomain: cluster.local*

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*extraDeploy*: []

*image*:

*registry*: *docker.io*

*repository*: *gradiant/ueransim*

*tag*: *3.2.6*

*pullPolicy*: *Always*

*pullSecrets*: []

*debug*: **false**

*name*: *ueransim-gnb*

*amf*:

*ip*: ""

*hostname*: *open5gs-amf-ngap*

*interfaces*:

*n2*:

*dev*: *eth0*

*n3*:

*dev*: *eth0*

*radio*:

*dev*: *eth0*

*mcc*: '999'

*mnc*: '70'

*sst*: 1

*sd*: "0x111111"

*tac*: '0001'

*resources*:

*limits*: {}

*requests*: {}

*podSecurityContext*:

*enabled*: **false**

*containerSecurityContext*:

*enabled*: **false**

*podLabels*:

*app*: *ueransim-gnb*



*version: "3.2.6"*

*podAnnotations: {}*

*affinity: {}*

*nodeSelector: {}*

*tolerations: []*

*ues:*

*enabled: false*

### 6.3.3 Εκκίνηση διάταξης δοκιμών

Με την χρήση της εντολής του helm install, και τα προαναφερθέντα Gradiant 5G chart και των προαναφερθέντων αρχείων helm values, έγινε εκκίνηση του open5GS και του UERANSIM στο Kubernetes cluster, όπως φαίνεται και παρακάτω:

NAME	READY	STATUS	RESTARTS	AGE
open5gs-amf-7bfbf6bc5d-bfd7s	2/2	Running	0	6d6h
open5gs-ausf-667d588c6c-w26w1	2/2	Running	0	6d7h
open5gs-bsf-7fd9f57fdf-2dh5m	2/2	Running	0	11d
open5gs-mongodb-d67867dff-8mgqj	3/3	Running	0	23d
open5gs-nrf-54cb864456-2n74v	2/2	Running	1 (6d8h ago)	23d
open5gs-nssf-54c995d8d6-fgr8h	2/2	Running	0	23d
open5gs-pcf-658dc46967-717d7	2/2	Running	1 (11d ago)	11d
open5gs-populate-6499ff8887-1h9cm	2/2	Running	0	23d
open5gs-scp-b4d4478fc-x98w2	2/2	Running	0	6d6h
open5gs-smf-7d5787cd59-fqjrh	2/2	Running	0	11d
open5gs-udm-665568bd94-hdhmv	2/2	Running	0	11d
open5gs-udr-7cbb99bfb-4h7bd	2/2	Running	1 (11d ago)	11d
open5gs-upf-5b58d8875-ldqbl	2/2	Running	0	23d
open5gs-webui-5bc7946665-c6dcz	2/2	Running	0	23d
ueransim-gnb-77f879c747-rzwlq	2/2	Running	0	6d6h
ueransim-ues-544fddfc8c-r4wck	2/2	Running	0	6d6h

**Εικόνα 83: Τα Pods του open5GS και UERANSIM Kubernetes applications**

Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι το Open5GS, με βάση την υλοποίησή του, δεν χρησιμοποιεί την διαδικασία του Service Discovery, καθώς έχει μία ιδιαιτερότητα. Κάθε οντότητα NF μετά την εγγραφή του στη NRF μέσω της διαδικασίας του Service Registration, δημιουργεί μία συνδρομή μέσω της υπηρεσίας Nnrf\_NFManagement και της λειτουργίας NFStatusSubscribe όπου ζητάει να μάθει ένα συγκεκριμένο πλήθος και τύπο υπηρεσιών, μόλις αυτά εγγραφούν στη NRF. Η ολοκληρωμένη λίστα είναι η εξής:

**Πίνακας 5: Συνδρομές των οντοτήτων του Open5GS στη NRF**

NF (or network entity)	Subscribes for ...
AMF	SEPP, Nasuf-auth, Nudm-uecm, Nudm-sdm, Npcf-am-policy-control, Nsmf-pdusession, Nnssf-nselection
AUSF	SEPP, Nudm-ueae

BSF	SEPP
NSSF	SEPP
PCF	SEPP, Nbsf-management, Nudr-dr
SCP	SEPP, AMF, AUSF, BSF, NSSF, PCF, SMF, UDM, UDR
SMF	SEPP, Namf-comm, Npcf-smpolicycontrol, Nudm-sdm, Nudm-uecm
UDM	SEPP, Nudr-dr
UDR	SEPP

Συνεπώς, η AMF έχει γνώση της οντότητας NF με την οποία θα επικοινωνήσει με το που εκκινήσουν οι οντότητες NF και στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι διαδικασίες Service Discovery και Service Selection δεν πραγματοποιούνται. Δυστυχώς, η αλλαγή αυτής της συμπεριφοράς των οντοτήτων NF του open5GS δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ρυθμίσεων στο επίπεδο του open5GS, συνεπώς, θα χρησιμοποιήσουμε την δυνατότητα αλλαγής της σηματοδοσίας στο 5GC μέσω των δυνατοτήτων του καταναεμημένου SCP που μας παρέχει το Istio service mesh. Εκτός από το γεγονός ότι μας παρέχει την δυνατότητα να κάνουμε μία αλλαγή στην σηματοδοσία που είναι ανέφικτη να γίνει με άλλον τρόπο, θα αναδειχθεί επίσης η ευκολία και η ταχύτητα με την οποία θα πραγματοποιηθεί. Πιο συγκεκριμένα, θα αποκόψουμε τα αιτήματα προς την υπηρεσία Nnrf\_NFManagement της NRF:

- Από το SCP Pod
- Από οποιοδήποτε Pod, το οποίο σημαίνει επί της ουσίας από οποιοδήποτε οντότητα NF

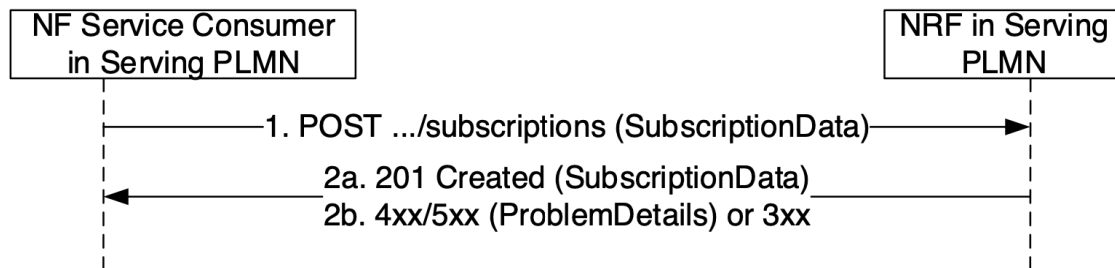
Οι αλλαγές αυτές πραγματοποιούνται μέσω αρχείων ρυθμίσεων YAML. Πιο συγκεκριμένα θα αξιοποιήσουμε τους ορισμούς virtual services και destination rules. Το virtual service μας επιτρέπει να ρυθμίσουμε τον τρόπο με τον οποίο τα αιτήματα δρομολογούνται στο service mesh. Πρακτικά, ένα virtual service αποτελείται από ένα ή παραπάνω κανόνες δρομολόγησης, οι οποίοι χρησιμοποιούνται με την σειρά για να βρεθεί ο κατάλληλος κανόνας δρομολόγησης ανάλογα τον προορισμό του αιτήματος και εν συνεχεία να χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο destination rule. Από την άλλη, τα destination rules καθορίζουν τι θα συμβεί με την κίνηση για τον συγκεκριμένο προορισμό. Τα destination rules εφαρμόζονται μετά τους κανόνες δρομολόγησης των virtual services, συνεπώς ενασχολούνται με τον «πραγματικό» προορισμό του αιτήματος.

Πιο αναλυτικά, θα χρησιμοποιήσουμε την δυνατότητα Fault Injection με HTTP abort fault type. Δηλαδή, θα απαντήσουμε στο αίτημα με ένα προσαρμοσμένο αριθμό HTTP σφάλματος, και συγκεκριμένα το 500. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή την τιμή είναι για να τηρήσουμε τα τις προδιαγραφές, και πιο συγκεκριμένα το 3GPP TS 29.510 [58], το οποίο αναφέρει ότι:

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

- If the creation of the subscription fails at the NRF due to NRF internal errors, the NRF shall return "500 Internal Server Error" status code with the ProblemDetails IE providing details of the error.

**Εικόνα 84: Περιγραφή HTTP 500 από το τεχνικό έγγραφο 3GPP TS 29.510**



**Εικόνα 85: Λειτουργία NFStatusSubscribe της υπηρεσίας Nnrf\_NFManagement**

Με αυτόν τον τρόπο θα πραγματοποιήσουμε την αλλαγή στην σηματοδότηση του 5GC που θέλουμε, το οποίο θα οδηγήσει ουσιαστικά κάθε οντότητα NF να μην γνωρίζει εκ των προτέρων τον Service Producer, και έτσι θα στέλνει στο SCP τις απαραίτητες παραμέτρους μέσω των επικεφαλίδων HTTP στο αίτημα του Service Request, για την πραγματοποίηση της λειτουργίας Service Discovery στο SCP, και πιο συγκεκριμένα στο SCP Pod.

### 6.3.4 Αποκοπή συγκεκριμένης κίνησης από το SCP Pod προς τη NRF

Για την αποκοπή της κίνησης προς το Nnrf\_NFManagement service του NRF, μόνο για όσα αιτήματα προέρχονται από το SCP Pod θα φτιάξουμε αρχικά το εξής αρχείο YAML destination rule:

```
apiVersion: networking.istio.io/v1
kind: DestinationRule
metadata:
  name: nrf-sbi
spec:
  host: open5gs-nrf-sbi
  trafficPolicy:
    loadBalancer:
      simple: PASSTHROUGH
```

Εν συνεχεία, δημιουργούμε το αρχείο YAML virtual service ως εξής:

```
apiVersion: networking.istio.io/v1alpha3
kind: VirtualService
metadata:
  name: nrf-sbi
spec:
```

```
hosts:
- open5gs-nrf-sbi
http:
  # block all Nnrf_NFManagement_NFStatusSubscribe requests
- match:
  - headers: {}
  method:
    exact: "POST"
  uri:
    prefix: "/nnrf-nfm/v1/subscriptions"
  ignoreUriCase: true
  scheme:
    exact: "http"
  fault:
    abort:
      percentage:
        value: 100.0
      httpStatus: 500
  route:
  - destination:
      host: open5gs-nrf-sbi

# default "no condition" rule to ensure that traffic to the virtual service always has
# at least one matching route
- route:
  - destination:
      host: open5gs-nrf-sbi
```

Ουσιαστικά ορίζουμε ότι στο 100% των αιτημάτων τύπου HTTP POST με προορισμό την υπηρεσία *open5gs-nrf-sbi*, θα απαντήσουμε με HTTP 500 Internal Error. Τέλος εφαρμόζουμε τα παραπάνω αρχεία στο Kubernetes cluster.

### 6.3.5 Αποκοπή συγκεκριμένης κίνησης από οποιοδήποτε NF προς τη NRF

Για την αποκοπή της κίνησης προς το *Nnrf\_NFManagement* service του NRF, για όλα τα αιτήματα στο service mesh του 5GC, θα φτιάξουμε αρχικά το εξής αρχείο YAML destination rule:

```
apiVersion: networking.istio.io/v1
```

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

*kind: DestinationRule*

*metadata:*

*name: scp-sbi*

*spec:*

*host: open5gs-scp-sbi*

*trafficPolicy:*

*loadBalancer:*

*simple: PASSTHROUGH*

Εν συνεχεία, δημιουργούμε το αρχείο YAML virtual service ως εξής:

*apiVersion: networking.istio.io/v1alpha3*

*kind: VirtualService*

*metadata:*

*name: scp-sbi*

*spec:*

*hosts:*

*- open5gs-scp-sbi*

*http:*

*# block all Nnrf\_NFManagement\_NFStatusSubscribe requests*

*- match:*

*- headers: {}*

*method:*

*exact: "POST"*

*uri:*

*prefix: "/nnrf-nfm/v1/subscriptions"*

*ignoreUriCase: true*

*scheme:*

*exact: "http"*

*fault:*

*abort:*

*percentage:*

*value: 100.0*

*httpStatus: 500*

*route:*

*- destination:*

*host: open5gs-scp-sbi*

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5G

```
# default "no condition" rule to ensure that traffic to the virtual service always has  
# at least one matching route
```

```
- route:
```

```
- destination:
```

```
  host: open5gs-scp-sbi
```

Ουσιαστικά ορίζουμε ότι στο 100% των αιτημάτων τύπου HTTP POST με προορισμό την υπηρεσία *open5gs-scp-sbi*, θα απαντήσουμε με HTTP 500 Internal Error. Τέλος εφαρμόζουμε τα παραπάνω αρχεία στο Kubernetes cluster.

## 6.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Μαζί με την εκκίνηση της διάταξης δοκιμών, έχουμε και την σύνδεση του μοναδικού ορισμένου συνδρομητή στο δίκτυο 5G. Πιο αναλυτικά, έχουμε την δημιουργία μίας σύνδεσης RRC μεταξύ του Pod των τερματικών UE και του Pod του σταθμού βάσης gNB, μέσω του επιπέδου RRC όπως φαίνεται και παρακάτω και βλέπουμε ότι το μήνυμα RRC Setup Complete εμπεριέχει το μήνυμα NAS Registration request με το οποίο ξεκινάει την διαδικασία NAS 5GMM Registration.

NR RRC	158	SIB1
NR RRC	76	RRC Setup Request
NR RRC	75	RRC Setup
NR RRC/NA...	99	RRC Setup Complete, Registration request
NR RRC/NA...	115	DL Information Transfer, Authentication request
NR RRC/NA...	94	UL Information Transfer, Authentication response
NR RRC/NA...	94	DL Information Transfer, Security mode command
NR RRC/NA...	136	UL Information Transfer, Security mode complete.

Εικόνα 86: Σύνδεση RRC μεταξύ τερματικού UE και σταθμού βάσης

Εν συνεχεία βλέπουμε ότι το μήνυμα NAS Registration request προωθείται από το σταθμό βάσης gNB προς την οντότητα AMF μέσω του πρωτοκόλλου NGAP όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

10.244.2.16	HTTP2	104	HEADERS[187]: 204 No Content
10.244.2.16	NGAP/NAS...	140	InitialUEMessage, Registration request
127.0.0.1	HTTP2	239 AMF	open5gs-scp-sbi:7777 HEADERS[189]: POST /nausf-auth/v1/ue-authentications
127.0.0.1	HTTP2/JSON	183	DATA[189], JSON (application/json)
10.244.2.16	HTTP2/JSON	513	HEADERS[189]: 201 Created, DATA[189], JSON (application/3gpp-h+xml)
10.244.2.18	NGAP/NAS...	148	SACK (Ack=1, Arwnd=106496), DownlinkNASTransport, Authentication request
10.244.2.16	NGAP/NAS...	148	SACK (Ack=1, Arwnd=106496), UplinkNASTransport, Authentication response
127.0.0.1	HTTP2	222 AMF	open5gs-scp-sbi:7777 HEADERS[191]: PUT /nausf-auth/v1/ue-authentications/1/5g-aka-confirmation
127.0.0.1	HTTP2/JSON	123	DATA[191], JSON (application/json)
10.244.2.16	HTTP2/JSON	257	HEADERS[191]: 200 OK, DATA[191], JSON (application/json)

Εικόνα 87: Διαδικασία NAS Registration από την οπτική του 5GC

Εν συνεχεία, η AMF εκκινεί την διαδικασία της επαλήθευσης της ταυτότητας του συνδρομητή και της δημιουργίας των κρυπτογραφικών κλειδιών για την κρυπτογράφηση και την ακεραιότητα των δεδομένων. Επικοινωνεί με τη AUSF μέσω της υπηρεσίας Nausf-auth, δηλαδή η AMF είναι ο Service Consumer και η AUSF ο Service Producer.

Το γεγονός ότι η AMF γνωρίζει εκ των προτέρων την AUSF και δεν εκκινεί την διαδικασία Service Discovery με την NRF, επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι στέλνει το αίτημα για τη AUSF προς το SCP Pod υποδεικνύοντας ρητά την οντότητα της AUSF, μέσω της επικεφαλίδας 3gpp-sbi-target-apiroot HTTP.

Καταμεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5G γενιάς

```
Header: 3gpp-sbi-target-apiroot: http://10.244.2.154:7777
  Name Length: 23
  Name: 3gpp-sbi-target-apiroot
  Value Length: 24
  Value: http://10.244.2.154:7777
  [Unescaped: http://10.244.2.154:7777]
  Representation: Literal Header Field with Incremental Indexing - New Name
```

**Εικόνα 88: Επιλογή της AUSF μέσω επικεφαλίδας 3gpp-sbi-target-apiroot HTTP**

Εν συνεχεία, η AUSF επικοινωνεί με την UDM, η οποία επικοινωνεί με την οντότητα UDR για την δημιουργία του 5G Authentication Vector.

```
user-agent :authority          :Info
AMF        open5gs-scp-sbi:7777  HEADERS[2585]: POST /nausf-auth/v1/ue-authentications, DATA[2585], JSON (application/json)
AMF        10.244.2.154:7777      Magic, SETTINGS[0], WINDOW_UPDATE[0], HEADERS[1]: POST /nausf-auth/v1/ue-authentications, DATA[1], JSON (application/json)
AUSF      open5gs-scp-sbi:7777  HEADERS[4153]: POST /nudm-ueau/v1/suci-0-999-70-0000-0-0-0000000001/security-information/generate-auth-data, DATA[4153], JSON (appl
AUSF      10.244.1.134:7777      Magic, SETTINGS[0], WINDOW_UPDATE[0], HEADERS[1]: POST /nudm-ueau/v1/suci-0-999-70-0000-0-0-0000000001/security-information/generat
UDM        open5gs-scp-sbi:7777  HEADERS[4155]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-9997000000000001/authentication-data/authentication-subscription
SCP        open5gs-nrf-sbi:7777  HEADERS[7503]: GET /nnrf-disc/v1/nf-instances?requester-features=206requester-nf-type=UDM&service-names=nudr-dr&target-nf-type=UDR
UDM        10.244.2.156:7777      HEADERS[7503]: 200 OK, DATA[7503], JSON (application/json)
UDM        Magic, SETTINGS[0], WINDOW_UPDATE[0], HEADERS[1]: GET /nudr-dr/v1/subscription-data/imsi-9997000000000001/authentication-data/authen
UDM        HEADERS[1]: 200 OK, DATA[1], JSON (application/json)
UDM        HEADERS[1]: 200 OK, DATA[1], JSON (application/json)
UDM        HEADERS[1]: 201 Created, DATA[1], JSON (application/3gpphttp+json)
```

**Εικόνα 89: Μεταφορά του 5G Authentication Vector μέσα στο 5GC**

Στην συνέχεια, η AMF, αφού έχει λάβει από την AUSF το 5G Authentication Vector και το είδος του τύπου της διαδικασίας ταυτοποίησης, που στην περίπτωση μας είναι 5G\_AKA, ξεκινάει η διαδικασία NAS Authentication με το τερματικό UE, στέλλοντας τις τιμές RAND και AUTN. Το τερματικό UE απαντάει με την τιμή RES, η οποία χρησιμοποιείται από την AMF για να επιτύχει την ταυτοποίηση του συνδρομητή και, εν συνεχεία, ενημερώνει την AUSF για το αποτέλεσμα. Η AUSF οφείλει να επιβεβαιώσει και αυτή με την σειρά της την ταυτοποίηση του συνδρομητή. Μετά από αυτή την διαδικασία, η AUSF στέλνει το IMSI του συνδρομητή, δηλαδή το SUPI, μαζί με το κρυπτογραφικό κλειδί  $K_{seaf}$ .

```
SACK (Ack=1, Arwnd=106496) , DownlinkNASTransport, Authentication request
SACK (Ack=1, Arwnd=106496) , UplinkNASTransport, Authentication response
HEADERS[191]: PUT /nausf-auth/v1/ue-authentications/1/5g-aka-confirmation
DATA[191], JSON (application/json)
HEADERS[191]: 200 OK, DATA[191], JSON (application/json)
```

**Εικόνα 90: Διαδικασία NAS Authentication και ενημέρωση της AUSF**

```
Object
  Member: authResult
    [Path with value: /authResult:AUTHENTICATION_SUCCESS]
    [Member with value: authResult:AUTHENTICATION_SUCCESS]
    String value: AUTHENTICATION_SUCCESS
    Key: authResult
    [Path: /authResult]
  Member: supi
    [Path with value: /supi:imsi-9997000000000001]
    [Member with value: supi:imsi-9997000000000001]
    String value: imsi-9997000000000001
    Key: supi
    [Path: /supi]
  Member: kseaf
    [Path with value: /kseaf:dee13bb39b3d4b1352cf4bd1a91e2e57df2a8ba6d75a747981854cb721d53f2c]
    [Member with value: kseaf:dee13bb39b3d4b1352cf4bd1a91e2e57df2a8ba6d75a747981854cb721d53f2c]
    String value: dee13bb39b3d4b1352cf4bd1a91e2e57df2a8ba6d75a747981854cb721d53f2c
    Key: kseaf
```

**Εικόνα 91: Επιτυχής ενημέρωση από τη AMF για την ταυτοποίηση του συνδρομητή**

Εν συνεχεία, η διαδικασία NAS Security mode control ξεκινάει για την ενεργοποίηση της κρυπτογράφησης και έλεγχο ακεραιότητας στο επίπεδο NAS.

```
SACK (Ack=2, Arwnd=106496) , DownlinkNASTransport, Security mode command  
SACK (Ack=2, Arwnd=106496) , UplinkNASTransport, Security mode complete, Registration request
```

### Εικόνα 92: Διαδικασία NAS Security mode control

Ακολουθεί η επικοινωνία και εγγραφή με την UDM και οι διαδικασίες για την ανάκτηση των στοιχείων και πληροφοριών του συνδρομητή και τέλος, ολοκληρώνεται η διαδικασία του NAS Registration.

```
HEADERS[193]: PUT /nudm-uecm/v1/imsi-99970000000001/registrations/amf-3gpp-access  
DATA[193], JSON (application/json)  
HEADERS[193]: 201 Created, DATA[193], JSON (application/json)  
HEADERS[195]: GET /nudm-sdm/v2/imsi-99970000000001/am-data  
HEADERS[195]: 200 OK, DATA[195], JSON (application/json)  
HEADERS[197]: GET /nudm-sdm/v2/imsi-99970000000001/smf-select-data  
HEADERS[197]: 200 OK, DATA[197], JSON (application/json)  
HEADERS[199]: GET /nudm-sdm/v2/imsi-99970000000001/ue-context-in-smf-data  
HEADERS[199]: 200 OK, DATA[199], JSON (application/json)  
HEADERS[201]: POST /nudm-sdm/v2/imsi-99970000000001/sdm-subscriptions  
DATA[201], JSON (application/json)  
HEADERS[201]: 201 Created, DATA[201], JSON (application/json)  
HEADERS[203]: POST /npcf-am-policy-control/v1/policies  
DATA[203], JSON (application/json)  
HEADERS[203]: 201 Created, DATA[203], JSON (application/json)
```

### Εικόνα 93: Επικοινωνία μεταξύ της AMF και της UDM

```
SACK (Ack=3, Arwnd=106496) , InitialContextSetupRequest, Registration accept  
SACK (Ack=3, Arwnd=106496) , InitialContextSetupResponse  
SACK (Ack=4, Arwnd=106496)  
UplinkNASTransport, Registration complete, UplinkNASTransport, UL NAS transport,
```

### Εικόνα 94: Ολοκλήρωση διαδικασίας NAS registration με το 5GC



Κατανομημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

```

  ▾ Non-Access-Stratum 5GS (NAS)PDU
    > Security protected NAS 5GS message
    ▾ Plain NAS 5GS Message
      Extended protocol discriminator: 5G mobility management messages (126)
      0000 .... = Spare Half Octet: 0
      .... 0000 = Security header type: Plain NAS message, not security protected (0)
      Message type: UL NAS transport (0x67)
      0000 .... = Spare Half Octet: 0
    ▾ Payload container type
      .... 0001 = Payload container type: N1 SM information (1)
    ▾ Payload container
      Length: 21
    ▾ Plain NAS 5GS Message
      Extended protocol discriminator: 5G session management messages (46)
      PDU session identity: PDU session identity value 1 (1)
      Procedure transaction identity: 1
      Message type: PDU session establishment request (0xc1)
    > Integrity protection maximum data rate
    > PDU session type
    > SSC mode
    > 5GSM capability
    > Extended protocol configuration options
    > PDU session identity 2 - PDU session ID
    > Request type
    > S-NSSAI
    ▾ DNN
      Element ID: 0x25
      Length: 9
      DNN: internet

```

### Εικόνα 95: Εκκίνηση από το τερματικό UE για την ενεργοποίηση της συνεδρίας PDU

Το επόμενο βήμα είναι η ενεργοποίηση της συνεδρίας του συνδρομητή και για αυτό τον σκοπό η AMF επικοινωνεί με την SMF, που είναι ο Service Producer σε αυτή την περίπτωση.

```

HEADERS [207]: POST /nsmf-pdusession/v1/sm-contexts
DATA [207], JSON (application/json), PDU session establishment request
HEADERS [207]: 201 Created, DATA [207], JSON (application/json)

```

### Εικόνα 96: Επικοινωνία μεταξύ της AMF και της SMF

Στην συνέχεια οι ρόλοι εναλλάσσονται και η AMF μετατρέπεται στον Service Producer και η SMF στον Service Consumer, για να στείλει τα μηνύματα προς το δίκτυο πρόσβασης NG-RAN και το τερματικό UE αντίστοιχα και για αυτό η διαδικασία ονομάζεται n1-n2-messages.

```

POST /namf-comm/v1/ue-contexts/imsi-99970000000001/n1-n2-messages, DATA [1], JSON (application/json),

```

### Εικόνα 97: Η SMF στέλνει τα μηνύματα N1 N2 προς την AMF

Τα μηνύματα μεταφέρονται από την AMF προς το δίκτυο πρόσβασης μέσω του επιπέδου NGAP και προς το τερματικό UE μέσω της σηματοδότησης του επιπέδου NAS όπως φαίνονται στην επόμενη εικόνα:

Κατανοημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

```
PDUSessionResourceSetupRequest, DL NAS transport, PDU session establishment accept
SACK (Ack=5, Arwnd=106311)
HEADERS[1]: 200 OK
DATA[1], JSON (application/json)
PDUSessionResourceSetupResponse
HEADERS[209]: POST /nsmf-pdusession/v1/sm-contexts/1/modify
DATA[209], JSON (application/json)
HEADERS[1]: 200 OK, DATA[1], JSON (application/json)
HEADERS[209]: 204 No Content
```

**Εικόνα 98: Μεταφορά μηνυμάτων από τη SMF διαμέσου της AMF προς N1 και N2**

Παρατηρώντας την αποκοπή της κίνησης στο SCP Pod, παρατηρούμε και βλέπουμε το fault injection που εισήγαμε με το service mesh που εφαρμόζει τις δυνατότητες του SCP:

user-agent	:authority	Info
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700079]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700079], JSON (application/json)
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700081]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700081], JSON (application/json)
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700083]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700083], JSON (application/json)
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700085]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700085], JSON (application/json)
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700087]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700087], JSON (application/json)
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700089]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700089], JSON (application/json)
AMF	open5gs-nrf-sbi:7777	HEADERS[1700091]: POST /nrf-nfm/v1/subscriptions DATA[1700091], JSON (application/json) HEADERS[566903]: 500 Internal Server Error DATA[566903] (text/plain) HEADERS[566905]: 500 Internal Server Error DATA[566905] (text/plain) HEADERS[566907]: 500 Internal Server Error DATA[566907] (text/plain) HEADERS[566909]: 500 Internal Server Error DATA[566909] (text/plain) HEADERS[566911]: 500 Internal Server Error DATA[566911] (text/plain) HEADERS[566913]: 500 Internal Server Error DATA[566913] (text/plain) HEADERS[566915]: 500 Internal Server Error, DATA[566915] (text/plain)

**Εικόνα 99: Fault injection όπως παρατηρήθηκε στο Wireshark**

Αν αποκόψουμε την κίνηση από το κάθε οντότητα NF, τότε παρατηρούμε την ίδια συμπεριφορά σε όλες τις οντότητες και το μήνυμα δεν έχει φθάσει ούτε μέχρι το SCP Pod. Παρατηρώντας τα καταγραφικά του open5GS στην οντότητα AMF, επιβεβαιώνουμε ότι λάβαμε το HTTP 500.

Καταμεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 5G γενιάς

```
10/18 12:01:59.775: [app] INFO: Configuration: '/opt/open5gs/etc/open5gs/amf.yaml' (./lib/app/ogs-init.c:130)
10/18 12:01:59.781: [metrics] INFO: metrics_server() [http://10.244.1.11]:9090 (./lib/metrics/prometheus/context.c:299)
10/18 12:01:59.781: [sbi] INFO: NF Service [namf-comm] (./lib/sbi/context.c:1812)
10/18 12:01:59.782: [sbi] INFO: nghttp2_server() [http://10.244.1.11]:7777 (./lib/sbi/nghttp2-server.c:414)
10/18 12:01:59.782: [amf] INFO: ngap_server() [10.244.1.11]:38412 (./src/amf/ngap-sctp.c:61)
10/18 12:01:59.782: [sctp] INFO: AMF initialize...done (./src/amf/app.c:33)
10/18 12:01:59.784: [sbi] WARNING: [7] Failed to connect to open5gs-scp-sbi port 7777: Connection refused (./lib/sbi/client.c:698)
10/18 12:01:59.784: [sbi] WARNING: ogs_sbi_client_handler() failed [-1] (./lib/sbi/path.c:62)
10/18 12:02:10.782: [sbi] WARNING: [c79b8212-8d48-41ef-a155-eb1d704ffe98] Retry registration with NRF (./lib/sbi/nf-sm.c:182)
10/18 12:02:10.793: [sbi] INFO: [c79b8212-8d48-41ef-a155-eb1d704ffe98] NF registered [Heartbeat:10s] (./lib/sbi/nf-sm.c:221)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: JSON parse error [fault filter abort] (./lib/sbi/message.c:1373)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: parse_content() failed (./lib/sbi/message.c:1006)
10/18 12:02:10.804: [amf] ERROR: cannot parse HTTP response (./src/amf/amf-sm.c:255)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: JSON parse error [fault filter abort] (./lib/sbi/message.c:1373)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: parse_content() failed (./lib/sbi/message.c:1006)
10/18 12:02:10.804: [amf] ERROR: cannot parse HTTP response (./src/amf/amf-sm.c:255)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: JSON parse error [fault filter abort] (./lib/sbi/message.c:1373)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: parse_content() failed (./lib/sbi/message.c:1006)
10/18 12:02:10.804: [amf] ERROR: cannot parse HTTP response (./src/amf/amf-sm.c:255)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: JSON parse error [fault filter abort] (./lib/sbi/message.c:1373)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: parse_content() failed (./lib/sbi/message.c:1006)
10/18 12:02:10.804: [amf] ERROR: cannot parse HTTP response (./src/amf/amf-sm.c:255)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: JSON parse error [fault filter abort] (./lib/sbi/message.c:1373)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: parse_content() failed (./lib/sbi/message.c:1006)
10/18 12:02:10.804: [amf] ERROR: cannot parse HTTP response (./src/amf/amf-sm.c:255)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: JSON parse error [fault filter abort] (./lib/sbi/message.c:1373)
10/18 12:02:10.804: [sbi] ERROR: parse_content() failed (./lib/sbi/message.c:1006)
10/18 12:02:10.804: [amf] ERROR: cannot parse HTTP response (./src/amf/amf-sm.c:255)
```

### Εικόνα 100: Έλεγχος αποκοπής κίνησης από το καταγραφικό του AMF Pod

Εστιάζοντας στο σενάριο του συνδρομητή για άλλη μία φορά και ελέγχοντας την λειτουργία του open5GS μετά την αλλαγή της σηματοδότησης στο 5GC μέσω του καταμεμημένου SCP με το Istio service mesh, παρατηρούμε ότι το SCP εκκινεί την διαδικασία του Service Discovery για την υπηρεσία Nausf-auth προς όφελος της AMF, ενώ προηγουμένως η AMF υποδείκνυε την AUSF μέσω της επικεφαλίδας 3gpp-sbi-target-apiroot.

```
Length: 123
Type: HEADERS (1)
Flags: 0x05, End Headers, End Stream
0... .. = Reserved: 0x0
.000 0000 0001 1100 0101 1111 1010 1001 = Stream Identifier: 1859497
[Pad Length: 0]
Header Block Fragment [truncated]: 8204d362aaac95690c8231dc2c552ac6a9091d442a3fcb0bdad2a125b1694a34db61510081f1617b5a5424b62d54ab27d56:
[Header Length: 363]
[Header Count: 8]
Header: :method: GET
Header: :path: /nrf-disc/v1/nf--instances?requester--features=20&requester--nf--type=AMF&service--names=nausf-auth&target--nf--type=AUSF
Header: :scheme: http
Header: :authority: open5gs-nrf-sbi:7777
Header: user-agent: SCP
Header: accept: application/json,application/problem+json
```

### Εικόνα 101: Διαδικασία Service Discovery από το SCP Pod

```
> Member: nfInstanceId
> Member: nfType
> Member: nfStatus
> Member: heartBeatTimer
> Member: plmnList
> Member: ipv4Addresses
> Member: allowedNfTypes
> Member: priority
> Member: capacity
> Member: load
> Member: nfServiceList
> Member: nfProfileChangesSupportInd
```

### Εικόνα 102: Απάντηση από τη NRF προς το SCP Pod

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας εξετάστηκαν οι κινητές δικτυακές τεχνολογίες από τη 0G μέχρι και σήμερα. Αρχικά έγινε αναφορά στα κυριότερα χαρακτηριστικά κάθε γενιάς κινητών δικτύων μέχρι και το δίκτυο 5G, καθώς και στα οριστικοποιημένα και μελλοντικά πλάνα για το σύστημα 5G-Advanced και την κατεύθυνση προς την έρευνα και ανάπτυξη του 6G.

Εν συνεχεία περιεγράφηκε ο τρόπος λειτουργίας του 5GC με την εισαγωγή της οριζόντιας αρχιτεκτονικής SBA, η οποία εφάρμοσε ουσιαστικά το μοντέλο επικοινωνίας Service Consumer και Service Producer, όπου πλέον κάθε αυτόνομη λειτουργική οντότητα NF του 5GC μπορεί να επικοινωνήσει με οποιοδήποτε άλλο. Αυτή η δυνατότητα επικοινωνίας από όλους προς όλους, προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το παρελθόν. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ταχύτερη εξέλιξη των χαρακτηριστικών λειτουργίας του ίδιου του δικτύου με την δυνατότητα χρήσης υπηρεσιών από άλλες οντότητες NF χωρίς την ρητή περιγραφή τους και ανάπτυξη μέσω συγκεκριμένων πρωτοκόλλων σημείου-προς-σημείου. Από την άλλη, αυτή η ευελιξία στην υλοποίηση της σηματοδosis στα πλαίσια του 5GC, έχει πρακτικά οδηγήσει σε εκθετική αύξηση της κίνησης και σε επιτακτική ανάγκη διαχείρισής της μέσω μηχανισμών δρομολόγησης, αυτόματης μεταγωγής σε εφεδρεία καθώς και παρατήρησης της κίνησης σε όλο το δίκτυο.

Για τους προαναφερθέντες λόγους, έχουν οριστεί διάφοροι τρόποι επικοινωνίας μεταξύ των οντοτήτων NF που ορίζονται από τις τεχνικές προδιαγραφές από την κοινοπραξία 3GPP. Πιο συγκεκριμένα, έχουν οριστεί δύο διαφορετικές κατευθύνσεις. Η πρώτη είναι η άμεση επικοινωνία όπου είναι ουσιαστικά η καταγραφή του τρέχοντος τρόπου σύνδεσης και ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ των διαφόρων οντοτήτων NF, χωρίς την δυνατότητα ελέγχου αυτής της σηματοδosis. Ο δεύτερος τρόπος είναι η έμμεση επικοινωνία, όπου παρεμβάλλεται η λογική οντότητα του SCP εξυπηρετητή, ως ένας πληρεξούσιος επικοινωνίας. Ουσιαστικά ορίζεται πλέον ένα πλαίσιο επικοινωνίας μεταξύ των οντοτήτων NF με το οποίο παρέχεται ένας ενοποιημένος τρόπος διαχείρισης της κίνησης μέσω δρομολόγησης, μηχανισμών κατανομής φόρτου, καθώς και δυνατότητα καθολικής παρατήρησης της κίνησης. Επιπρόσθετα, οι λειτουργίες του Service Discovery και Service Selection μέσω της NRF, οδηγούν σε μεγάλη κίνηση προς το βασικό NF repository, και είναι ένα σημαντικό σημείο για διαχείριση αυτής της σηματοδosis. Για αυτό τον λόγο έχει δοθεί η δυνατότητα της μεταφοράς αυτών των διαδικασιών από τις οντότητες NF προς το SCP, ο οποίος τις εκτελεί προς όφελος τους.

Αναλύοντας περαιτέρω τις δυνατότητες που παρέχει ένας SCP, πλέον είναι εφικτός ο διαχωρισμός του δικτύου σε συγκεκριμένα τμήματα, και παρέχεται η δυνατότητα απόκρυψης μέρους του δικτύου και της δομής του, καθώς και προστασία από signaling storms. Επιπρόσθετα, είναι εφικτή η εφαρμογή ασφάλειας για την επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων του 5GC. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα αλλαγής της σηματοδosis μεταξύ των οντοτήτων NF χωρίς να απαιτείται αλλαγή στο ίδιο το επίπεδο εφαρμογής των υπηρεσιών που υλοποιούν τη NF, για σκοπούς συμβατότητας μεταξύ διαφορετικών υλοποιήσεων.

Από την άλλη, το service mesh γενικά είναι ένα κατανεμημένο στρώμα επικοινωνίας το οποίο υλοποιείται με την χρήση sidecar proxies και την ύπαρξη ενός κεντρικού ελεγκτή για τον έλεγχο τους, ήτοι το επίπεδο ελέγχου. Ουσιαστικά, ο sidecar proxy εγκαθίσταται δίπλα σε κάθε υπηρεσία, και μέσω εντολών που λαμβάνει από το επίπεδο ελέγχου του service mesh υλοποιεί τις λειτουργίες της δρομολόγησης αιτημάτων, αυτόματης

μεταγωγής σε εφεδρεία, κατανομής φόρτου καθώς και καταγραφής και παρατήρησης της κίνησης.

Συνεπώς, οι δυνατότητες και λειτουργίες που παρέχει ένας SCP, είναι αρκετά παρεμφερή με το service mesh για την επικοινωνία μεταξύ υπηρεσιών. Δεδομένου ότι το 5GC βασίζεται στην αρχιτεκτονική cloud native και σε αποδόμηση του λογισμικού σε μικροπηρεσίες, η χρήση αυτού του network mesh για το 5GC θεωρείται επιβεβλημένη παρέχοντας πολλαπλά οφέλη. Ουσιαστικά, η λογική λειτουργία του SCP μπορεί να υλοποιηθεί είτε σε έναν κεντρικό κόμβο, είτε καταναεμημένα. Στην δεύτερη περίπτωση, όπου έχουμε το πλεονέκτημα της έλλειψης ενός κεντρικού σημείου αποτυχίας, το service mesh αποτελεί την βάση για την υλοποίηση του SCP. Καθώς όμως το SCP έχει λειτουργίες που είναι συγκεκριμένες για το ίδιο το 5GC, το service mesh πρέπει να επεκταθεί καταλλήλως και έτσι να είναι κατάλληλο να χρησιμοποιηθεί από τις οντότητες NF του 5GC. Επιπρόσθετα, ο καταναεμημένος SCP μπορεί να ελέγχει και την κίνηση μεταξύ των υπηρεσιών που απαρτίζουν μία λειτουργική οντότητα NF, εμβαθύνοντας συνεπώς πέρα από την κίνηση μεταξύ NF και στην κίνηση εσωτερικά της οντότητας NF.

Στο πρακτικό μέρος της εργασίας δημιουργήσαμε μία διάταξη δοκιμών ενός ολοκληρωμένου δικτύου 5G, με την εγκαθίδρυση του open5GS και του UERANSIM σε ένα Kubernetes cluster. Για την επέκταση της διάταξης με ένα στρώμα service mesh χρησιμοποιήθηκε το Istio. Το βασικό σενάριο προσομοίωσης περιλάμβανε την εγγραφή ενός συνδρομητή με το δίκτυο 5G και την ενεργοποίηση μίας συνεδρίας PDU για τα δεδομένα του χρήστη. Παρατηρώντας την σηματοδοσία στα πλαίσια του δικτύου 5G, θελήσαμε να εφαρμόσουμε αλλαγή της σηματοδοσίας όσον αφορά την ενημέρωση των οντοτήτων NF για την ύπαρξη άλλων NF μέσω της διαδικασίας Subscribe-Notify με την NRF. Η αδυναμία αλλαγής αυτής της συμπεριφοράς στο επίπεδο των ίδιων των οντοτήτων NF, δηλαδή μέσω ρυθμίσεων του open5GS, οδήγησε στην χρήση της λειτουργίας αλλαγής της σηματοδοσίας που μας παρέχει ο καταναεμημένος SCP μέσω service mesh στην διάταξή μας.

Πιο συγκεκριμένα, τροποποιήσαμε μέρος της λειτουργίας του open5GS αποκόπτοντας μία σηματοδοσία συγκεκριμένου τύπου, μέσω της δυνατότητας fault injection που μας παρέχει το Istio mesh network. Με αυτόν το κεντρικό και ομογενοποιημένο τρόπο αλλάξαμε την συμπεριφορά σε όλες τις οντότητες NF της διάταξης, μέσω αρχείων διαμόρφωσης YAML. Η ευκολία με την οποία επηρεάσαμε την σηματοδοσία στο 5GC και ο καθολικός αυτός τρόπος, αναδεικνύει ένα από τα οφέλη και τα πλεονεκτήματα του καταναεμημένου SCP μέσω service mesh.

Καταλήγοντας, η περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη προς την υλοποίηση του SCP βασίζοντάς το σε ένα service mesh είναι επιτακτική για το νέο δίκτυο κινητής 6G. Η αξιοποίηση των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων μέσω της καταναεμημένης διαχείρισης υποστηρικτικών υπηρεσιών προσφέρει πολύ καλύτερη επεκτασιμότητα δικτύου σε αυξημένο αριθμό συναλλαγών μεταξύ των υπηρεσιών του δικτύου. Με την εκθετική αύξηση της σηματοδοσίας που έχει παρατηρηθεί σε συνδυασμό με την αύξηση του πλήθους των συνδρομητών καθώς και την δημιουργία νέων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των οντοτήτων NF μέσω των νεότερων Release της κοινοπραξίας 3GPP, αναδεικνύεται η σημασία του ελέγχου και παρατήρησης της κίνησης.

Πέραν όμως από τις προαναφερθείσες δυνατότητες, η χρήση του καταναεμημένου SCP έχει αναδείξει νέες τάσεις και κατευθύνσεις, όπως για παράδειγμα η εφαρμογή ενός καταναεμημένου πλαισίου εξουσιοδότησης για network slices, ονομαζόμενο 5G-Wave, ή η υλοποίηση ενός runtime anomaly detector για τον έλεγχο κακόβουλης σηματοδοσίας τόσο από την πλευρά του τερματικού UE, όσο και από την πλευρά του δικτύου από άλλες οντότητες NF.

Η χρήση όμως του service mesh με την τεχνική του sidecar proxy, αυξάνει την καθυστέρηση στην επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων NF, καθώς κάθε sidecar proxy πρέπει να εγκλωβίσει την κίνηση από και προς την υπηρεσία στην οποία βρίσκεται δίπλα, και να εφαρμόσει τις πολιτικές του service mesh. Αυτός ο τρόπος χειρισμού της κίνησης με το sidecar proxy έχει κόστος και σε υπολογιστικούς πόρους, είτε επεξεργαστική είτε μνήμης. Για τον λόγο αυτό υπάρχει έρευνα για την αποφυγή αυτών των ανεπιθύμητων χαρακτηριστικών, μέσω της αντικατάστασης του sidecar με ένα ενσωματωμένο service mesh με την χρήση gRPC. Η χρήση του gRPC όμως προϋποθέτει αλλαγές στην ίδια την υλοποίηση της υπηρεσίας καθώς θα πρέπει να υποστηρίζεται εγγενώς από τις διεπαφές SBI οι οποίες είναι HTTP-based. Αυτό απαιτεί κατ' επέκταση να υποστηριχθεί από τις νέες προδιαγραφές του μελλοντικού 6G που θα εκδοθούν, και συνεπώς είναι ένα ανοιχτό ζήτημα για την βέλτιστη εφαρμογή του service mesh στα πλαίσια του δικτύου 6G.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
1 <sup>st</sup> Generation Networks	1η Γενιά Επικοινωνιών
2 <sup>nd</sup> Generation Networks	2η Γενιά Επικοινωνιών
3 <sup>rd</sup> Generation Networks	3η Γενιά Επικοινωνιών
4 <sup>th</sup> Generation Networks	4η Γενιά Επικοινωνιών
5 <sup>th</sup> Generation Networks	5η Γενιά Επικοινωνιών
6 <sup>th</sup> Generation Networks	6η Γενιά Επικοινωνιών
Artificial Intelligence	Τεχνητή Νοημοσύνη
Asynchronous Transfer Mode	Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς
Augmented Reality	Επαυξημένη Πραγματικότητα
Automation	Αυτοματισμός
Best Effort	Βέλτιστη Προσπάθεια
Bit	Δυφίο
Blade	Κάρτα
Bursty Traffic	Ριπαία Κίνηση
Business Logic	Επιχειρηματική Λογική
Cell Breathing	Αναπνοής Κυψέλης
Chip Sequence	Ακολουθία Μικροστοιχείων
Cloud	Νέφος
Cloud Native	Εγγενές στο νέφος
Cluster	Συστάδα
Container	Περιέκτης
Control Plane	Επίπεδο Ελέγχου
Core Network	Δίκτυο Πυρήνα
Decoder	Αποκωδικοευτής
Dedicated Infrastructure Layer	Στρώμα Αποκλειστικής Υποδομής
Delay	Καθυστέρηση
Direct Communication	Άμεσος Τρόπος Επικοινωνίας
Downlink	Καθοδική Ζεύξη
Electronically Erasable Programmable Read Only Memory	Ηλεκτρικά Εξαλείψιμη Προγραμματίσιμη Μνήμη Μόνο Ανάγνωσης
Emergency Call	Κλήση Έκτακτης Ανάγκης
Error Probability	Πιθανότητα Σφάλματος
Extended Reality	Εκτεταμένη Πραγματικότητα
Extensibility	Επεκτασιμότητα
Fixed Wireless Access	Σταθερή Ασυρματική Πρόσβαση
Flow	Ροή Δεδομένων
Frequency Division Duplex	Συχνοδιαιρετική Αμφίδρομη Επικοινωνία
Global	Καθολικό
Guaranteed Speed	Εγγυημένη Ταχύτητα
Handover	Μεταπομπή
Header Compression	Συμπύεση Κεφαλίδας
Home Network	Πάτριο Δίκτυο
Hot Swap	Θερμή Εναλλαγή
Immersive	Εμβυθιστικό
Indirect Communication	Έμμεσος Τρόπος Επικοινωνίας
Intelligent	Νοήμον

Κατανεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

Internet of Things	Διαδίκτυο των Αντικειμένων
Kilohertz	Κιλοχέρτζ
Lawful interception	Νόμιμη Υποκλοπή
Life Cycle Management	Διαχείριση του Κύκλου Ζωής
Load Balancing	Κατανομή Φόρτου
Machine Learning	Μηχανική Μάθηση
Machine-to-machine	Διαμηχανική Επικοινωνία
Maximum Speed	Μέγιστη Ταχύτητα
Megahertz	Μεγαχέρτζ
Micro Services	Μικρουπηρεσία
Microcontroller	Μικροελεγκτής
Modem	Διαποδιαμορφωτής
Multi-homing	Πολυεστίαση
Narrowband	Μικρό Εύρος Φάσματος
Near Far Effect	Επίδραση Κοντινής Μακρινής Απόστασης
Network Element	Παραδοσιακή Οντότητα
Network Function	Αυτόνομη Λειτουργική Οντότητα
Network Slice	Τμήμα Δικτύου
Observability	Παρατήρηση
Orchestration	Ενορχήστρωση
Orthogonal Frequency-Division Multiple Access	Πολλαπλή Πρόσβαση Ορθογωνικής Διάρθρωσης Συχνότητας
Packet Rate	Πακετορρυθμός
Paging	Τηλεειδοποίηση
Positioning Accuracy	Ακρίβεια Τοποθεσίας
Push-to-Talk	Σύστημα Διακόπτη Ομιλίας
Quality of Service	Ποιότητα Υπηρεσίας
Random Access Memory	Μνήμη Τυχαίας Προσπέλασης
Read Only Memory	Μνήμη Μόνο Ανάγνωσης
Release	Έκδοση
Request	Αίτημα
Resource	Πόρος
Response	Απάντηση
Roaming restrictions	Περιορισμός Περιαγωγής
Routing Priorities	Προτεραιότητα Δρομολόγησης
Scheduling	Χρονοπρογραμματισμός
Service	Υπηρεσία
Service Class	Κλάση Υπηρεσίας
Service Consumer	Καταναλωτής Υπηρεσίας
Service Mesh	Κατανεμημένη Διαχείριση Υποστηρικτικών Υπηρεσιών
Service Producer	Παραγωγός Υπηρεσίας
Signaling Storm	Καταιγίδα Σηματοδοσίας
Single Carrier FDMA	FDMA απλού φέροντος
Switching Center	Κέντρο Μεταγωγής
Time Division Duplex	Χρονοδιαιρετική Αμφίδρομη Επικοινωνία
Timeslot	Χρονοθυρίδα
Traffic Management	Διαχείριση Κίνησης Δικτύου
Ultra High Frequency	Πάρα Πολύ Υψηλή Συχνότητα



Κατανομημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

Uplink	Ανοδική Ζεύξη
Use Case	Περίπτωση Χρήσης
User Plane	Επίπεδο Χρήστη
Very High Frequency	Υπερβραχεία Κύματα
Virtual Reality	Εικονική Πραγματικότητα
Virtualization	Εικονικοποίηση
Visited Network	Δίκτυο Επίσκεψης
Zero Generation Networks	Γενιά 0 - Πρωτόλειο Σύστημα

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

0G	Zero Generation Networks
1G	1st Generation Networks
1xRTT	Single-Carrier Radio Transmission Technology
2G	2nd Generation Networks
3G	3rd Generation Networks
3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
4G	4th Generation Networks
5G	5th Generation Networks
5G NSA	5G non-standalone
5G SA	5G Standalone
5G-EIR	5G-Equipment Identity Register
5G-GUTI	5G Globally Unique Temporary UE Identity
5G-TMSI	5G Temporary Mobile Subscriber Identity
5GC	5G Core
5GIA	5G Infrastructure Association
5GMM	5GS Mobility Management
5GPPP	5G Public-Private Partnership
5GS	5G System
5GSM	5GS Session Management
64-QAM	64-Quadrature Amplitude Modulation
6G	6th Generation Networks
8-PSK	8 Phase-Shift Keying
ADRF	Analytics Data Repository Function
AF	Application Function
AI	Artificial Intelligence
AMF	Access and Mobility Management Function
AMPS	Advanced Mobile Phone System
AMR	Adaptive Multi-Rate
AMR-WB	Adaptive Multi-Rate Wideband
AMTS	Advanced Mobile Telephone System
APN	Access Point Name

Καταναεμημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

APN-AMBR	APN Aggregate Maximum Bitrate
AR	Augmented Reality
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARP	Allocation and Retention Priority
AS	Access Stratum
AT&T	American Telephone and Telegraph
ATCA	Advanced Telecommunications Computing Architecture
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AuC	Authentication Center
AUSF	Authentication Server Function
BICN	Bearer-Independent Core Network
BSC	Base Station Controller
BSS	Base-Station Subsystem
BSSGP	Base Station System GPRS Protocol
BTS	Base Transceiver Station
CC	Country Code
CCSA	China Communications Standards Association
CD	Check Digit
CDMA	Code-division multiple access
CHF	CHarging Function
CNF	Cloud native Network Function
Conntrack	Connection Tracking
CPP	Carrier Phase Positioning
CSD-GSM	Circuit Switched Data transmission over GSM
CSFB	CS Fallback
CSG	Closed Subscriber Group
CT	Core Network and Terminals
D-AMPS	Digital Advanced Mobile Phone System
DCCF	Data Collection Coordination Function
DEA	Diameter Edge Agent
DL	Downlink
DRA	Diameter Routing Agent

DynaTAC	Dynamic Adaptive Total Area Coverage
E-GPRS	Enhanced-GPRS
E-UTRAN	Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network
eBPF	Extended Berkeley Packet Filter
ECGI	E-UTRAN Cell Global Identifier
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
EFR	Enhanced Full Rate
EIR	Equipment Identity Register
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
eMBMS	evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service
EMM	EPS Mobility Management
EN-DC	E-UTRA NR Dual Connectivity
eNB	enhanced NodeB
eNodeB	enhanced NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ESM	EPS Session Management
ETSI	European Telecommunication Standards Institute
EUI-64	IEEE Extended Unique Identifier
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FR	Full Rate
FR1	Frequency range 1
FR2	Frequency range 2
FWA	Fixed Wireless Access
Gbps	Gigabit per Second
GBR	Guaranteed Bit Rate
GGSN	gateway GPRS support node
GMSK	Gaussian Minimum-Shift Keying
gNB-CU	gNB Central Unit
gNB-DU	gNB Distributed Unit
GPRS	General Packet Radio Service

GPSI	Generic Public Subscription Identifier
GRAN	GSM Radio Access Network
GRE	Generic Routing Encapsulation
GRN	GPRS Supporting Node
gRPC	gRPC Remote Procedure Calls
GSM	Global System for Mobile Communications
GTP	GPRS Tunnelling Protocol
GTP-C	GPRS tunnelling protocol control part
GTPv1-U	GPRS Tunnelling Protocol User Plane
GTPv2-C	GPRS tunnelling protocol control part v2
GUAMI	Globally Unique AMF Identifier
GUMMEI	Globally Unique MME Identifier
GUTI	Globally Unique Temporary Identity
HeNB	Home eNB
HLR	Home Location Register
HRT	Home Routed Traffic
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data
HSDPA	High-Speed Downlink Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSUPA	High-Speed Uplink Packet Access
I-SMF	Intermediate SMF
I-UPF	Intermediate UPF
ICT	European Information and Communication Technology
iDEN	integrated Dispatch Enhanced Network
IETF	Internet Engineering Task Force
IMEI	International Mobile Equipment Identity
IMEISV	International Mobile Station Equipment Identity and Software Version number
IMS	IP Multimedia Subsystem
IMSI	International Mobile Subscriber Identity
IMT-2000	International Mobile Telecommunications-2000
IMT-DS	IMT Direct Spread
IMT-FT	IMT Frequency Time

IMT-MC	IMT Multicarrier
IMT-SC	IMT Single Carrier
IMT-TC	IMT Time Code
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IS-95A	Interim Standard 95A
IS-95B	Interim Standard 95B
ISTP	intelligent/Internet Signal Transfer point
ITU	International Telecommunication Union
JDC	Japanese Digital Cellular
Kbps	Kilobit per Second
kHz	Kilohertz
LA	Location Area
LBO	Local Breakout
LTE	Long Term Evolution
M-TMSI	M temporary mobile subscriber identity
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MBB	Mobile Broadband
Mbps	Megabit per Second
MCC	Mobile Country Code
MCS	Mobile Cellular System
MCS-S	MSC-Server (MCS-S)
ME	Mobile Equipment
MFAF	Messaging Framework Adaptor Function
MFBR	Maximum Flow Bit Rate
MFBR	UL/DL Maximum Flow Bit Rate
MGW	MSC-Gateway
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
MME	Mobility Management Entity
MMEC	MME Code

MMEGI	MME Group Identifier
MMEI	MME Identity
mMTC	Massive Machine Type Communications
MNC	Mobile Network Code
MOSN	Modular Open Smart Network
MR-DC	Multi Radio Dual Connectivity
MS	Mobile Station
MSC	Mobile Switching Center
MSIN	Mobile Subscriber Identification Number
MSISDN	Mobile Station International Subscriber Directory Number
MT	mobile termination
MTD	Mobile Telephony system D
N3IWF	Non-3GPP InterWorking Function
NAI	Network Access Identifier
NAS	Non-Access Stratum
NBAP	Node-B Application Part
NDC	National Destination Code
NEF	Network Exposure Function
NF	Network Function
NFV	Network Function Virtualization
NGAP	NG Application Protocol
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NGC	Next Generation Core
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NMT	Nordic Mobile Telephony
non-GBR	Non-Guaranteed Bit Rate
NRF	Network Repository Function
NSACF	Network Slice Admission Control Function
NSS	Network and Switching Subsystem
NSSAAF	Network Slice-specific and SNPN Authentication and Authorization Function
NSSAI	Network Slice Selection Assistance Information
NSSF	Network Slice Selection Function
NSWOF	Non-Seamless WLAN Offload Function

NTT	Nippon Telegraph and Telephone
NWDAF	Network Data Analytics Function
OCS	Online Charging System
OFCS	Offline Charging System
OFDMA	Orthogonal frequency-division multiple access
OLT	Offentlig Landmobil Telefoni
OPNFV	Open Platform for NFV Project
OSS	Operation and Support Subsystem
PCF	Policy Control Function
PCG	Project Co-ordination Group
PCI	Physical Cell Identity
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDC	Personal Digital Cellular
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDN	Packet Data Network
PEI	Permanent Equipment Identifier
PFCP	Packet Forwarding Control Protocol
PGW	Packet Data Network Gateway
PGW-C	Packet Gateway Control Plane Function
PGW-U	Packet Gateway User Plane Function
PIN	Personal Identification Number
PLMN	Public Land Mobile Network
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
RA	Routing Area
RAB	Radio Access Bearer
RAM	Random Access Memory
RAN	Radio Access Network
RANAP	Radio Access Network Application Part
RedCap	Reduced Capability
RLC	Radio Link Control
RLS	Radio Link Simulation
RNC	Radio Network Controller



Καταναημημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

RNS	Radio Network Sub-system
ROM	Μνήμη Μόνο Ανάγνωσης
RRC	Radio Resource Control
S-TMSI	S temporary mobile subscriber identity
S1AP	S1 application protocol
SA	Service and System Aspects
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier FDMA
SCP	Service Communication Proxy
SCTP	Stream Control Transmission Protocol
SD	Spare Digit
SDAP	Service Data Adaptation Protocol
SEPP	Security Edge Protection Proxy
SGSN	Serving GPRS Support Node
SGW	Serving Gateway
SGW-C	Serving Gateway Control Plane Function
SGW-U	Serving Gateway User Plane Function
SIM	Subscriber Identity Module
SIP	Session Initiation Protocol
SMF	Session Management Function
SMS	Short Message Service
SMSC	Short Messaging Service Center
SN	Subscriber Number
SNR	Serial Number
SON	Self-Organising Networks
SRVCC	Single Radio Voice Call Continuity
SS7	Signaling System 7
STP	Signal Transfer Point
SUCI	Subscription Concealed Identifier
SUPI	Subscription Permanent Identifier
SVN	Software Version Number
TaaS	Time as a Service
TAC	Type Allocation Code

TACS	Total Access Communication System
TAI	Tracking Area Identity
TCP	Transmission Control Protocol
TCSM	Trans-coder Sub-Multiplexer
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TNGF	Trusted Non-3GPP Gateway Function
TSCTS	Time Sensitive Communication and Time Synchronization Function
TSDSI	Telecommunications Standards Development Society, India
TSG	Technical Specification Group
TSN AF	Time Sensitive Networking AF
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunications Technology Committee
TWIF	Trusted WLAN Interworking Function
UCMF	UE radio Capability Management Function
UDM	Unified Data Management
UDP	User Datagram Protocol
UDR	Unified Data Repository
UDSF	Unstructured Data Storage Function
UE	User Equipment
UE-AMBR	UE Aggregate Maximum Bitrate
UHF	Ultra High Frequency
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UL	Uplink
UMB	Ultra Mobile Broadband
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UPF	User Plane Function
URI	Uniform Resource Identifier
URLLC	Ultra-Reliable and Low Latency Communications
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network
UWCC	Universal Wireless Communication Consortium

Κατανομημένη διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

VHF	Very High Frequency
VLR	Visitor Location Register
VNF	Virtual Network Function
VoIP	Voice over IP
VOLTE	Voice over LTE
VR	Virtual Reality
W-AGF	Wireline Access Gateway Function
WASM	WebAssembly Modules
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WG	Working Group
X2AP	X2 application protocol
XnAP	Xn Application Protocol
XR	Extended Reality

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Mohammad Meraj ud in Mir et al, Evolution of Mobile Wireless Technology from 0G to 5G, International Journal of Computer Science and Information Technologies, Vol. 6 (3), 2015, 2545-2551
- [2] ETHW, The Foundations of Mobile and Cellular Telephony, [https://ethw.org/The\\_Foundations\\_of\\_Mobile\\_and\\_Cellular\\_Telephony](https://ethw.org/The_Foundations_of_Mobile_and_Cellular_Telephony) [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [3] Britannica, Martin Cooper, <https://www.britannica.com/biography/Martin-Cooper> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [4] Martin Sauter, From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G, 4th Edition, Wiley
- [5] Jörg Eberspächer, Hans-Jörg Vögel, Christian Bettstetter, Christian Hartmann, GSM - Architecture, Protocols and Services, Third Edition, Wiley
- [6] 3GPP TS 51.011, Specification of the Subscriber Identity Module - Mobile Equipment (SIM-ME) interface, 3GPP
- [7] 3GPP TS 23.003, Numbering, addressing and identification, 3GPP
- [8] ITU-T Recommendation E.212, The international identification plan for public networks and subscriptions, ITU
- [9] ITU-T Recommendation E.164, The international public telecommunication numbering plan, ITU
- [10] Juha Korkohen, Introduction to 4G Mobile Communications, Artech House 2014
- [11] R6-Geran, <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/r6-geran> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [12] 3GPP TS 23.205, Bearer-independent circuit-switched core network, 3GPP
- [13] 3GPP TS 36.101, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception, 3GPP
- [14] Christopher Cox, An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE, VoLTE and 4G Mobile Communications, 2nd Edition, Wiley
- [15] 3GPP TS 36.300, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2, 3GPP
- [16] Magnus Olsson, Catherine Mulligan, EPC and 4G Packet Networks, 2nd Edition, Academic Press
- [17] Sassan Ahmadi, LTE-Advanced, Academic Press
- [18] 3GPP TS 23.401, General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access, 3GPP
- [19] 3GPP TS 36.211, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation, 3GPP
- [20] 3GPP TS 36.212, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding, 3GPP
- [21] 3GPP TS 36.213, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures, 3GPP
- [22] 3GPP TS 36.321, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification, 3GPP
- [23] 3GPP TS 36.322, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification, 3GPP
- [24] 3GPP TS 36.323, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification, 3GPP
- [25] 3GPP TS 36.331, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification, 3GPP
- [26] 3GPP TS 24.301, Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3, 3GPP
- [27] 3GPP TS 23.203, Policy and charging control architecture, 3GPP
- [28] Advanced Telecommunications Computing Architecture, [https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced\\_Telecommunications\\_Computing\\_Architecture](https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Telecommunications_Computing_Architecture) [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [29] Recommendation ITU-R M.2083, IMT Vision - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond, ITU
- [30] 5G Technology, 2nd Edition, Harri Holma, Antti Toskala, Takehiro Nakamura, Wiley
- [31] 3GPP TS 23.799, Study on Architecture for Next Generation System, 3GPP
- [32] GSMA White Paper, Road to 5G: Introduction and Migration, April 2018
- [33] 3GPP TS 38.300, NR; NR and NG-RAN Overall description; Stage-2, 3GPP
- [34] 3GPP TS 38.401, NG-RAN; Architecture description, 3GPP
- [35] Devaki Chandramouli, Rainer Liebhart, Juho Pirskanen, 5G for the Connected World, Wiley
- [36] Stefan Rommer, Peter Hedman, Magnus Olsson, Lars Frid, Shabnam Sultana, Catherine Mulligan, 5G Core Networks, Academic Press
- [37] 3GPP TS 23.501, System architecture for the 5G System (5GS), 3GPP

Κατανομή διαχείριση υποστηρικτικών υπηρεσιών (service mesh) ανάμεσα σε λειτουργικές οντότητες (Network Functions) δικτύων κινητών επικοινωνιών 6ης γενιάς

- [38] 3GPP TS 24.501, Non-Access-Stratum (NAS) protocol for 5G System (5GS); Stage 3, 3GPP
- [39] M.2160, Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond, ITU
- [40] 6G standardization – an overview of timeline and high-level technology principles, <https://www.ericsson.com/en/blog/2024/3/6g-standardization-timeline-and-technology-principles> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [41] Strategy Analytics, 5G Signaling and Control Plane Traffic Depends on Service Communications Proxy (SCP)
- [42] Ericsson whitepaper, Indirect communication for service-based architecture in 5G core, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/indirect-communication-for-service-based-architecture-in-5g-core> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [43] Yin-Chi Li, Ping-Tsan Liu, Yi-An Tai, Che-Hung Liu, Man-Hsin Chen, Chi-Yu Li, Guan-Hua Tu, A Runtime Anomaly Detector via Service Communication Proxy for 5G Mobile Networks, IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)
- [44] 3GPP TS 29.500, Technical Realization of Service Based Architecture, 3GPP
- [45] What's a service mesh?, <https://www.redhat.com/en/topics/microservices/what-is-a-service-mesh> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [46] Istio Documentation, <https://istio.io/latest/docs/> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [47] Using MOSN with Istio: an alternative data plane, <https://istio.io/latest/blog/2020/mosn-proxy/> [Προσπελάστηκε 13/09/2024]
- [48] Van-Binh Duong, Younghan Kim, A Design of Service Mesh Based 5G Core Network Using Cilium, 2023 International Conference on Information Networking (ICOIN)
- [49] Jimmy Song, Sidecar injection, transparent traffic hijacking, and routing process in Istio explained in detail, <https://jimmysongio.medium.com/sidecar-injection-transparent-traffic-hijacking-and-routing-process-in-istio-explained-in-detail-d53e244e0348> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [50] gRPC Proxyless Service Mesh, <https://istio.io/latest/blog/2021/proxyless-grpc/> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [51] Pragya Sharma and Tolga O Atalay (Virginia Tech, USA); Hans-Andrew Gibbs and Dragoslav Stojadinovic (Kryptowire LLC, USA); Angelos Stavrou (Virginia Tech & Kryptowire, USA); Haining Wang (Virginia Tech, USA), 5G-WAVE: A Core Network Framework with Decentralized Authorization for Network Slices, IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), Vancouver, Canada, May 2024
- [52] SeongJun Lee, DongJin Lee, JoongGunn Park, Brendan Ryan, Michal Kobylinski, Chetan Hiremath, Toward 6G Core Architecture Using an Inline Service Mesh, Intel white paper
- [53] Open5GS quickstart, <https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [54] UERANSIM, <https://github.com/aligungr/UERANSIM/wiki/Feature-Set> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [55] RLS wireshark dissector, <https://github.com/nextmn/RLS-wireshark-dissector> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [56] Istio, Install with Helm, <https://istio.io/latest/docs/setup/install/helm/> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [57] Gradiant 5G Charts, <https://github.com/Gradiant/5g-charts> [Προσπελάστηκε 13/10/2024]
- [58] 3GPP TS 29.510, Network function repository services, 3GPP