

**Δράσεις Δυναμικού Τεμαχισμού Δικτύων για
την Προώθηση Εφαρμογών στο Πλαίσιο 5G**

Αθανάσιος Λιούμπας

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέποντες:

Ιωάννης Χοχλιούρος

Αντώνης Μπόγρης

Αθήνα, Ιανουάριος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΣ: ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Επιβλέποντες:

Αντώνης Μπόγρης

Ιωάννης Χοχλιούρος

Εξεταστική επιτροπή:

Αντώνης Μπόγρης

Ιωάννης Χοχλιούρος

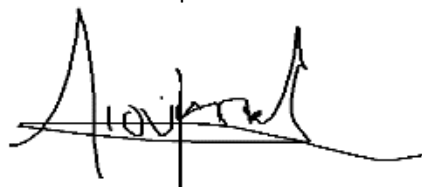
Παναγιώτης Καρκαζής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Αθανάσιος Λιούμπας του Στεργίου, με αριθμό μητρώου mcse19042, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών» του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Ευχαριστίες

Ευχαριστώ:

- τη σύζυγό μου Αιμιλία για την υποστήριξη κατά τη διάρκεια φοίτησής μου στο ΠΜΣ.
- τον Καθηγητή Αντώνη Μπόγρη για την ευκαιρία να φοιτήσω στο ΠΜΣ και για τις γνώσεις που μου προσέφερε.
- τον Δρ. Ιωάννη Χοχλιούρο για την ευκαιρία να επιλέξω το θέμα της διπλωματικής αυτής και για τη συνεργασία μας.

30/12/2020

Αθανάσιος Λιούμπας

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση του ρόλου δράσεων δυναμικού τεμαχισμού δικτύου (dynamic network slicing) για την ενίσχυση των διαφόρων εφαρμογών 5G. Η εργασία επιδιώκει να καλύψει βασικά εννοιολογικά θέματα που αφορούν στο πεδίο αναφοράς του network slicing και να επεκτείνει τη βιβλιογραφική έρευνα στο πλαίσιο του 5G, εστιάζοντας κυρίως στην προοπτική του dynamic network slicing. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται σε υφιστάμενα επιχειρηματικά μοντέλα καθώς και σε ρυθμιστικά θέματα που ενδέχεται να επηρεάσουν στην περαιτέρω ανάπτυξη συναφών εφαρμογών.

Λέξεις Κλειδιά: Δίκτυα επικοινωνιών, κινητές επικοινωνίες, δίκτυα 5^{ης} γενιάς, 5G, τεμαχισμός δικτύου, δυναμικός τεμαχισμός δικτύου, network slicing, εμπορικά μοντέλα 5G, ρυθμιστικά θέματα 5G, MVNO.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής	1
1.2 Οργάνωση της Εργασίας.....	1
Κεφάλαιο 2. Εισαγωγή στην έννοια του Τεμαχισμού Δικτύου	4
2.1 Η Εξέλιξη των Κινητών Επικοινωνιών.....	4
2.2 Νέες Απαιτήσεις για μία Νέα Γενιά Δικτύων.....	5
2.3 Τι καινούριο προσφέρουν τα Δίκτυα 5G;	7
2.4 Τεχνολογίες-Κλειδιά για τις Καινοτομίες των Δικτύων 5G.....	15
2.4.1 Χρήση χιλιοστομετρικού κύματος (<i>mmWave</i>).....	16
2.4.2 <i>Massive MIMO</i> και <i>Beamforming</i>	17
2.4.3 Δίκτυα Μικρών Κυψελών (<i>Small cells</i>).....	17
2.4.4 Τεμαχισμός Δικτύου, μια τεχνολογία κλειδί για το 5G.....	18
Κεφάλαιο 3. Η Ανάγκη για Δυναμικό Τεμαχισμό του Δικτύου	27
3.1 Οι Νέες Απαιτήσεις στις Τηλεπικοινωνίες.....	27
3.2 Περιορισμοί Υπαρχουσών Αρχιτεκτονικών.....	29
3.2.1 <i>Σύντομη Παρουσίαση του ETSI NFV MANO</i>	30
3.3 Οι Δυνατότητες του Δυναμικού Τεμαχισμού Δικτύου	32
Κεφάλαιο 4. Δυναμικός Τεμαχισμός: Το Μέλλον του 5G	35
4.1 Πώς ο Δυναμικός Τεμαχισμός Δικτύου επαναπροσδιορίζει τα Δίκτυα Επικοινωνιών.....	35
4.1.1 <i>Από τα Δίκτυα Οντοτήτων στα Δίκτυα Δυνατοτήτων</i>	38
4.2 Ο Δυναμικός Τεμαχισμός και η Διαχείριση των Δικτυακών Πόρων	42
4.2.1 <i>Σχεδιασμός Δικτύων όπως ο Σχεδιασμός του Λογισμικού – Το Λειτουργικό Σύστημα 5G (5G OS)</i>	42
4.2.2 <i>Διαχείριση στο Έπακρο και από Άκρο-σε-Άκρο</i>	45

Κεφάλαιο 5. Προκλήσεις Εφαρμογής του Δυναμικού Τεμαχισμού Δικτύου.....	50
5.1 Νέες Δυνατότητες, Νέες Αγορές	50
5.2 Κανονιστικές/Ρυθμιστικές Προκλήσεις	53
5.2.1 Ο Ρόλος των Ρυθμιστών για τα Δίκτυα 5G.....	54
5.2.2 Ουδετερότητα Δικτύου.....	55
5.2.3 Ασφάλεια.....	64
5.2.4 Ιδιωτικότητα και Προσωπικά Δεδομένα.....	67
5.3 MVNO as-a-Service	71
Συμπεράσματα.....	75

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό την ανασκόπηση της τεχνολογίας του «τεμαχισμού δικτύου» ή της «κατάτμησης δικτύου» (“network slicing”) ως βασικό δομικό συστατικό των δικτύων 5^{ης} γενιάς κινητών επικοινωνιών (5G networks) και των δυνατοτήτων που εισάγει για τη δημιουργία νέων εφαρμογών στην αντίστοιχη αγορά. Αφού αναλυθούν οι δυνατότητες του τεμαχισμού δικτύου, εξετάζονται οι απαιτήσεις συγκεκριμένων εφαρμογών δικτύων 5G οι οποίες προωθούν την επέκταση της έννοιας του τεμαχισμού δικτύου στο επίπεδο του «δυναμικού δικτυακού τεμαχισμού» (“dynamic network slicing”). Με την εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας ανοίγει ο δρόμος για τη σχεδίαση και ανάπτυξη έξυπνων δικτύων που βελτιστοποιούν την κατανομή του συνόλου των πόρων του δικτύου από άκρη-σε-άκρη (end-to-end/E2E). Παράλληλα, ο δυναμικός τεμαχισμός προσφέρει νέες δυνατότητες για τη δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων, λαμβάνοντας υπόψη τις πολλαπλές απαιτήσεις της σχετικής αγοράς σε ένα εύρος πεδίων που αφορούν σε τεχνολογικά, επιχειρηματικά, οικονομικά, εμπορικά, ρυθμιστικά, κοινωνικά ή άλλα θέματα.

1.2 Οργάνωση της Εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται στα ακόλουθα επιμέρους θεματικά κεφάλαια:

Κεφάλαιο 2: Εισαγωγή στον Τεμαχισμό Δικτύου.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η εξέλιξη των κινητών επικοινωνιών κατά τις τελευταίες δεκαετίες και το πώς οι ανάγκες για νέες υπηρεσίες και εφαρμογές ώθησαν την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και αρχιτεκτονικών, καταλήγοντας στα δίκτυα της 5^{ης} γενιάς. Γίνεται αναφορά στις νέες δυνατότητες που προσφέρουν τα δίκτυα αυτά και

αναλύονται οι τεχνολογίες «κλειδιά» που επιτρέπουν την υλοποίηση διαφόρων καινοτομιών, σε πολλαπλά επίπεδα αναφοράς. Στο πλαίσιο αυτό γίνεται επίσης εισαγωγή στην έννοια του τεμαχισμού δικτύου και του ρόλου του ως βασικό δομικό στοιχείο των δικτύων 5G, ενώ εξετάζονται προκλήσεις και προοπτικές που αναδύονται από τις σύγχρονες συναφείς πρωτοβουλίες τυποποίησης αλλά και από τις προσφερόμενες τεχνολογίες ενίσχυσης καινοτομίας. Το κεφάλαιο αυτό ουσιαστικά «οριοθετεί» τον κύριο ρόλο των δράσεων τεμαχισμού δικτύου μέσα στο περιβάλλον αναφοράς του 5G, με παράθεση επεξηγηματικών στοιχείων από την υφιστάμενη βιβλιογραφία και με στοχευμένες αναφορές σε αναμενόμενες προσεχείς δράσεις, για την ενίσχυση των απαιτήσεων της αγοράς.

Κεφάλαιο 3: Η Ανάγκη για Δυναμικό Τεμαχισμό του Δικτύου.

Αφού γίνουν κατανοητές οι ανάγκες για την προώθηση των νέων υπηρεσιών, στο κεφάλαιο αυτό καταρχήν επιχειρείται να αναδειχθεί η ανάγκη για την υλοποίηση δράσεων δυναμικού τεμαχισμού του δικτύου, ιδίως υπό την έλευση του 5G. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται περιορισμοί των υπάρχουσών αρχιτεκτονικών δικτύων κινητών επικοινωνιών κυρίως παρατίθεται η βασική προσέγγιση σύμφωνα με το πλαίσιο ETSI MANO, που συνιστά θεμελιώδη προσέγγιση αναφοράς. Ακολούθως επιχειρείται μια προσέγγιση αξιολόγησης της ανάγκης για δυναμικό τεμαχισμό δικτύου και των δυνατοτήτων που προσφέρονται.

Κεφάλαιο 4: Δυναμικός Τεμαχισμός.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος κατά τον οποίο ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου επαναπροσδιορίζει τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών και το πώς αυτά δημιουργούν μια νέα πραγματικότητα στην τηλεπικοινωνιακή αγορά, όπου πλέον εμφανίζονται νέοι ρόλοι και αλληλεπιδράσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη νέα λογική για παροχή υπηρεσιών χωρίς όρια στις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και στο δυναμικό τρόπο διαχείρισης των πόρων στα δίκτυα νέας γενιάς που ουσιαστικά είναι το κλειδί για το μέλλον των τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Επίσης παρατίθεται και αξιολογείται η έννοια του Λειτουργικού Συστήματος 5G καθώς επίσης και θέματα σχετικά με τη διαχείριση των δικτυακών πόρων.

Κεφάλαιο 5: Προκλήσεις Έφαρμογής του Δυναμικού Τεμαχισμού Δικτύου.

Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς εισάγουν πολλές καινοτομίες και επαναπροσδιορίζουν τον τρόπο που λειτουργεί η αγορά τηλεπικοινωνιών. Ως εκ τούτου, απαιτείται μια ανάλυση τόσο των νέων επιχειρηματικών μοντέλων, όσο και των πιθανών προβλημάτων συμβατότητας με υφιστάμενες ή μελλοντικές ρυθμιστικές απαιτήσεις. Για το σκοπό αυτό παρατίθενται προσεγγίσεις σύμφωνα με ισχύοντα επιχειρηματικά μοντέλα ενώ

παράλληλα σχολιάζονται και αξιολογούνται διάφορες προοπτικές από τρέχουσες ρυθμιστικές προσεγγίσεις αναφορικά με την ουδετερότητα του δικτύου, την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα, την προστασία των προσωπικών δεδομένα και άλλα. Τέλος παρουσιάζεται το μοντέλο εικονικού παρόχου τηλεπικοινωνιών, που αναμένεται να ασκήσει σημαντική επιρροή αναφορικά με τη διάθεση νέων υπηρεσιών στην εποχή των δικτύων της 5^{ης} γενιάς.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.

Στο τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα από μία συνολική επισκόπηση του περιεχομένου της εργασίας.

Κεφάλαιο 2. Εισαγωγή στην έννοια του Τεμαχισμού Δικτύου

2.1 Η Εξέλιξη των Κινητών Επικοινωνιών

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών, γνωστά και ως κυψελοειδή δίκτυα επικοινωνιών, εξελίσσονται περίπου κάθε δεκαετία με απαρχή την εισαγωγή του GSM (Global System for Mobile Communications) το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως ο κύριος εκπρόσωπος της δεύτερης γενιάς (2G) κυψελοειδούς τεχνολογίας. Ιδίως κατά τη δεκαετία του 1990, το GSM κατέστη ευρέως διαδεδομένο και προσέφερε υπηρεσίες φωνής σε παγκόσμια κλίμακα, γνωρίζοντας μεγάλη αποδοχή στην αγορά. Με τη διάδοση και την ολοένα αυξανόμενη χρήση του Παγκόσμιου Ιστού (WWW ή World Wide Web), οι υπηρεσίες δεδομένων (mobile data services) έγιναν ο βασικός «μοχλός» για την εξέλιξη των επόμενων γενιών κυψελοειδούς τεχνολογίας. Γύρω στο 2000, η εισαγωγή της τεχνολογίας κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς (3G) επέτρεψε την ταχεία ανάπτυξη των υπηρεσιών δεδομένων κινητής τηλεφωνίας. Μετά το 2010, η εισαγωγή της 4^{ης} γενιάς (4G) επέφερε σημαντικές βελτιώσεις στην ασύρματη ευρυζωνική πρόσβαση, ιδίως σε υπηρεσίες διαδικτύου. Τα δύο βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τις γενιές των κινητών επικοινωνιών είναι η ταχύτητα/ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate) και η καθυστέρηση μετάδοσης δεδομένων (latency). Συνοπτικά, ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις τιμές αυτών των παραμέτρων για τα δίκτυα 2G μέχρι και 4G. Επιπλέον, ο Πίνακας 2 συγκεντρώνει τα βασικά πρότυπα για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 2G-4G, για περαιτέρω διερεύνηση από τον αναγνώστη.

Γενιά	Ρυθμός μετάδοσης	Καθυστέρηση μετάδοσης
2G	100–400 Kbit/s	300–1000 ms
3G	0.5–5 Mbit/s	100–500 ms
4G	1–50 Mbit/s	< 100 ms

Πίνακας 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά των κινητών δικτύων επικοινωνίας 2G/3G/4G.

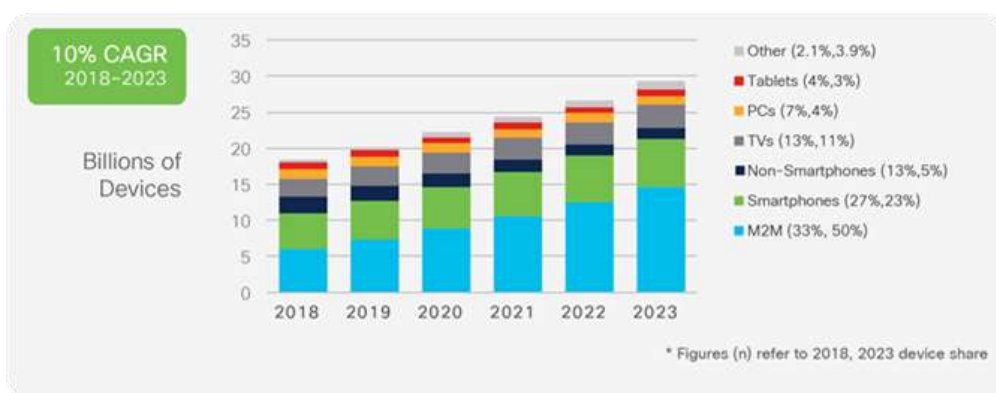
Γενιά	Οργανισμός έκδοσης	Έκδοση
2G	3GPP	GSM
	3GPP2	IS-95 (cdmaOne)
2.5G, 2.75G	3GPP	GPRS, EDGE (EGPRS)
	3GPP2	CDMA2000
3G	3GPP	UMTS
	3GPP2	CDMA 2000 1x EV-DO Release 0
3.5G, 3.75G, 3.9G	3GPP	HSPA, HSPA+, LTE
	3GPP2	EV-DO Revision A, EV-DO Revision B, EV-DO Advanced
4G	3GPP	LTE-Advanced, HSPA+ Revision 11+

Πίνακας 2: Τα βασικά πρότυπα για τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 2G-4G.

2.2 Νέες Απαιτήσεις για μία Νέα Γενιά Δικτύων

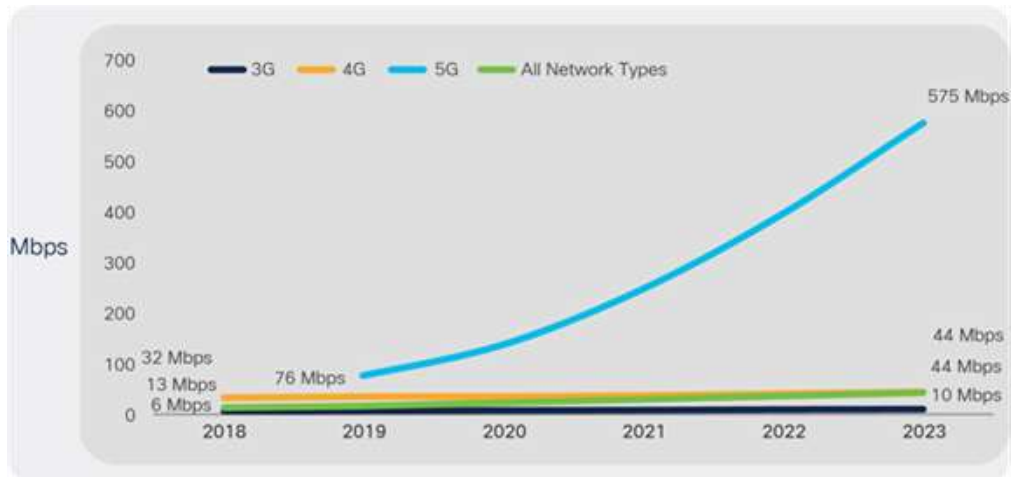
Η τελευταία δεκαετία (2010-2020) μπορεί να χαρακτηριστεί ως η δεκαετία κατά την οποία επιτεύχθηκε η εξέλιξη του κινητού τηλεφώνου από μια «κλασική» συσκευή επικοινωνίας σε μία μορφή προσωπικού υπολογιστή (με δυνατότητες «παρόμοιες», αναλογικά, με έναν συνήθη «μέσο» σταθερό υπολογιστή γραφείου). Τούτο πρακτικά οδήγησε στη δυνατότητα εκτέλεσης εφαρμογών σε κινητές συσκευές παρόμοιες με εκείνες των σταθερών υπολογιστών, γεγονός το οποίο, σε όρους εύρους ζώνης (*bandwidth*), σημαίνει την ανάγκη για ακόμα μεγαλύτερο ζωνικό εύρος στις συσκευές κινητής επικοινωνίας. Ωστόσο, η φύση των εν λόγω «έξυπνων» συσκευών που διευκολύνει αλλά και προωθεί συστηματικά το χαρακτηριστικό της κινητικότητας,

ώθησε την αγορά λογισμικού στην ανάπτυξη καινοτόμων εφαρμογών οι οποίες δεν υπήρχαν προηγουμένως στην αγορά των σταθερών υπολογιστών, όπως για παράδειγμα εφαρμογές κοινωνικών δικτύων (social networking applications) [WANG14]. Οι εφαρμογές αυτές «ανέβασαν» κατακόρυφα την ανάγκη για εύρος ζώνης τόσο στην καταφόρτωση δεδομένων (data downlink) όσο και στην αναφόρτωση δεδομένων (data uplink). Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι περίπου το 83% του πληθυσμού στις αναπτυγμένες χώρες διαθέτει έξυπνη κινητή συσκευή (smartphone) [JC20], καθώς και το ότι η χρήση των συσκευών συνεχώς αυξάνεται, (Εικόνα 1, [Cisco20]) καθιστά εύλογη -εάν όχι «προφανή»- την τεράστια ανάγκη για διαθέσιμο εύρος ζώνης στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών.



Εικόνα 1: Χρήση και πρόβλεψη πλήθους συσκευών ανά τύπο χρήσης [Cisco20].

Παράλληλα με την ανάπτυξη των «ανθρωποκεντρικών εφαρμογών», ραγδαία εξελίσσονται οι εφαρμογές επικοινωνίας μεταξύ μηχανών/συσκευών (Machine Type Communications ή MTC), όπως και οι εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things ή IoT). Η παρακάτω εικόνα παραθέτει ενδεικτικές μέσες προσφερόμενες ταχύτητες ανά τύπο δικτύου. Όπως φαίνεται από την εικόνα αυτή, οι υπηρεσίες 3G/4G δεν αναμένεται να αυξήσουν το συνολικό όγκο μετάδοσης δεδομένων. Ο λόγος είναι ότι οι υπηρεσίες αυτές είναι συγκεκριμένες και δεν εξελίσσονται (π.χ. περιήγηση στο διαδίκτυο, e-mail, video streaming) και οι συσκευές που τις χρησιμοποιούν επίσης συγκεκριμένες σε πλήθος (ανάλογες του πληθυσμού). Αντίθετα, οι υπηρεσίες 5G περιλαμβάνουν πλήθος συσκευών που δεν είναι ανάλογο του πληθυσμού (π.χ. έξυπνοι μετρητές που μπορεί να είναι δεκάδες χιλιάδες ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο). Επομένως, οι ανάγκες σε όγκο δεδομένων αναμένεται να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, καθώς αναμένεται και αύξηση της διεισδυτικότητας των υπηρεσιών 5G.



Εικόνα 2: Παγκόσμιες μέσες ταχύτητες ανά τύπο δικτύου (τρέχουσες τιμές και προβλέψεις) [Cisco20].

2.3 Τι καινούριο προσφέρουν τα Δίκτυα 5G;

Σύμφωνα με την Κοινωνία της Πληροφορίας για τα κινητά και ασύρματα δίκτυα για το 2020 (METIS), η κίνηση δεδομένων στις κινητές συσκευές αυξήθηκε το 2020 κατά 33 φορές σε σχέση με το έτος 2010 [ΚΚΤΗ19, σελίδα 2], [METIS20]. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η γιγαντιαία αύξηση, κρίθηκε ως επιτακτική η επανασχεδίαση και η εκ νέου συνολική αξιολόγηση του υποκείμενου δικτύου. Επιπλέον, καταβλήθηκαν -και συνεχίζονται να καταβάλλονται- πολλές προσπάθειες τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τους ακαδημαϊκούς φορείς, για την ανάπτυξη και/ή τη βελτίωση εκείνων των μορφών τεχνολογιών οι οποίες θα ικανοποιήσουν τις διαφορετικές απαιτήσεις που θέτουν οι νέες εφαρμογές.

Τα νέα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 5G μπορούν να παρέχουν μέγιστη ταχύτητα δεδομένων έως 10 Gbps, καθυστέρηση μετάδοσης έως 1 ms, εξυπηρέτηση 1000 φορές περισσότερων συσκευών ανά περιοχή, ενεργειακή απόδοση 10 φορές καλύτερη και υψηλή αξιοπιστία [METIS20]. Ταυτόχρονα, οι τεχνικές προδιαγραφές των δικτύων νέας γενιάς 5G συνδέονται άμεσα και άρρηκτα με τις απαιτήσεις των εκάστοτε προσφερόμενων υπηρεσιών-ευκολιών. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη για την κατηγοριοποίηση των συναφών εφαρμογών με έμφαση σε τομείς της σύγχρονης επιχειρηματικής και κοινωνικής δραστηριότητας (π.χ., τηλε-ιατρική, τηλε-εργασία, τηλε-εκπαίδευση, μεταφορές, μέσα επικοινωνίας και ψυχαγωγίας, κτλ.), η οποία είναι απαραίτητη τόσο για τη μεθοδική μελέτη των απαιτήσεων όσο και για την ανάπτυξη των αντίστοιχων λύσεων. Ταυτόχρονα, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την καλύτερη

διαχείριση των πόρων του δικτύου, το οποίο θα πρέπει να είναι σε θέση ώστε να εξυπηρετεί ταυτόχρονα εφαρμογές όλων των κατηγοριών.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union ή ITU), για να ανταποκριθεί σε τέτοιες δραστικές απαιτήσεις, έχει ταξινομήσει τις υπηρεσίες 5G σε τρεις κύριες κατηγορίες που συνίστανται στα κάτωθι:

- Εξαιρετικά αξιόπιστη, χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (Ultra-Reliable Low-Latency Communication – URLLC),
- Βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή πρόσβαση (enhanced Mobile Broadband - eMBB) και
- Υπηρεσίες μαζικής επικοινωνίας τύπου μηχανής (massive Machine-Type Communications - mMTC).

Η αρχιτεκτονική των συμβατικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας (1G-3G) σχεδιάστηκε για να ικανοποιεί πρωτίστως τις απαιτήσεις για υπηρεσίες φωνής και δευτερευόντως τις υπηρεσίες ευρυζωνικής κινητής πρόσβασης (Mobile Broadband, MBB). Στη συνέχεια, τα δίκτυα 4G σχεδιάστηκαν κυρίως για τη διάθεση υπηρεσιών δεδομένων (και φωνής), που αφορούν, όμως, πρωτίστως σε ανθρωποκεντρικές εφαρμογές [KKTH19, σελίδα 2]. Με άλλα λόγια, τα δίκτυα μέχρι και την 4^η γενιά εξυπηρετούσαν εφαρμογές που τις χειρίζονταν πρωτίστως άνθρωποι (π.χ. εφαρμογές σε smartphone, mobile video streaming, mobile hotspots κτλ.) και όχι εφαρμογές βασιζόμενες σε αυτοματισμούς (χωρίς το ενδεχόμενο ανθρώπινη παρέμβασης). Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκαν κυρίως τα δίκτυα 5G τα οποία σχεδιάστηκαν για να ικανοποιούν τόσο συμβατικές ανθρωποκεντρικές εφαρμογές δεδομένων και φωνής, όσο και ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών επικοινωνίας τύπου μηχανής (MTC) και IoT, οι οποίες στοχεύουν στην πλήρη ψηφιακοποίηση των επικοινωνιών σε όλο το εύρος των προσφερόμενων εφαρμογών, με έμφαση σε απαιτήσεις της σύγχρονης αγοράς.

Ειδικότερα, η τεχνολογία 5G παρέχει πλέον συνδεσιμότητα και λύσεις επικοινωνίας με οικονομικά αποδοτικό τρόπο σε καθετοποιημένους τομείς της αγοράς (vertical industries) όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγεία, ο κατασκευαστικός κλάδος, οι μεταφορές, η ψυχαγωγία και άλλοι.

Αυτές οι νέες υπηρεσίες έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις σε σύγκριση με τις συμβατικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα οι παραδοσιακές λύσεις πρόσβασης του ραδιοδικτύου (Radio Access Network – RAN) και οι συναφείς λύσεις για τη διαχείριση των δικτυακών πόρων να μην είναι πλέον οι καταλληλότερες, καθώς δεν μπορούν να

εγγυηθούν επαρκώς την τελική ποιότητα της διατιθέμενης υπηρεσίας (Quality of Service – QoS) για κάθε χρήστη αλλά και για κάθε υπηρεσία. Επιπρόσθετα, σημαντική βελτίωση επιτυγχάνεται και μέσω της αρχιτεκτονικής δικτύου η οποία δύναται να βασίζεται στη δημιουργία πυκνότερων σταθμών ασύρματης πρόσβασης, δηλαδή στη δημιουργία μικρότερων κυψελών (microcells) εντός των υπάρχοντων μακροκυψελών (macrocells). Τα ετερογενή αυτά δίκτυα (Heterogeneous networks ή HetNets) αποτελούν μια αποδεδειγμένα αποδοτική λύση για την αύξηση της χωρητικότητας και της επίδοσης των κινητών επικοινωνιών [KKTH19].

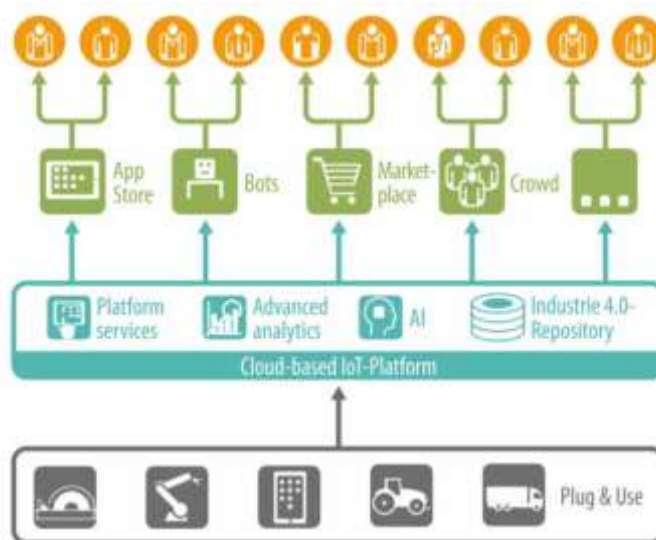
Μια ακόμα νέα τεχνολογία των νέων γενιών δικτύων κινητών επικοινωνιών είναι και η απευθείας επικοινωνία μεταξύ των συσκευών (Device-to-Device ή D2D), μέσω της οποίας εξοικονομούνται πόροι ραδιοδικτύου, καθώς για την επικοινωνία μπορεί να χρησιμοποιηθεί διαφορετικό τμήμα του φάσματος ενώ δεν μεσολαβεί το δίκτυο κορμού (core network).. Τέλος, η μεγάλη πρόκληση για μείωση της καθυστέρησης επικοινωνίας (latency) σε χρόνους κάτω των 5 ms, αντιμετωπίζεται με την εισαγωγή της έννοιας της αποθήκευσης προσωρινής μνήμης (edge cache) στα δίκτυα πρόσβασης και την εκτέλεση υπολογισμών σε τοπικούς σταθμούς βάσης στο άκρο του δικτύου (edge computing). Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η συμμετοχή του δικτύου κορμού στην επικοινωνία, η οποία προσθέτει σημαντική καθυστέρηση.

Οι αρχικές προδιαγραφές των δικτύων 5G ενσωματώθηκαν από τον φορέα προτυποποίησης 3GPP (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) με την έκδοση 15 (3GPP Release 15, [3GPP23501]), οι οποίες επικεντρώθηκαν πρωτίτως στην ικανοποίηση των απαιτήσεων των παρόχων κινητών υπηρεσιών για υποστήριξη ευρυζωνικών υπηρεσιών από άκρο-σε-άκρο (end-to-end mobile broadband). Η έκδοση 16 [3GPPRel16] που έχει «οριστικοποιηθεί» από τον Ιούλιο του 2020 (Stage 3 freeze)¹ επικεντρώνεται σε «τεχνολογίες-κλειδιά» που θα επιτρέψουν στις εταιρείες του βιομηχανικού τομέα να επιτύχουν τον ψηφιακό τους μετασχηματισμό και να υλοποιήσουν το πρότυπο Industrie 4.0 ή τις δράσεις εφαρμογών IoT.

Ο όρος Industrie 4.0 αναφέρεται στην πολιτική για τον ψηφιακό μετασχηματισμό των βιομηχανιών που σχετίζονται με εργοστασιακή παραγωγή, τον κατασκευαστικό τομέα και τον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Σχετίζεται άμεσα με τις εφαρμογές IoT, οι οποίες αναμένεται να εισάγουν μια καινούρια προσέγγιση στην αλυσίδα παραγωγής, με πλήρεις αυτοματοποιημένες διαδικασίες από την αρχική παραγγελία μέχρι και την τελική παράδοση του προϊόντος [WINTER20]. Η 4^η αυτή βιομηχανική επανάσταση, όπως

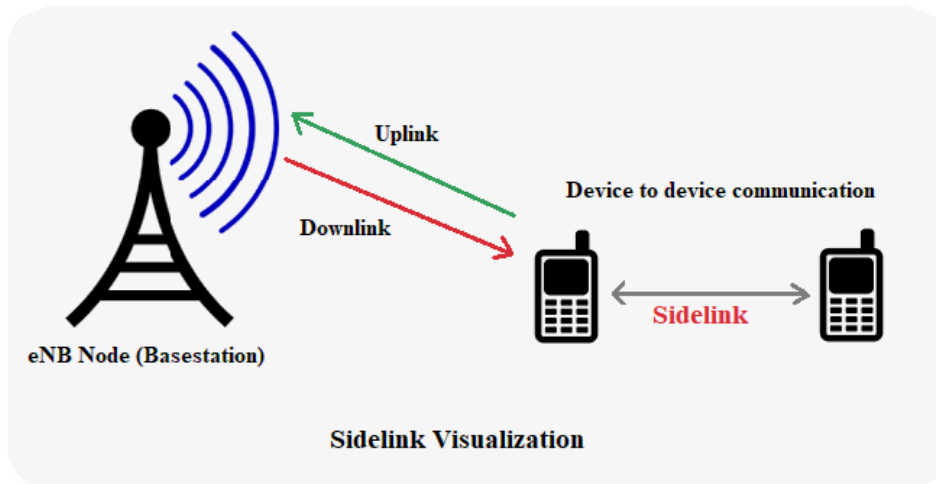
¹ <https://www.3gpp.org/release-16>

χαρακτηρίζεται, θα συνδυάσει τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων (big data), και συνδεσιμότητα 5G, ώστε να δημιουργηθεί ένα αυτόνομο «οικοσύστημα» βιομηχανικών εφαρμογών, που όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3, θα βασίζεται στη λογική “plug and use” («βυσμάτωσης και χρήσης»). Η λογική αυτή στοχεύει στην παροχή σύνθετων μέχρι τώρα βιομηχανικών διαδικασιών ως τμήμα μιας απλής και φιλικής προς τον χρήστη, υπηρεσίας. Η προσέγγιση αυτή, προϋποθέτει τη συνεργασία πολλών διαφορετικών τεχνολογιών και την κατάλληλη ενορχήστρωση τους μέσω του δικτύου 5G [SCHUHU17].



Εικόνα 3: Απεικόνιση της αλυσίδας παραγωγής για το Industrie 4.0 [SCHUHU17].

Επιπρόσθετα, η έκδοση 16 επεκτείνει την έννοια της -κατά το 5G- ευρυζωνικότητας σε καινούριες εφαρμογές, όπως η κυψελοειδής επικοινωνία οχήματος με οτιδήποτε (cellular vehicle-to-everything ή C-V2X), το βιομηχανικό IoT, υπηρεσίες URLLC, πρόσβαση NR μέσω μη αδειοδοτημένου φάσματος (New Radio unlicensed ή NR-U) και ενοποιημένα δίκτυα πρόσβασης και κορμού (Integrated Access and Backhaul ή IAB). Ειδικότερα, η λειτουργικότητα C-V2X επιτρέπει την απευθείας επικοινωνία των συσκευών (sidelink, Εικόνα 4), απαραίτητη για υπηρεσίες αυτόνομης οδήγησης και δημόσιας ασφαλείας [3GPPRel16].



Εικόνα 4: Η νεοεισαγόμενη έννοια του sidelink στο 3GPP Rel. 16.



Εικόνα 5: Τεχνολογίες με υψηλή προτεραιότητα για την έκδοση 17².

Η έκδοση 17, [3GPPRel17]³ με βάση το συμφωνημένο χρονοδιάγραμμα αναμένεται να οριστικοποιηθεί τον Σεπτέμβριο του 2021 (stage 3), ενώ οι προδιαγραφές των διεπαφών (interfaces) ASN.1 και OpenAPI αναμένονται να οριστικοποιηθούν τον Δεκέμβριο του 2021. Το ASN.1 (Abstract Syntax Notation One) αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία σύνταξης μηνυμάτων που χρησιμοποιείται σε πολλά πρωτόκολλα για την επικοινωνία μεταξύ

² Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://www.rimedolabs.com/blog/3gpp-rel-17-way-forward-within-5g-standardization/>

³ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.3gpp.org/release-17>

διαφορετικών συστημάτων στις τηλεπικοινωνίες [ITU02]. Η αποτελεσματικότητά του, η αξιοπιστία του και η οπισθόφορη συμβατότητα (backward compatibility) αποτελούν βασικό κριτήριο για τη χρήση του και στο πρότυπο του 5G, παρέχοντας ιδίως⁴:

- Μικρό μέγεθος μηνυμάτων.
- Χρήση κωδικοποιητών/αποκωδικοποιητών χαμηλής μνήμης για επίτευξη υψηλής ταχύτητας επικοινωνίας.
- Δια-λειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων (καθώς είναι προτυποποιημένο).

Η προδιαγραφή OpenAPI χρησιμοποιείται κυρίως για την επικοινωνία μεταξύ κόμβων του δικτύου κορμού, υποστηρίζοντας πρωτόκολλα και μεθόδους όπως το HTTP και το RESTful (Representational state transfer). Στα δίκτυα 5G, λόγω του γεγονότος ότι συμπεριλαμβάνουν εικονικοποιημένες λειτουργίες δικτύου (Network Virtualization Functions ή NFV), η εν λόγω προδιαγραφή επιτελεί ρόλο ζωτικής σημασίας [DONATO19].

Στον κατάλογο εργασιών της έκδοσης 17 συμπεριλαμβάνονται περισσότερα από 400 θεματικά αντικείμενα⁵, ενώ μεταξύ αυτών υπάρχουν κάποια με «υψηλότερη» προτεραιότητα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5. Ανάμεσα σε αυτές τις εργασίες περιλαμβάνονται τα εξής αντικείμενα:

- **Βελτίωση της επικοινωνίας D2D (NR sidelink):** Τούτο αποσκοπεί σε βελτιώσεις στην κατανομή πόρων με στόχο τη μείωση κατανάλωσης ενέργειας, όπως και τη βελτίωση της αυτόνομης λειτουργίας για αυξημένη αξιοπιστία (reliability) και μικρότερη καθυστέρηση (latency).
- **Λύσεις για την υποστήριξη του NR από μη επίγεια (non-terrestrial) δίκτυα:** Εδώ ο βασικός στόχος συνίσταται στην επίτευξη βελτιώσεων για σενάρια που περιλαμβάνουν επικοινωνίες με δορυφόρους χαμηλής τροχιάς, γεωστατικής τροχιάς, καθώς και με χρήση συστημάτων HAPS (High Altitude Platform Station).
- **Επέκταση της λειτουργίας του NR σε συχνότητες 71 GHz:** Για το σκοπό αυτό λαμβάνονται υπόψη τόσο αδειοδοτημένες όσο και μη αδειοδοτημένες περιοχές του φάσματος.
- **Βελτιώσεις στην κατάτμηση πρόσβασης ραδιοδικτύου (RAN slicing) για NR:** Αφορά σε βελτιώσεις για γρηγορότερη πρόσβαση στην κυψέλη, εκ νέου επιλογή κυψέλης με βάση την κατάτμηση (slice-based cell reselection), συνέχιση

⁴ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.oss.com/5G-LTE/products/asn1-in-5G-lte.html>

⁵ Πλήρης λίστα παρέχεται στον σύνδεσμο <https://www.3gpp.org/DynaReport/WI-List.htm>

της διάθεσης-παροχής υπηρεσίας (service continuity) για περιπτώσεις μεταπομπής μέσω πολλαπλών τεχνολογιών ραδιοπρόσβασης (intra-RAT handover), κτλ.

- **Βελτιώσεις της αυτο-οργάνωσης δικτύων για 5G:** Αφορά σε βελτιστοποίηση κάλυψης και εξυπηρέτησης φόρτου (coverage and capacity optimization), βελτιστοποίηση εξισορρόπησης φόρτου (load balancing optimization), βελτιστοποίηση κατανομής πόρων (resources distribution optimization), κτλ.
- **Βελτιώσεις κατάτμησης δικτύου (φάση 2):** η δράση εξετάζει μη ικανοποιητικές αποδόσεις στα ήδη υφιστάμενα συστήματα για την υποστήριξη γενικών προτύπων κατάτμησης (Generic Slice Template).

Οι εργασίες για τη φάση 2 του τεμαχισμού δικτύου είναι σε εξέλιξη⁶ και εξετάζουν θέματα, όπως ο μέγιστος αριθμός χρηστών ανά κατάτμηση, μέγιστος αριθμός συνδέσεων (PDU sessions) ανά κατάτμηση, μέγιστες ταχύτητες μετάδοσης ανά χρήστη ανά κατάτμηση, κτλ. Σε σχέση με την αρχιτεκτονική, οι ακόλουθες προϋποθέσεις θεωρούνται ότι πρέπει να ικανοποιούνται κατά την ανάπτυξη των λύσεων:

- Θα πρέπει να υπάρχει συμβατότητα με την αρχιτεκτονική των ήδη αναπτυγμένων προτύπων TS 23.501 [3GPP23501], ενώ θα πρέπει να προβλεφθεί η ευελιξία και η ικανότητα για προσθήκη νέων λειτουργιών στο μέλλον.
- Θα πρέπει να υπάρχει συμβατότητα με εθνικούς ρυθμιστικούς κανονισμούς σχετικά με την εξαίρεση εφαρμογής ορίων χρήσης δεδομένων για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, υπηρεσίες πολυμέσων με υψηλή προτεραιότητα και γενικά κρίσιμων υπηρεσιών (critical services) για τους πολίτες [23.700-40, Architectural requirements, σελίδα 21].
- Ενώ η υποστήριξη εφαρμόζεται μόνο σε υπηρεσίες 5G, οι προτεινόμενες λύσεις θα πρέπει να υποστηρίζουν συνδρομητές με υπηρεσίες που απαιτούν διαλειτουργικότητα μεταξύ 5G συστημάτων και του συμβατικού συστήματος Εξελιγμένων Πακέτων (Evolved Packet System - EPS).

⁶ The Third Generation Partnership Project (3GPP): Specification 23.700-40 - Study on enhancement of network slicing; Phase 2. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα:

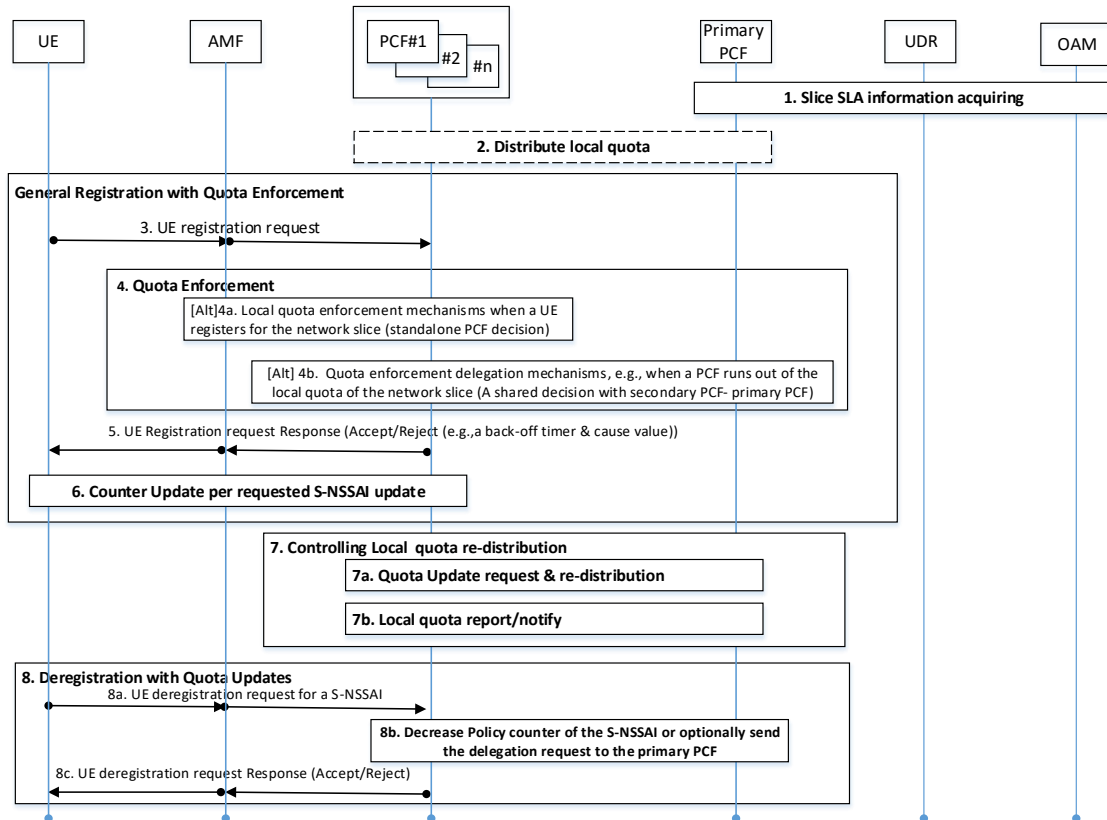
<https://portal.3gpp.org/ngppapp/CreateTdoc.aspx?mode=view&contributionUid=SP-200965#>

Στο ίδιο πλαίσιο, η 3GPP αναφορικά με προοπτικές για βελτιώσεις του τεμαχισμού δικτύου προσπαθεί να βρει λύσεις στα παρακάτω προβλήματα (με την περιγραφή να παρατίθεται σε υψηλό επίπεδο):

- Πώς το σύστημα 5G μπορεί να γνωρίζει το πλήθος εξυπηρετούμενων συσκευών και το μέγιστο πλήθος συσκευών που μπορεί να υποστηρίξει κάθε κατάτμηση δικτύου και ποιες εικονικές λειτουργίες δικτύου (Network Functions - NFs) θα πρέπει να έχουν αυτήν την πληροφορία;
- Πώς θα ελέγχονται οι συσκευές, η εξυπηρέτηση των οποίων εκτιμάται ότι θα προκαλέσει χρήση πόρων πάνω από το εκάστοτε τιθέμενο ως «επιτρεπτό» όριο;
- Πώς θα εφαρμόζονται οι έλεγχοι περιορισμού κίνησης σε εφαρμογές που απαιτούν ελάχιστη εγγυημένη ταχύτητα δεδομένων;
- Πώς θα επιλέγεται διαφορετικό δίκτυο πρόσβασης που υποστηρίζει μια ήδη χρησιμοποιούμενη κατάτμηση δικτύου, ποιες πληροφορίες χρειάζονται για τη λήψη αυτής της απόφασης και ποιες NFs θα συμμετάσχουν σε αυτή τη διαδικασία;
- Πώς θα στέλνεται η απόφαση για αλλαγή δικτύου πρόσβασης στις συσκευές;
- Πώς θα ελέγχονται τα παραπάνω σε περιπτώσεις παραγωγής;

Στην Εικόνα 6 περιγράφεται ενδεικτικά και σε υψηλό επίπεδο, η λύση που μελετάται στο εν λόγω πλαίσιο αναφοράς. Σε γενικές γραμμές, ορίζονται πληροφορίες Συμφωνιών Στάθμης (παρεχόμενης) Υπηρεσίας (Service Level Agreement - SLA) τόσο σε συνολικό (global επίπεδο) όσο και σε τοπικό επίπεδο (local) ανά κατάτμηση, οι οποίες προσδιορίζουν το μέγιστο πλήθος συσκευών που μπορούν να εξυπηρετηθούν και το μέγιστο πλήθος των πόρων που μπορούν να κατανεμηθούν. Δημιουργείται, στη συνέχεια, η σχέση “master-slave”⁷ («κύριου-υποτελούς») μεταξύ των συνολικών και τοπικών SLAs και οι πληροφορίες αυτές ανταλλάσσονται και προς τα ανώτερα επίπεδα διαχείρισης κατά τη διαδικασία εγγραφής των συσκευών στο δίκτυο (register procedure). Ουσιαστικά δημιουργείται ένα κατανεμημένο σύστημα διαχείρισης των SLAs και λήψης απόφασης για την εξυπηρέτηση των συσκευών με βάση τα όρια του συστήματος.

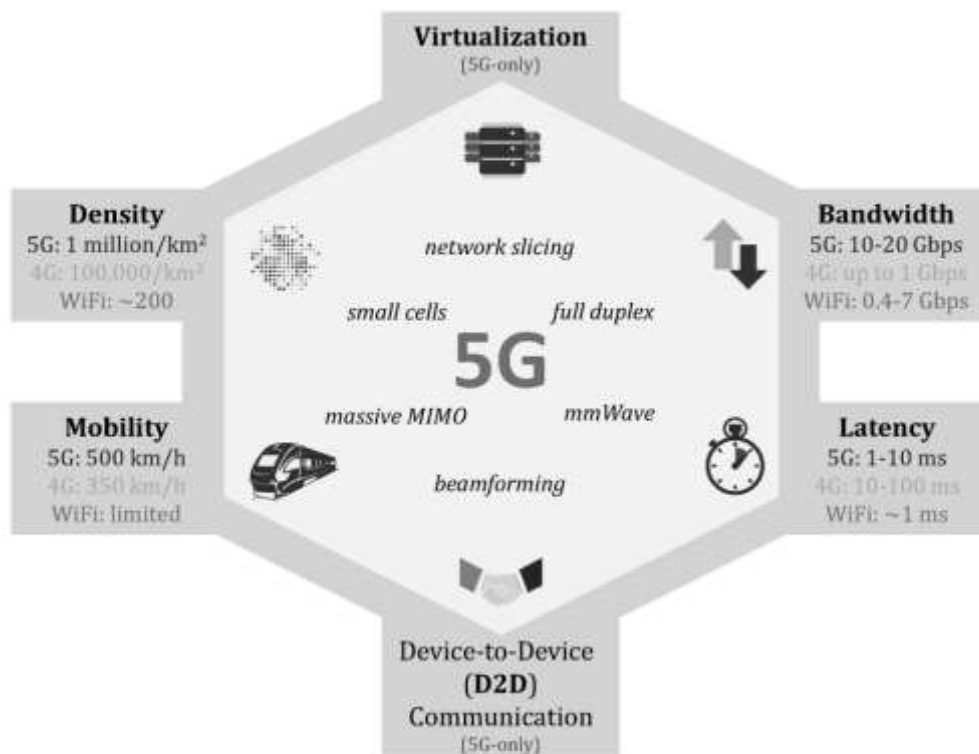
⁷ Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο «κύριου-υποτελούς» βλέπε, μεταξύ άλλων: [https://en.wikipedia.org/wiki/Master/slave_\(technology\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Master/slave_(technology))



Εικόνα 6: Περιγραφή λύσης σε υψηλό επίπεδο για τις βελτιώσεις του δυναμικού τεμαχισμού δικτύου [από 23.700-40 - Study on enhancement of network slicing; Phase 2].

2.4 Τεχνολογίες-Κλειδιά για τις Καινοτομίες των Δικτύων 5G

Τα δίκτυα 5G έχουν ως βασικό στόχο την κάλυψη των νέων εφαρμογών, τόσο των ανθρωποκεντρικών, όσο και των MTC/IoT. Προς αυτή την κατεύθυνση, θα προσφέρουν 100 φορές μεγαλύτερη χωρητικότητα από αυτήν που είναι διαθέσιμη σήμερα σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Παράλληλα με τις νέες απαιτήσεις σε μεγάλες χωρητικότητες και υψηλούς ρυθμούς δεδομένων, νέες καθετοποιημένες εφαρμογές (verticals), όπως οι εφαρμογές αυτόνομης οδήγησης ή η τηλεϊατρική, απαιτούν χρόνους μετάδοσης δεδομένων με πολύ μικρή καθυστέρηση. Αυτές οι -δίχως προηγούμενο- διαφοροποιημένες απαιτήσεις προϋποθέτουν ένα ευέλικτο, αξιόπιστο και δυναμικά προσαρμόσιμο δίκτυο με χρήση νέων τεχνολογιών, που αναπτύχθηκαν και συνεχίζουν να αναπτύσσονται μέσα από τις δράσεις έρευνας. Μια σύνοψη των τεχνολογιών αυτών παρουσιάζεται στην Εικόνα 7, ενώ ακολούθως αναλύονται στην συνέχεια αυτής της ενότητας.



Εικόνα 7: Τεχνολογίες-κλειδιά για την υλοποίηση δικτύων 5G [LGDLO20].

2.4.1 Χρήση χιλιοστομετρικού κύματος (mmWave)

Εκτός από το φάσμα συχνοτήτων κάτω από τα 6 GHz που χρησιμοποιείται από την πλειονότητα των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών, τα δίκτυα 5G αξιοποιούν και φάσμα υψηλότερων συχνοτήτων, ήτοι από 28 GHz έως 95 GHz [AA17]. Αυτό το εύρος φάσματος είναι γνωστό ως φάσμα χιλιοστομετρικού κύματος (mmWave). Πλεονεκτήματα από τη χρήση αυτών των ζωνών συχνοτήτων είναι η αύξηση του διαθέσιμου εύρους ζώνης, η προοπτική αύξησης του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων αλλά και η αποφυγή προβλημάτων συμφόρησης (congestion). Συγκριτικά, το 4G λειτουργεί συνήθως στις συχνότητες 700-2600 MHz. Ο λόγος αυτών των βελτιώσεων είναι η πολύ μεγάλη διαθεσιμότητα εύρους ζώνης ανά εξυπηρετούμενη συσκευή. Για παράδειγμα, σε τεχνολογίες 4G κάθε συσκευή μπορεί να χρησιμοποιήσει μερικά MHz φάσματος (περίπου 1,4MHz ως 20MHz), ενώ στα mmWave αυτό μπορεί να φτάσει τα μερικά GHz, επιτρέποντας έτσι ταχύτητες της τάξης των μερικών Tbps [AA17].

2.4.2 Massive MIMO και Beamforming

Τα δίκτυα 5G έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία μαζικών συστοιχιών πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (massive multiple-input multiple-output (MIMO) systems). Αυτή αποτελείται από μεγάλους σχηματισμούς κεραιών τόσο στους σταθμούς βάσης όσο και στις τελικές συσκευές 5G για τη δημιουργία πολλαπλών διαδρομών. Οι διαδρομές αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την επίτευξη μεγαλύτερων ρυθμών μετάδοσης είτε για τη βελτίωση της αξιοπιστίας της ζεύξης ή ως συνδυασμός και των δύο. Έτσι, με την τεχνολογία massive MIMO, τα δίκτυα 5G επιτυγχάνουν υψηλή φασματική αλλά και ενεργειακή αποδοτικότητα.

Η διαμόρφωση δέσμης (Beamforming) είναι ένα υποσύνολο του massive MIMO, η οποία ελέγχει την κατεύθυνση του κύματος μέσω του ελέγχου της φάσης και του πλάτους των σημάτων που στέλνονται από κάθε κεραία της συστοιχίας πολλαπλών κεραιών. Με αυτόν τον τρόπο, η διαμόρφωση δέσμης αναγνωρίζει τη διαδρομή που φαίνεται ως η «καταλληλότερη» για τη μετάδοση των δεδομένων σε έναν δέκτη, μειώνοντας παράλληλα την παρεμβολή με κοντινά τερματικά. Επιπλέον, το 5G χρησιμοποιεί τεχνολογία πλήρους αμφίδρομης επικοινωνίας (full-duplex) που διπλασιάζει τη χωρητικότητα των ασύρματων ζεύξεων στο φυσικό επίπεδο. Με την τεχνολογία full-duplex, μια συσκευή μπορεί να μεταδίδει και να λαμβάνει δεδομένα ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τις ίδιες συχνότητες. Με βάση αυτές τις νέες τεχνολογίες, τα δίκτυα 5G έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν τις νέες υπηρεσίες και εφαρμογές στο έπακρο, παρέχοντας το έναυσμα για νέες εφαρμογές και για να επιταχύνουν την υλοποίηση των «έξυπνων» πόλεων (“smart” cities).

2.4.3 Δίκτυα Μικρών Κυψελών (Small cells)

Εκτός από την αξιοποίηση της χρήσης μεγαλύτερου μέρους του φάσματος αλλά και της χρήσης εφαρμογών MIMO, το 5G περιλαμβάνει αρχιτεκτονικές με «πυκνά» καταναμημένα δίκτυα σταθμών βάσης σε υποδομές μικρών κυψελών (small cells). Αυτό επιτρέπει βελτιωμένη ευρυζωνική σύνδεση για κινητές επικοινωνίες (eMBB) και χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης καθιστώντας εφικτή τη μεταφορά υπολογισμών στο άκρο του δικτύου (edge computing).

Η τεχνολογία με τη χρήση small cells είναι μία εξαιρετικά αποδοτική λύση για την παροχή υπηρεσιών 5G σε κάθε σημείο, ειδικά σε αστικά περιβάλλοντα, όπου η κάλυψη με μακροκυψέλες δεν είναι αποδοτική τόσο από ενεργειακή άποψη όσο και από τις ταχύτητες που επιτυγχάνονται, ενισχύοντας έτσι τις υπηρεσίες ευρυζωνικότητας 5G

[RE19]. Η εγκατάσταση των small cells μπορεί να γίνει κατ'απαίτηση (on demand) με τη χρήση των Απομακρυσμένων Μονάδων Ραδιοδικτύου (Remote Radio Units ή RRUs) [RADWAN17], διευκολύνοντας έτσι το σχεδιασμό των παρόχων για την κάλυψη των περιοχών εξυπηρέτησης, αλλά και δημιουργώντας επιπρόσθετο φόρτο στο σύστημα διαχείρισης του ραδιοδικτύου.

2.4.4 Τεμαχισμός Δικτύου, μια τεχνολογία κλειδί για το 5G

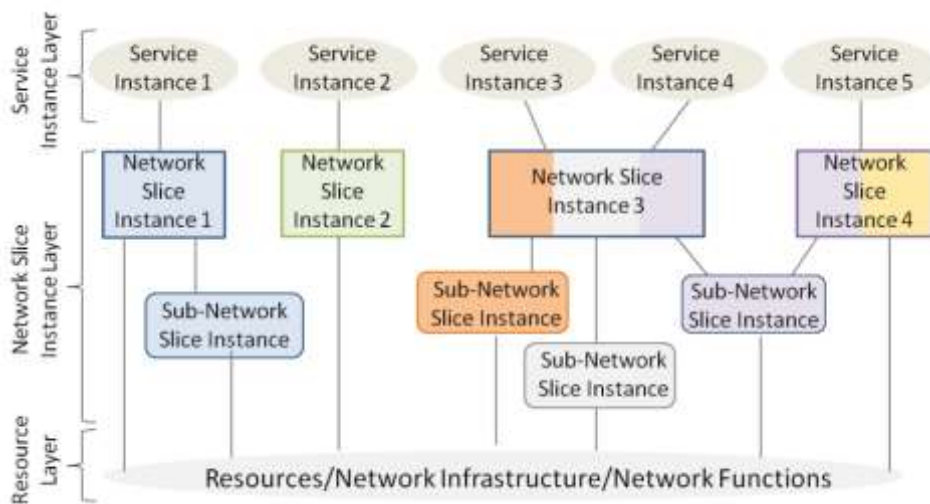
Ο τεμαχισμός (ή κατάτμηση) δικτύου (network slicing) αναφέρεται στην κατάτμηση του φυσικού δικτύου σε πολλαπλά εικονικά δίκτυα, το καθένα σχεδιασμένο και βελτιστοποιημένο για μια συγκεκριμένη εφαρμογή (ή υπηρεσία) [CSLDZK20]. Συγκεκριμένα, ένα «τεμάχιο» (ή «φέτα») (“slice”) δικτύου είναι ένα εικονικό δίκτυο που δημιουργείται πάνω από ένα φυσικό δίκτυο με τέτοιο τρόπο ώστε να δίνει την ψευδαίσθηση στον χρήστη-μισθωτή (tenant) του αντίστοιχου υποκείμενου τεμαχίου (slice) ότι χρησιμοποιεί ένα φυσικό δίκτυο αποκλειστικά για δική του χρήση (dedicated network). Με άλλα λόγια, ένα τεμάχιο δικτύου μπορεί να αξιολογηθεί ως ένα αυτόνομο δίκτυο με δικούς του εικονικούς πόρους, τοπολογία, ροή κίνησης (traffic) και κανόνες δημιουργίας υπηρεσιών (provisioning) [RBBD16].

Η αρχιτεκτονική που προτάθηκε για τον τεμαχισμό δικτύου από συνεργατικό πλαίσιο έρευνας και επενδύσεων 5G-PPP διαχωρίζεται σε πέντε διακριτά επίπεδα [5GPPARCH16]:

- το επίπεδο υπηρεσιών (service layer),
- το επίπεδο υποδομών (infrastructure layer),
- το επίπεδο ενορχήστρωσης (orchestration layer),
- το επίπεδο επιχειρηματικών λειτουργιών (business function layer) και
- το επίπεδο λειτουργιών δικτύου (network function layer).

Αντίθετα, η Συμμαχία NGMN⁸ (Next Generation Mobile Network Alliance) πρότεινε μια αρχιτεκτονική με τρία επίπεδα, όπως απεικονίζεται και στην Εικόνα 8, ήτοι: το επίπεδο επιχειρηματικής εφαρμογής (business application), το επίπεδο επιχειρηματικής δυνατότητας (business enablement) και το επίπεδο πόρων υποδομών (infrastructure resource) [NGMN15].

⁸ Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το ρόλο και τις δράσεις του φορέα NGMN Alliance, βλέπε: <https://www.ngmn.org/>



Εικόνα 8: Η αρχιτεκτονική τεμαχισμού δικτύου στο πλαίσιο της NGMN Alliance.

Κάθε δράση κατάτμησης δικτύου μπορεί να έχει τη δική της αρχιτεκτονική και τα δικά της πρωτόκολλα δικτύου. Οι σχετικές προσαρμόσιμες δυνατότητες της κάθε ενέργειας κατάτμησης μπορούν να περιλαμβάνουν ταχύτητα δεδομένων, ποιότητα επικοινωνίας, καθυστέρηση, αξιοπιστία, ασφάλεια και προσφερόμενες υπηρεσίες. Αυτές οι δυνατότητες παρέχονται πάντα με βάση μια συγκεκριμένη Συμφωνία Διάθεσης Υπηρεσίας συγκεκριμένης Στάθμης (Service Level Agreement – SLA) μεταξύ του εμπλεκόμενου διαχειριστή δικτύου και του πελάτη που χρησιμοποιεί τις επιμέρους κατατμήσεις. Επιπλέον, σε κάθε δράση κατάτμησης δικτύου υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του συνόλου των συναφών δικτυακών λειτουργιών, με στόχο τη βελτίωση της χρήσης δικτύου για κάθε εμπλεκόμενη συσκευή ή άλλου είδους εξοπλισμό.

Από την εμπορική-επιχειρηματική σκοπιά, μια κατάτμηση δικτύου μπορεί να περιλαμβάνει έναν συνδυασμό όλων των σχετικών πόρων δικτύου, των λειτουργιών και των λοιπών υποδομών που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση μιας συγκεκριμένης εμπορικής εφαρμογής και/ή μορφής υπηρεσίας, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων υποστήριξης λειτουργίας (Operation Support Systems – OSS), των συστημάτων υποστήριξης επιχειρηματικών δράσεων (Business Support Systems – BSS) και των λειτουργιών ανάπτυξης λογισμικού και IT (DevOps)⁹.

Είναι δυνατόν να υπάρχουν προκαθορισμένες κατατμήσεις δικτύου που μπορεί να ικανοποιούν συγκεκριμένες ανάγκες/απαιτήσεις στα μελλοντικά δίκτυα. Για παράδειγμα, μια κατάτμηση δικτύου για μαζικές βιομηχανικές συσκευές IoT μπορεί να

⁹ Για την απόδοση του όρου DevOps βλέπε: <https://en.wikipedia.org/wiki/DevOps>

χρειάζεται ένα «ελαφρύ» δίκτυο κορμού, καθόλου μηχανισμούς εναλλαγής δικτύων (handover) και ένα τεράστιο αριθμό συνδέσεων. Από την άλλη πλευρά, μια κατάτμηση δικτύου για ευρυζωνικές κινητές υπηρεσίες δύναται να χρειάζεται ένα δίκτυο κορμού μεγάλης χωρητικότητας, πλήρεις μηχανισμούς κινητικότητας (mobility) και χαμηλή καθυστέρηση επικοινωνίας. Οι κατατμήσεις δικτύου είναι λογικά απομονωμένες μεταξύ τους, αλλά οι εμπλεκόμενοι πόροι μπορούν να υπόκεινται σε μερισμό.

Σε κάθε περίπτωση, μια κατάτμηση δικτύου μπορεί να περιλαμβάνει αποκλειστικούς και/ή κοινόχρηστους πόρους (π.χ. σε όρους επεξεργαστικής ισχύος, αποθήκευσης και εύρους ζώνης) και να είναι απομονωμένη από τις υπόλοιπες κατατμήσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, η κατάτμηση δικτύου είναι μια καινοτόμος τεχνολογία που επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών λογικών δικτύων στη βάση ενός κοινού μεριζόμενου φυσικού δικτύου/υποδομής. Τα κυριότερα οφέλη αυτής της τεχνολογίας είναι, μεταξύ άλλων [ΚΚΤΗ19]:

- Μεγαλύτερη ελαστικότητα, ασφάλεια, αξιοπιστία και σταθερότητα των λειτουργιών μέσω της κατάτμησης του δικτύου από άκρη σε άκρη. Η ελαστικότητα επιτρέπει τη δυναμική κατανομή των πόρων στους χρήστες του δικτύου και άρα τη δυνατότητα για βελτιστοποίηση αυτών. Η υλοποίηση της ελαστικότητας είναι ουσιαστικά ταυτόσημη με την ικανότητα των λειτουργιών του δικτύου να κλιμακώνουν τους δεσμευμένους πόρους είτε προς τα κάτω (scale down) είτε προς τα πάνω (scale up) σε κάθε λειτουργία δικτύου και να επαναπρογραμματίζουν τις λειτουργίες των επιπέδων ελέγχου και δεδομένων .
- Απομονωμένες και παραμετροποιήσιμες κατατμήσεις, η κάθε μια βελτιστοποιημένη για τις ανάγκες της υπηρεσίας ή των υπηρεσιών που εκάστοτε εξυπηρετεί ή εξυπηρετούν. Η απομόνωση των κατατμήσεων είναι μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες που θα πρέπει οπωσδήποτε να παρέχεται με εγγύηση, κατά τη δημιουργία κατατμήσεων. Αυτή μπορεί να εγγυάται τόσο τις επιδόσεις κάθε κατάτμησης όσο και την ασφάλειά της, δημιουργώντας «ανεξαρτησία» μεταξύ των ενοικιαστών των πόρων του δικτύου (tenants) και απαγορεύοντας τη χρήση ή την τροποποίηση μιας κατάτμησης από άλλους ενοικιαστές. Η απομόνωση κατάτμησης είναι βασικό χαρακτηριστικό των λειτουργιών δικτύου, ενώ είναι απαραίτητη και για την υπό δίκαιους όρους κατανομή των πόρων μεταξύ των χρηστών του δικτύου.
- Ενσωματωμένη ευελιξία και αποτελεσματικότητα με την αυτοματοποιημένη ενορχήστρωση υπηρεσιών μέσω τεχνητής νοημοσύνης, από τις δοκιμές και την έναρξη έως και τη συντήρηση νέων υπηρεσιών. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται

εφικτή, η παραμετροποίηση από άκρο-σε-άκρο που εγγυάται ότι η χρήση των πόρων γίνεται με βέλτιστο τρόπο, ανάλογα με τις ανάγκες της υπηρεσίας κάθε χρήστη.

Στο πλαίσιο των προσπαθειών για την επίτευξη των πολλά υποσχόμενων δυνατοτήτων του 5G, ο τεμαχισμός δικτύου απαντά κατηγορηματικά σε κάθε φαινόμενη ανάγκη για αυξημένες επιδόσεις των δικτύων του μέλλοντος. Παράλληλα, υπόσχεται αύξηση των οφελών και των κερδών για τους παρόχους υπηρεσιών, αφού προσφέρεται σε αυτούς η δυνατότητα για παροχή νέων και κατά περίπτωση διαφοροποιημένων υπηρεσιών, ενώ μειώνεται και ο χρόνος διάθεσης αυτών των υπηρεσιών προς την αγορά (time to market).

Βασική προϋπόθεση για τον τεμαχισμό δικτύου είναι η τεχνολογία δικτύωσης οριζόμενη από το λογισμικό (Software Defined Networking ή SDN), η οποία επιτρέπει το διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου και σηματοδοσίας από το επίπεδο δεδομένων. Η ευελιξία του 5G δικτύου κορμού (5G Core (5GC) network) έχει βελτιωθεί σημαντικά μέσω αυτού του πλήρους διαχωρισμού. Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται εφικτή η δημιουργία ενός κεντρικού ελέγχου για όλο το δίκτυο, επιτρέποντας έτσι την καλύτερη διαχείριση και κατανομή των πόρων. Ταυτόχρονα όμως, κάτι τέτοιο δημιουργεί και προκλήσεις σε σενάρια κλιμακοθέτησης (scaling), όταν δηλαδή αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου και συνεπώς και οι πόροι που πρέπει να υπόκεινται σε έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο. Οι κεντρικοί ελεγκτές αναλαμβάνουν επίσης το ρόλο της προώθησης των πακέτων, μέσω προγραμματιζόμενων διεπαφών. Τέτοιοι ελεγκτές είναι οι Floodlight, Onix, NOX [GUDE08], ενώ η πιο διαδεδομένη διεπαφή για τον έλεγχο της ροής των πακέτων είναι το OpenFlow [MCKEOWN08]. Ένας τρόπος για την ελαχιστοποίηση του φόρτου στους κεντρικούς ελεγκτές είναι η μεταφορά κάποιων λειτουργιών, όπως για παράδειγμα η επεξεργασία συχνών συμβάντων, κοντά στους μεταγωγείς πακέτων (switches). Σε τέτοιες ιεραρχικές αρχιτεκτονικές, οι ελεγκτές χωρίζονται σε δύο επίπεδα, στους ριζικούς ελεγκτές (root controllers) και στους τοπικούς ελεγκτές (local controllers).

Μια άλλη βασική προϋπόθεση για την υλοποίηση του τεμαχισμού δικτύου είναι η τεχνολογία εικονικοποίησης λειτουργιών δικτύου (network function virtualization). Αυτές οι εικονικές λειτουργίες περιλαμβάνουν πόρους υποδομών, υπηρεσίες νέφους και πρόσβασης, καθώς και πόρους του δικτύου κορμού. Τα πλεονεκτήματα των NFV περιλαμβάνουν ενδεικτικά:

- Μείωση του κεφαλαιακού κόστους μέσω της λειτουργίας των εικονικών -η ιδεατών- λειτουργιών δικτύου (Virtual Network Functions - VNFs) σε υλισμικό (hardware) τρίτων και πληρωμή σύμφωνα με τη χρήση.
- Μείωση των λειτουργικών εξόδων, μέσω της μείωσης των αναγκών για ενοικίαση/αγορά χώρων, εξόδων ψύξης και ηλεκτρισμού.
- Αύξηση της ευελιξίας του συστήματος μέσω της πιο εύκολης κλιμακοθέτησης των υπηρεσιών.

Ο τεμαχισμός δικτύου περιλαμβάνει τον τεμαχισμό του ραδιοδικτύου και του δικτύου κορμού 5G. Με βάση τις πρόσφατες τεχνολογικές τάσεις που συνοδεύουν την ανάπτυξη των δικτύων 5G, φαίνεται ότι τα δίκτυα θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα ώστε να αναπτυχθούν με τη χρήση υλισμικού (hardware) πολλών διαφορετικών προμηθευτών (vendors) και με διαφορετικά σύνολα λειτουργιών σε διαφορετικές φυσικές τοποθεσίες του δικτύου (interoperability), ανάλογα με την υπηρεσία που εξυπηρετείται κάθε φορά. Μια κατάτμηση δικτύου πρέπει να έχει επίσης πρόσβαση σε διαφορετικού τύπου πόρους υπό τη μορφή εικονικών λειτουργιών δικτύου (VNFs).

Λαμβάνοντας υπόψη την ανάγκη για επανεξέταση της αρχιτεκτονικής των δικτύων, έχουν διατυπωθεί πολλές προτάσεις [MBK20]. Στο [ZLCZ16], οι συγγραφείς έχουν εισαγάγει την έννοια του NSaaS (Network Slice as-a-Service) με μοντέλα και διαχείριση υπηρεσιών. Έχουν περιγράψει τρεις υλοποιήσεις του NSaaS που συνίστανται σε μόνο τεμαχισμό του Core Network (CN), μόνο τεμαχισμό του Radio Access Network (RAN) και σε τεμαχισμό τόσο του CN όσο και του RAN.

2.4.4.1 Τεμαχισμός Ραδιοδικτύου (RAN slicing)

Υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα μερισμού (sharing) των πόρων ραδιοδικτύου, ανάλογα με το βαθμό απομόνωσης των κατατμήσεων. Το ραδιοδίκτυο μπορεί να χειρίζεται το φάσμα συχνοτήτων σαν ένα μέσο διάδοσης αποκλειστικά δεσμευμένο από μια κατάτμηση ή σαν ένα μέσο που δυναμικά υπόκειται σε μερισμό από τις κατατμήσεις [AFOLABI18]. Στο πρώτο μοντέλο, μια κατάτμηση RAN αποτελείται από απομονωμένους πόρους επιπέδου ελέγχου (control plane), επιπέδου δεδομένων (user plane), χρονοπρογραμματιστή επιπέδου πρόσβασης μέσου (MAC scheduler) και φάσματος. Κάθε κατάτμηση έχει τις δικές της λειτουργίες RRC (Radio Resource Control), PDCP (Packet Data Convergence Protocol), RLC (Radio Link Control) και MAC (Medium Access Control) και ένα ποσοστό αποκλειστικά δεσμευμένων πλοκάδων φυσικών πόρων (Physical Resource Blocks ή PRBs). Παρόλο που οι δεσμευμένοι πόροι διαβεβαιώνουν τη δέσμευση πόρων ανά κατάτμηση (από άποψη απαιτήσεων χωρητικότητας και

καθυστερήσης), το μοντέλο αυτό μειώνει την ελαστικότητα του συστήματος και περιορίζει το κέρδος πολυπλεξίας (multiplexing gain). Επιπρόσθετα το μοντέλο αυτό περιορίζει τον ιδιοκτήτη της κατάτμησης να τροποποιήσει το ποσοστό των πόρων (π.χ. PRBs) που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια ζωής της.

Από την άλλη μεριά, το δεύτερο μοντέλο των υποκείμενων σε μερισμό (ή διαμοιρασμένων) πόρων, επιτρέπει στις κατατμήσεις ώστε να μοιράζονται το επίπεδο ελέγχου, τον χρονοπρογραμματιστή MAC και το φάσμα. Συγκεκριμένα, οι PRBs που ανήκουν στο κοινώς χρησιμοποιούμενο και μεριζόμενο φάσμα (shared spectrum) υπόκεινται σε έλεγχο και σε διαχείριση από έναν κοινό χρονοπρογραμματιστή MAC, ο οποίος κατανέμει τους πόρους στις κατατμήσεις με βάση συγκεκριμένες πολιτικές και εμπορικές συμφωνίες. Αυτή η λύση ενισχύει την ελαστικότητα του συστήματος ως προς τη διαχείριση των πόρων, αλλά προφανώς δεν μπορεί να εγγυηθεί την ικανοποίηση των απαιτήσεων ποιότητας κάθε κατάτμησης και της απομόνωσης. Με άλλα λόγια υπάρχει μια ισολογιστική σχέση (trade-off) κέρδους-απώλειας μεταξύ των δύο μοντέλων, δίνοντας τη δυνατότητα για ανάπτυξη υβριδικών μοντέλων.

Βασικό συστατικό του τεμαχισμού ραδιοδικτύου είναι ο λεγόμενος προγραμματισμός RAN, που αναφέρεται και ως SD-RAN (software-defined RAN). Με την τεχνολογία αυτή αφαιρείται (abstracted) η έννοια των πόρων ραδιοδικτύου προς τα ανώτερα επίπεδα του δικτύου και δίνεται τη δυνατότητα για τη δημιουργία προγραμματιστικών διεπαφών προγράμματος εφαρμογής (Application Programming Interfaces - APIs) προς άλλα στοιχεία του συστήματος 5G, όπως για παράδειγμα προς ενορχηστρωτές υπηρεσιών (service orchestrators ή SOs) [GUDIPATI13].

2.4.4.2 Τεμαχισμός Δικτύου Κορμού (core network)

Τα τελευταία χρόνια, το δίκτυο κορμού έχει εξελιχθεί σημαντικά και ήδη με την εισαγωγή των δικτύων 4G έχει αναπτυχθεί σε ένα δίκτυο πλήρως βασισμένο στο πρωτόκολλο του Διαδικτύου (Internet Protocol – IP). Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών εικονικοποίησης (virtualization) και λογισμικοποίησης (softwarization), το δίκτυο κορμού εξελίχθηκε σε ένα δίκτυο εικονικών λειτουργιών δικτύου (NFVs), το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή της λογικής της κατάτμησης δικτύου. Οντότητες του δικτύου πυρήνα, όπως το MME (Mobility Management Entity), το HSS (Home Subscriber Server), το PGW (Packet Data Network Gateway), το SGW (Serving Gateway) και το PCRF (Policy and Charging Rules Function), μπορούν πλέον να «τρέχουν» σε πλατφόρμες εικονικοποίησης (virtualization platforms). Το γεγονός αυτό επιτρέπει την ευελιξία, ελαστικότητα και εγγύηση ποιότητας υπηρεσίας, καθώς ο πάροχος υπηρεσιών μπορεί

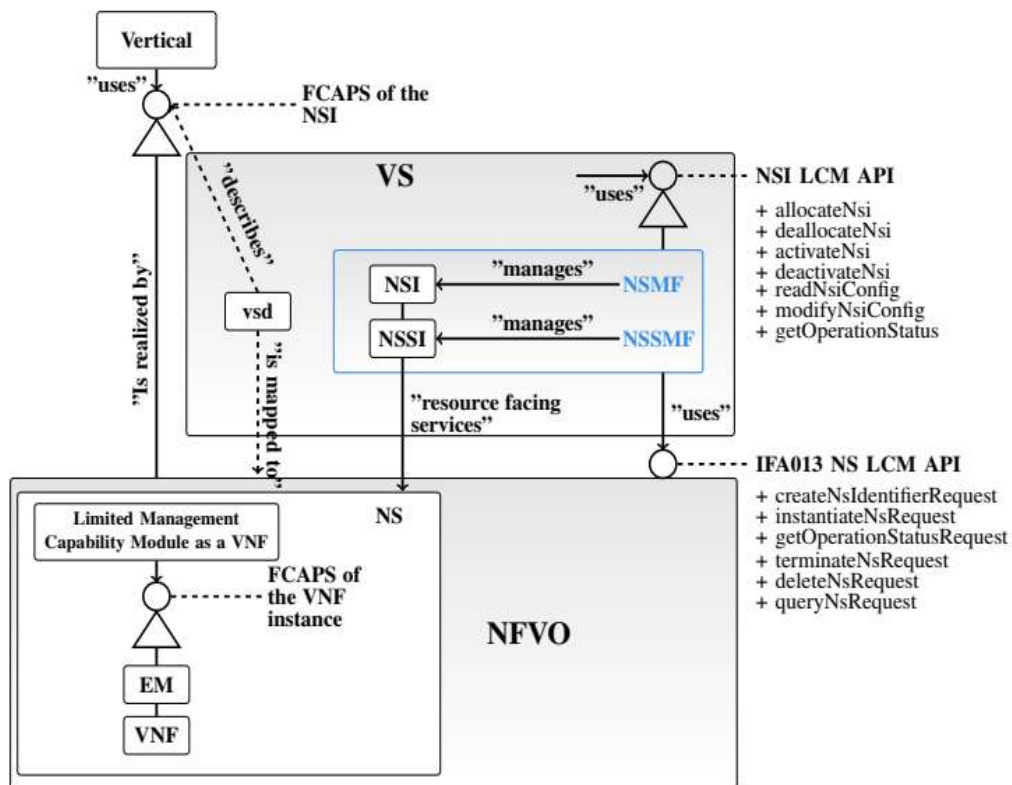
πλέον να αναπτύσσει πολλαπλά αντίγραφα του πυρήνα εξελιγμένου πακέτου (Evolved Packet Core - EPC), το καθένα από τα οποία μπορεί να εξυπηρετεί διαφορετικού τύπου συνδρομητές, με βάση τις απαιτήσεις συγκεκριμένων υπηρεσιών. Επίσης είναι δυνατή η εμπλοκή μόνο εκείνων των λειτουργιών που είναι απαραίτητες για μια υπηρεσία, όπως για παράδειγμα η μη εμπλοκή του MME σε εφαρμογές όπου δεν υπάρχει -ή είναι περιορισμένη- η κινητικότητα των συσκευών, σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα. Επιπλέον, μέσω της νέας αυτής λειτουργικότητας μπορούν να «τρέξουν» αντίγραφα του EPC σε τοποθεσίες εγγύτερα των τερματικών συσκευών, ικανοποιώντας έτσι απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης μετάδοσης.

Με άλλα λόγια, δημιουργήθηκε η δυνατότητα για παροχή υπηρεσιών πυρήνα εξελιγμένου πακέτου ως υπηρεσία (EPCaaS) [TALEB15]. Με την ίδια λογική προσφέρονται ως υπηρεσίες η υπολογιστική ισχύς και ο αποθηκευτικός χώρος, ώστε στο σύνολο να είναι δυνατή η παροχή υπηρεσιών συνδεσιμότητας (E2E connectivity) ως υπηρεσία. Έτσι, είναι δυνατή η παροχή συνδεσιμότητας LTE ως υπηρεσία σε παρόχους υπηρεσιών που μπορεί να μην έχουν στην κατοχή τους φυσικό τηλεπικοινωνιακό εξοπλισμό, παρά μόνο εικονικές μηχανές που «τρέχουν» τις αντίστοιχες λειτουργίες δικτύου ή ακόμα και να νοικιάζουν εξολοκλήρου την υπηρεσία, χωρίς να έχουν στην κατοχή τους εικονικές μηχανές [TALEB16].

2.4.4.3 NSaaS (Network Slice as-a-Service)

Όπως θα αναλυθεί και σε επόμενα κεφάλαια, η έννοια του NSaaS δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την υποστήριξη επιχειρηματικών μοντέλων B2B (Business to business), B2C (Business to consumer) και B2B2C (business to business to consumer), ενισχύοντας έτσι την αγορά των εικονικών παρόχων. Στην Εικόνα 9 περιγράφεται ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός του NSaaS. Ο πάροχος υπηρεσιών μέσω των λειτουργιών διαχείρισης φετών-κατατμήσεων του δικτύου (Network Slice Management Function - NSMF) εκτίθεται στα χαρακτηριστικά των φετών και τις διαχειριστικές ικανότητες που του διατίθενται για αυτές. Ο πάροχος μπορεί ακόμα να διαπραγματευτεί με τον πάροχο NSaaS το βαθμό έκθεσης στα χαρακτηριστικά διαχείρισης της υπόστασης τεμαχίου -ή φέτας- δικτύου (Network Slice Instance - NSI), όπως για παράδειγμα πρόσβαση σε λειτουργίες δημιουργίας νέων υπηρεσιών, λειτουργιών ασφαλείας κτλ. [3GPPTS28.530]. Η κατάτμηση δικτύου και η επακόλουθη δημιουργία φετών δικτύου έχει δύο διεπαφές, μια προς τον πελάτη για την υποστήριξη των εφαρμογών (verticals) και μια προς τους πόρους, για την αντιστοίχιση των απαιτήσεων της εφαρμογής με τους πόρους του δικτύου.

Αν και η πρόταση που παρουσιάζεται έχει ενδιαφέρον υπόβαθρο για το NSaaS, δεν φαίνεται να είναι συμβατή με το πλαίσιο ETSI NFV Management and Orchestration (MANO). Ο τεμαχισμός δικτύου που εφαρμόζεται στο RAN έχει προταθεί στο [KMZP13]. Εκεί, οι συγγραφείς έχουν προτείνει ένα σύστημα για τον τεμαχισμό ασύρματων πόρων σε ένα κυψελοειδές δίκτυο, για κοινή χρήση μεταξύ παρόχων εικονικών δικτύων κινητής τηλεφωνίας (Mobile Virtual Network Operators - MVNOs) με ελάχιστες αλλαγές στο σχεδιασμό του δικτύου πρόσβασης και με στόχο τη βελτιστοποίηση της συνολικής εκμετάλλευσης των ραδιοπόρων.



Εικόνα 9: NSaaS - Αρχιτεκτονικός σχεδιασμός.

Στοχεύοντας σε παρόμοια αποτελέσματα για αποδοτική κοινή χρήση του RAN μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών, στην εργασία [GCSB15] οι συγγραφείς έχουν σχεδιάσει έναν ελεγκτή για μοντέλο πολλαπλών «ενοικιαστών» (multi-tenant) για ευέλικτη κοινή χρήση πόρων RAN μεταξύ τους. Ο τεμαχισμός του Δικτύου Κορμού (Core Network – CN) έχει προταθεί στο [NK14], όπου οι πόροι κατανέμονται σύμφωνα με τη ζήτηση φόρτου και μειώνουν τα CAPEX – OPEX. Το DECOR [3GPPRel15 TR 23.707] είναι μια προσέγγιση του 3GPP για τον τεμαχισμό του CN, για την ικανοποίηση των λειτουργικών απαιτήσεων διαφόρων συνόλων υπηρεσιών. Ο τεμαχισμός του δικτύου με την λογική E2E παρουσιάστηκε στο [AZTGKSH17], όπου οι συγγραφείς έχουν αναπτύξει έναν μηχανισμό

ελέγχου δικτύου που ενεργοποιείται από τις συσκευές και που επιτρέπει στις συσκευές 5G να ανακαλύπτουν, να επιλέγουν και να έχουν πρόσβαση στις πιο κατάλληλες καταταμίσεις-τεμαχιοποιήσεις δικτύου από άκρο-σε-άκρο.

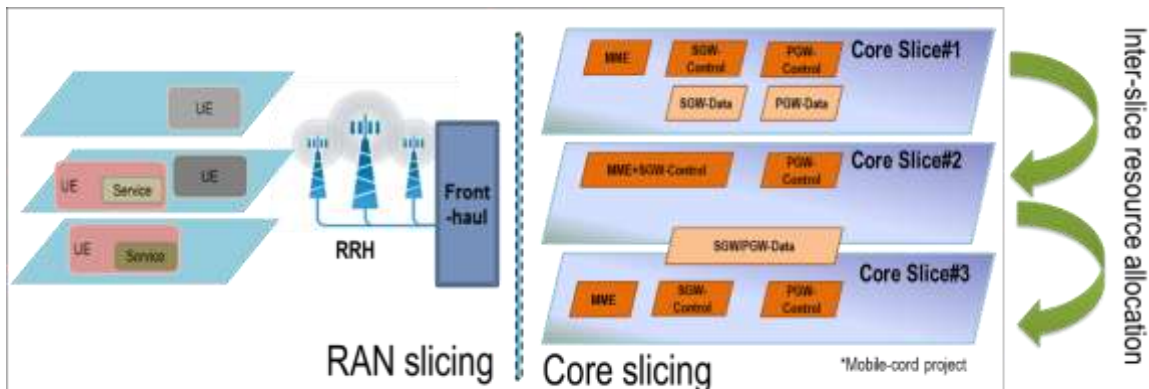
Όσον αφορά στην ανάπτυξη προδιαγραφών, ο τεμαχισμός δικτύου ορίστηκε πιο πρόσφατα από τις δράσεις στο πλαίσιο 3GPP για το σύνολο των λειτουργιών που απαιτούνται για την επιλογή και διαχείριση των καταταμίσεων δικτύου [3GPPRel15 TR 28.801], [3GPPRel15 TS 28.531]. Ωστόσο, μέχρι στιγμής δεν υπάρχει κάποια σταθερή και «ενοποιημένη» έκδοση προδιαγραφών που να ικανοποιεί τις διάφορες απαιτήσεις σε επίπεδο παρόχων υπηρεσιών, όπως αναφορικά με τη διαλειτουργικότητα, τη δυνατότητα κλιμακοθέτησης, τις ελεγχόμενες επιδόσεις, την ασφάλεια, τις τιμολογήσεις, κτλ. Τα παραπάνω καθιστούν σαφείς τις πραγματικές προκλήσεις για την εφαρμογή πλέον δράσεων δυναμικού τεμαχισμού δικτύου, σε ένα εκτενές θεματικό πεδίο δράσεων.

Κεφάλαιο 3. Η Ανάγκη για Δυναμικό Τεμαχισμό του Δικτύου

3.10ι Νέες Απαιτήσεις στις Τηλεπικοινωνίες

Παρά τις ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία 5G και συγκεκριμένα στον τεμαχισμό του δικτύου, υπάρχει ακόμα μεγάλη απόσταση να καλυφθεί έως ότου όλοι οι πόροι του δικτύου μπορέσουν να τεμαχιστούν και να υποστούν σε μερισμό, με τρόπο δυναμικό για όλους τους εμπλεκόμενους παρόχους δικτύου/υπηρεσιών (network/service providers) και για τις διαθέσιμες υπηρεσίες. Αυτή η απαίτηση είχε ήδη σημειωθεί από την NGMN Alliance [NGMN15] περιγράφοντας κατηγορηματικά την ανάγκη για παροχή λύσεων με δυναμικό τρόπο, σχεδιασμένων και προσαρμοσμένων με βάση τις εκάστοτε ανάγκες του παρόχου υπηρεσιών. Τα σημερινά δίκτυα απέχουν αρκετά από τη συγκεκριμένη λογική, αφού είναι σχεδιασμένα με μία μάλλον «στατική» θεώρηση και με κύριο γνώμονα την παροχή υπηρεσιών με βάση την προκαθορισμένη μέγιστη χωρητικότητα που εκάστοτε θα απαιτηθεί. Η προσέγγιση αυτή οδηγεί, εξορισμού, σε μη εύλογη διαχείριση έως και σε σπατάλη πόρων, αφού οι πόροι του δικτύου μένουν ανενεργοί στο μεγαλύτερο διάστημα λειτουργίας του «περιμένοντας» το αναμενόμενο «παράθυρο» της μέγιστης κατανάλωσης (peak hour). Οι ανενεργοί πόροι θα μπορούσαν να υποστούν σε μερισμό και να χρησιμοποιηθούν για τις υπηρεσίες, όπως π.χ. προτείνουν τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Για να καταστεί αυτό, όμως, εφικτό, χρειάζεται επανασχεδιασμός του τρόπου που υλοποιούνται οι λειτουργίες δικτύου. Η προσέγγιση που προτείνεται στην Εικόνα 10, δηλαδή ο τεμαχισμός δικτύου από άκρη σε άκρη μέσω του τεμαχισμού τόσο του ραδιοδικτύου όσο και του δικτύου κορμού, αλλά και η ανακατανομή πόρων μεταξύ των φετών του δικτύου κορμού (interslice resource allocation) επιτρέπει την αναγκαία ευελιξία για βέλτιστη κατανομή των πόρων E2E.

Ο τεμαχισμός δικτύου καθιστά εφικτή την υλοποίηση του μοντέλου που θεωρεί το «δίκτυο ως υπηρεσία» (Network as-a-Service – NaaS). Αυτό το μοντέλο μπορεί, με ευέλικτο τρόπο, να μοιράζει τους πόρους του υποκείμενου δικτύου και να δημιουργεί εκείνες τις κατατμήσεις-φέτες ανάλογα με τις δυναμικές ανάγκες της κάθε συναφούς υπηρεσίας 5G. Ως συνέπεια, προκύπτει απευθείας η ανάγκη για εκείνους τους μηχανισμούς που θα διαχειρίζονται τον κύκλο ζωής των κατατμήσεων-φετών.



Εικόνα 10: E2E βελτιστοποίηση πόρων δικτύου [AFOLABI18]

Το πρόβλημα αυτό, της βέλτιστης διαχείρισης, παραμένει ανοικτό και συνιστά μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις για τη βιώσιμη λειτουργία του δυναμικού τεμαχισμού. Έχοντας ως στόχο την εξυπηρέτηση του μέγιστου πλήθους διαφοροποιημένων αιτήσεων υπηρεσιών (service requests), οι διαχειριστές των δικτύων 5G πρέπει να διαθέτουν τις απαραίτητες VNFs (Virtual Network Functions – Υπηρεσίες Εικονικοποίησης Δικτύου) [CSKG18] και να κατανέμουν τους πόρους του δικτύου γρήγορα και αποτελεσματικά για την κατασκευή του εκάστοτε τεμαχίου/φέτας δικτύου [GL08]. Επιπρόσθετα, οι δράσεις κατατμήσεων θα πρέπει να κλιμακώνονται δυναμικά [ITU08] και ανάλογα με τον διακυμαινόμενο φόρτο υπηρεσιών. Η διαχείριση των τεμαχίων δικτύου έγκειται κυρίως στους διαχειριστές του δικτύου, αλλά ο δυναμικός χαρακτήρας απαιτεί η εν λόγω διαχείριση να γίνεται και από τις προκύπτουσες κατατμήσεις -ή τα αντίστοιχα τεμάχια/φέτες- με κάποιο αυτοματοποιημένο και κατά το δυνατό ασφαλή τρόπο, ώστε να επιταχύνεται η βελτιστοποίηση της ποιότητας της παρεχόμενης υπηρεσίας. Ως εκ τούτου, φαίνεται ότι ο δυναμικός τεμαχισμός θα επωφεληθεί σημαντικά από τις δράσεις αυτοματισμού του δικτύου (network automation), που διαρκώς εξελίσσονται.

Ειδικά σε σενάρια πολλαπλών τομέων (multi-domain¹⁰), όπου τα τεμάχια/φέτες μπορούν χρησιμοποιηθούν από πολλούς και διαφορετικούς εμπλεκόμενους «παίκτες» (οι οποίοι εμπλέκονται είτε ως προμηθευτές (providers) είτε ως καταναλωτές (consumers) είτε με οποιονδήποτε άλλο ρόλο), οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές έχουν αρκετά μειονεκτήματα και ουσιαστικά καθίστανται μη επαρκώς λειτουργικές για τους λόγους που θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα [SMYSG19]. Γίνεται επομένως κατανοητό, ότι στα σενάρια πολλαπλών τομέων, οι τομείς αυτοί βρίσκονται με μεγάλη πιθανότητα σε διαφορετικά σημεία. Για παράδειγμα, ένας πάροχος κινητών επικοινωνιών στην Ελλάδα, μπορεί να χρησιμοποιεί έναν τομέα υποδομών στην Γερμανία για να παρέχει υπηρεσίες περιαγωγής στους πελάτες του χωρίς να εξαρτάται από τον τοπικό πάροχο. Σε αυτό το σενάριο υπάρχει η επικοινωνία μεταξύ των τομέων υποδομών και τομέα διαχείρισης μέσω του δικτύου μετάδοσης. Σε τέτοια σενάρια πολλαπλών τομέων, επομένως, που εξορισμού είναι κατανεμημένοι, μπορούν με μεγάλη πιθανότητα να επηρεαστούν από προβλήματα στο δίκτυο (Wide Area Network – WAN) και άρα να επηρεαστούν οι λειτουργίες του ενορχηστρωτή VNF. Για παράδειγμα, καθυστερήσεις στο WAN θα καθυστερήσουν τη μετάδοση των παρακολουθούμενων Βασικών Δεικτών Επιδόσεων (Key performance Indicators – KPIs) που είναι απαραίτητοι για το συντονισμό των όλων VNFs σε όλους τους τομείς. Αυτό με τη σειρά του, θα έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της ανάλυσης των KPIs από τους πολλαπλούς τομείς και τελικά επηρεάζεται η ορθή διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs όπως και οι αποφάσεις για την κατανομή των πόρων. Επιπλέον, σε σενάρια πολλαπλών τομέων, η αλλαγή απαιτήσεων υπηρεσιών οδηγεί σε δυσκολίες επανεκτίμησης των αποφάσεων ενορχήστρωσης [GARCIA20].

3.2 Περιορισμοί Υπαρχουσών Αρχιτεκτονικών

Οι απαιτήσεις των νέων επιχειρηματικών μοντέλων, όπου όλοι οι πόροι δικτύου υπόκεινται σε εκμετάλλευση όσο το δυνατό περισσότερο έως στο έπακρο, και με δυναμικό τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται *αφενός μεν* η μέγιστη αποδοτικότητα δικτύου, *αφετέρου δε* η ικανοποίηση των διαφορετικών υπηρεσιών, απαιτούν νέες δυνατότητες

¹⁰ Ο όρος domain εδώ δεν πρέπει να συγχέεται με τον δικτυακό όρο domain. Εδώ ο όρος αναφέρεται σε τομείς λειτουργιών και ρόλων. Για παράδειγμα, ο τομέας υποδομών (infrastructure domain) περιλαμβάνει τις εικονικοποιημένες υποδομές και τους αντίστοιχους πόρους. Ο τομέας ενοικιαστών (tenant-domain) περιλαμβάνει τα VNF που διαχειρίζεται ο κάθε ενοικιαστής.

όπως ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου. Ωστόσο, ο δυναμικός χαρακτήρας απαιτεί ώστε όλα τα επιμέρους στοιχεία του δικτύου (δηλαδή το δίκτυο κορμού, το δίκτυο μεταφοράς, το δίκτυο πρόσβασης, το ακραίο νέφος και το νέφος κορμού) να υλοποιούνται μέσω VNFs και να συνεργάζονται δυναμικά από άκρο-σε-άκρο για τη βελτιστοποίηση του επικείμενου τεμαχισμού.

3.2.1 Σύντομη Παρουσίαση του ETSI NFV MANO

Η βάση για τη διαχείριση των δράσεων κατατμήσεων δικτύου και για τη δημιουργία τεμαχίων/φετών είναι το πλαίσιο Διαχείρισης και Ενορχήστρωσης NFV (NFV Management and Orchestration – (MANO)). Στην Εικόνα 11 απεικονίζεται η βασική αρχιτεκτονική, όπως προτάθηκε από τον οργανισμό προτυποποίησης ETSI [ETSIMANO14] και η οποία αποτελείται από τρεις βασικές λειτουργικές πλοκάδες (ομάδες δεδομένων) – blocks:

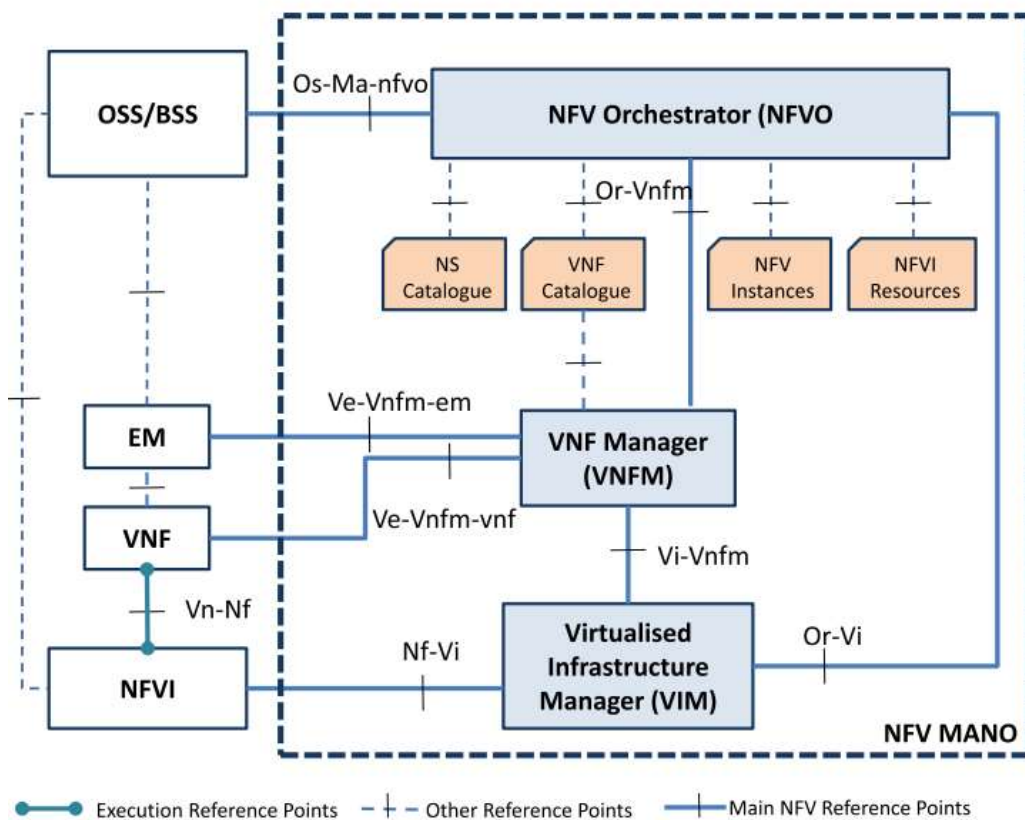
- Διαχειριστής Εικονικοποιημένης Υποδομής (Virtualized Infrastructure Manager – VIM) για τη διαχείριση των πόρων της υποδομής NFV, όπως οι υπολογιστικοί πόροι, οι πόροι δικτύου και οι αποθηκευτικοί πόροι.
- Διαχειριστής Εικονικοποιημένων Λειτουργιών Δικτύου (Virtualized Network Function Manager – VNFM) για τη διαχείριση του κύκλου ζωής (Lifecycle Management – LCM) των VNFs που αναπτύσσονται και ενεργοποιούνται στην υποδομή NFV (NFV Infrastructure – NFVI).
- Ενορχηστρωτής NFV (NFV Orchestrator – NFVO) για τη διαχείριση των υπηρεσιών και των πόρων των τεμαχίων του δικτύου, δημιουργώντας εικονικές συνδέσεις πολλαπλών VNFs και οι οποίες χαρακτηρίζονται από τα Γραφήματα Προώθησης VNF (VNF Forwarding Graph ή VNF-FG).

Αυτές οι τρεις δομικές πλοκάδες δεδομένων αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω προτυποποιημένων διεπαφών (standardized interfaces) οι οποίες δημιουργήθηκαν για τα αντίστοιχα σημεία αναφοράς (reference points) και οι οποίες εξυπηρετούν τη διαχείριση του κύκλου ζωής των εικονικών πόρων που ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς πρόσβασης (realms) [SMYSG19].

Επιπρόσθετα αυτών των πλοκάδων, υπάρχουν διάφορα άλλα στοιχεία (π.χ. ο περιγραφέας (Descriptor) των VNF και της Υπηρεσίας Δεδομένων (Network Service – NS)) που περιγράφουν τις απαιτήσεις λειτουργίας, πόρων, επιδόσεων και πολιτικών των NFVs και των τεμαχίων δικτύου και υπηρεσιών. Το σύστημα VNF MANO κατανέμει τους πόρους, αναπτύσσει και ενεργοποιεί τα VNFs/NSs πάνω από το NFVI σύμφωνα με τις

απαιτήσεις και τα αιτήματα στα αρχεία των περιγραφών VNF και NS (δηλαδή των VNFD και NSD, αντίστοιχα).

Οι πολλαπλές «υποστάσεις» (instances) των τεμαχίων δικτύου (που μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικούς «ενοικιαστές» (tenants) ή στον πάροχο δικτύου) υπόκεινται σε διαχείριση από το NFV MANO. Ως μέρος της διαχείρισης του κύκλου ζωής, το σύστημα έχει τη δυνατότητα για ενεργοποίηση, μετακίνηση, κλιμακοθέτηση, αναβάθμιση και τερματισμό των VNF/NS ή για να ενορχηστρώσει τους πόρους δικτύου με βάση ένα σύνολο συγκεκριμένων κανόνων πολιτικής (policy rules).



Εικόνα 11: Το πλαίσιο NFV Management and Orchestration (MANO) [ETSI MANO14].

Η δυναμική, E2E διαχείριση των πόρων δικτύου και η δημιουργία τεμαχίων δικτύου είναι απαραίτητη για τη λειτουργία των προτεινόμενων μοντέλων πολλαπλών τομέων (multi-domain models), με βάση τα οποία διαφορετικοί ενδιαφερόμενοι χρησιμοποιούν το σύνολο του δικτύου για την παροχή υπηρεσιών κάθε τύπου. Το πρόβλημα των πολλαπλών τομέων αναφέρεται επιφανειακά σε αναφορές του ETSI NFV ISG (Industry Specification Group). Εκεί γίνεται λόγος για τη διαχείριση της συνδεσιμότητας μια

δράσης κατάτμησης δικτύου και δημιουργίας τεμαχίων με πολλά NFVI-PoPs (points of presence) και προτείνεται η παράκαμψη της κεντρικής οντότητας διαχείρισης και ενορχήστρωσης τομέων (Central Orchestration Domain) μέσω κατανεμημένων τομέων ενορχήστρωσης (Orchestration Domains – ODOs), ώστε κάθε NFVI-PoP να έχει τη δική του στοίβα πρωτοκόλλων.

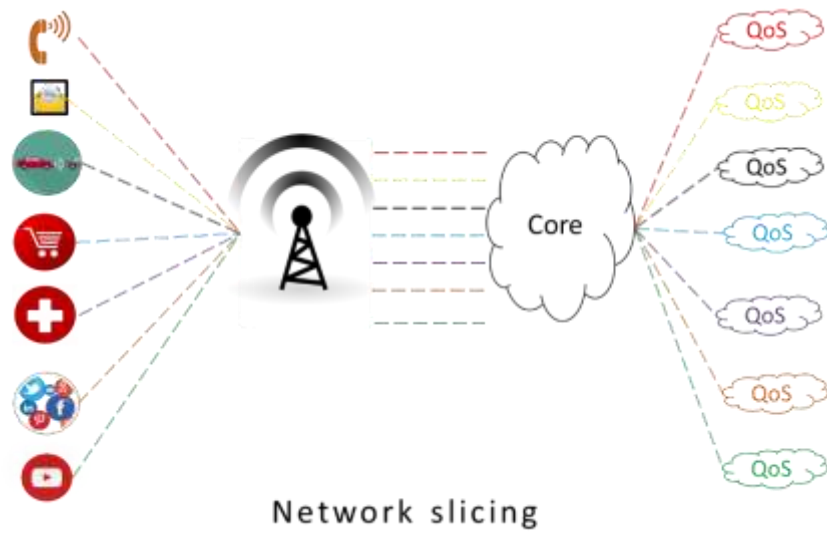
3.3 Οι Δυνατότητες του Δυναμικού Τεμαχισμού Δικτύου

Η εφαρμογή του δυναμικού τεμαχισμού δικτύου δύναται να επιφέρει μια σειρά λειτουργιών και χαρακτηριστικών, απαραίτητων για την υλοποίηση των νέων απαιτήσεων στα εμπορικά μοντέλα παροχής τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών. Πιο συγκεκριμένα [NOKIA16], [SCP16] διακρίνονται τα ακόλουθα:

- Κάλυψη των απαιτήσεων πραγματικών επιχειρηματικών μοντέλων, σχεδιασμένων για την πλήρωση συγκεκριμένων βιομηχανικών αναγκών, μέσα σε ένα γενικότερο πλαίσιο υποστήριξης πολλαπλών «μισθωμάτων» (multi-tenancy). Ο στόχος του Multi-tenancy μοντέλου είναι η μείωση τόσο των λειτουργικών (Operational Expenditure – OPEX), όσο και των κεφαλαιακών εξόδων (Capital Expenditure – CAPEX), αφού επιτρέπει στους παρόχους υποδομών να εκμεταλλεύονται βέλτιστα τους πόρους που διαθέτουν, συμπεριλαμβανομένου του φάσματος και των υποδομών τους, παρέχοντας ταυτόχρονα υπηρεσίες και μερισμό των διαθέσιμων πόρων.
- Ουσιαστική μείωση του χρόνου δημιουργίας νέων υπηρεσιών και ενεργοποίησης αυτών, με επακόλουθο την αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου (time to market).
- Δημιουργία σημαντικής ικανότητας «ελαστικότητας» στην υποδομή του δικτύου, καθιστώντας την ικανή ώστε να προσαρμόζεται και να ανταποκρίνεται σε διακυμάνσεις φορτίου κίνησης.
- Πιθανή δημιουργία πλαισίου πρόβλεψης των διακυμάνσεων και προσαρμογής των αντίστοιχων υπηρεσιών και του δικτύου σε πραγματικό χρόνο, για επίτευξη ακόμα μεγαλύτερης αποδοτικότητας.
- Δημιουργία πλαισίου για την υποστήριξη ανοικτών και καινοτόμων υπηρεσιών με τον συνδυασμό πολλών διαφορετικών τομέων της βιομηχανίας.

- Υιοθέτηση χαρακτηριστικών προγραμματισμού σε επίπεδο δικτύου και σε επίπεδο υπηρεσιών, επιτρέποντας τη γρήγορη και εύκολη ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων δικτύου ή την επέκταση υπαρχόντων και τη δημιουργία νέων υπηρεσιών και συναφών εμπορικών μοντέλων.
- Ενσωμάτωση τεχνικών διαχείρισης και/ή ενορχήστρωσης για τη δυναμική παραμετροποίηση του δικτύου, για βελτίωση των διατεματικών επιδόσεων.
- Υποστήριξη υψηλού επιπέδου αυτοματοποίησης, με χρήση μεθόδων ανάλυσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης.

Οι προμηθευτές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού λαμβάνουν σοβαρά υπόψη τον όρο «δυναμικός» για τον τεμαχισμό του δικτύου, διότι αυτό είναι εκείνο που ουσιαστικά διαφοροποιεί την έννοια του συμβατικού τεμαχισμού [3GPPRel15 TS 28.531] από την τεχνολογία που θα επιτρέψει στους παρόχους τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών να δημιουργήσουν και να προσφέρουν σε πραγματικό χρόνο E2E εικονικά δίκτυα, τα οποία θα εξυπηρετούν οποιαδήποτε υπηρεσία και εφαρμογή, με το βέλτιστο δυνατό τρόπο [KK21]. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, ο πάροχος υπηρεσιών μπορεί μέσω του δυναμικού τεμαχισμού να παρέχει διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας (QoS), ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής/υπηρεσίας που εξυπηρετείται. Στο πλαίσιο αυτό, Υπηρεσίες αυτόνομης οδήγησης θα εξυπηρετηθούν από εκείνες τις δράσεις κατάτμησης δικτύου (Core Slicing και RAN slicing) που θα προσφέρουν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης και αξιοπιστία. Την ίδια στιγμή, μια εφαρμογή ρευμάτωσης βίντεο (video streaming) θα εξυπηρετηθεί από άλλη κατάτμηση με διαφορετική QoS, λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα διαχείρισης κατατμήσεων για τις υπόλοιπες υπηρεσίες, ώστε να έкаστη να εξακολουθεί να εξυπηρετείται με την απαιτούμενη QoS. Ο δυναμικός τεμαχισμός κατανέμει τους πόρους του δικτύου από άκρο-σε-άκρο για τη μεγιστοποίηση της χρήσης τους (utilization), λαμβάνοντας υπόψη την QoS για κάθε υπηρεσία καθώς επίσης και άλλες παραμέτρους (όπως π.χ. τη θέση των χρηστών, το φορτίο της κυψέλης, το φορτίο της κατάτμησης (traffic load per slice), την παρεμβολή από άλλες κυψέλες, κτλ.).



Εικόνα 12: Τεμαχισμός δικτύου για διαφορετικές υπηρεσίες.

Κεφάλαιο 4. Δυναμικός Τεμαχισμός: Το Μέλλον του 5G

4.1 Πώς ο Δυναμικός Τεμαχισμός Δικτύου επαναπροσδιορίζει τα Δίκτυα Επικοινωνιών

Πολλές φορές, σε πολύπλοκα τηλεπικοινωνιακά προβλήματα -και για τη διευκόλυνση της ανάλυσης του υπό αντιμετώπιση προβλήματος- αναφέρεται η έννοια του «μαγικού τζίνι», το οποίο με ένα «μαγικό»/υπερβατικό τρόπο γνωρίζει τις παραμέτρους του δικτύου, ελέγχει πλήρως όλο το δίκτυο και παίρνει αποφάσεις για τη βελτιστοποίησή του [FGVW99]. Αυτό το τζίνι μπορεί πλέον να γίνει κάτι «χειροπιαστό» και να υλοποιηθεί στην πραγματικότητα! Αυτό δεν είναι άλλο από τους μηχανισμούς πίσω από τον δυναμικό τεμαχισμό δικτύου.

Αυτός είναι πλέον εφικτός χάρη στις τεχνολογίες εικονικοποίησης (virtualization) και SDN με τις οποίες οι δικτυακές λειτουργίες που μέχρι πρότινος ήταν καθαρά λύσεις υλισμικού (hardware), μπορούν πλέον να υλοποιούνται και να υπόκεινται σε διαχείριση ως ρουτίνες λογισμικού (software routines). Με άλλα λόγια, οι λειτουργίες δικτύου μπορούν πλέον να είναι μέρος ενός προγράμματος που δύναται να λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Κρίσιμος παράγοντας για την υλοποίηση αυτών των λειτουργιών αποτελεί η διαχείριση του κύκλου ζωής των τεμαχίων/φετών του δικτύου, ώστε τα τελευταία να δημιουργούνται, να ενεργοποιούνται και να αποδεσμεύονται σε πραγματικό χρόνο με βάση τις πραγματικές δυναμικές ανάγκες όλου του δικτύου και των υπηρεσιών/εφαρμογών που το εν λόγω δίκτυο εξυπηρετεί, με κάθε υπηρεσία να έχει τη δική της σαφή ποιότητα (QoS).

Τα δίκτυα 5G δημιουργούν μια νέα πραγματικότητα στην τηλεπικοινωνιακή αγορά, στην οποία εμφανίζονται διαφορετικοί ρόλοι και ενδεχομένως αλληλεπιδράσεις για τους εμπλεκόμενους «παίκτες», όπως [AFOLABI18]:

- **Πάροχοι υποδομών (network operators / infrastructure providers):** Πρόκειται για φορείς που προσφέρουν τη φυσική δικτυακή υποδομή και είναι υπεύθυνοι για τις αναβαθμίσεις και τη συντήρησή τους. Προς το παρόν, τον ρόλο αυτόν τον έχουν αναλάβει οι συμβατικοί πάροχοι δικτύου, αλλά στο μέλλον αναμένεται ότι τρίτοι «παίκτες» θα μπορούσαν να προμηθεύουν μικρότερης κλίμακας υποδομές και με πιο τοπικά προσανατολισμένο χαρακτήρα (π.χ. σε αθλητικά στάδια ή εμπορικά κέντρα).
- **Πάροχοι υποδομών νέφους (cloud providers):** Πρόκειται για φορείς που προσφέρουν υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους σε υποδομές νέφους, καθώς και υπηρεσίες νέφους, όπως πλατφόρμες ως υπηρεσία (Platform as a Service – PaaS), π.χ., OpenStack, Kubernetes, κτλ. Η πλατφόρμα OpenStack, για παράδειγμα, είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs και για τους πόρους που θα τις χρησιμοποιήσουν¹¹. Η πλατφόρμα Kubernetes¹² είναι ένα σύστημα για τη διαχείριση εγκιβωτισμένων (containerized) ωφέλιμων φορτίων (workloads) και υπηρεσιών, που διευκολύνει τόσο δηλωτική διάρθρωση (configuration) όσο και δράσεις αυτοματισμού (automation). Χρησιμοποιείται για τη διαχείριση φορτίων και υπηρεσιών που μπορεί να «τρέχουν» με κατανεμημένο τρόπο σε πολλές εικονικές μηχανές οι οποίες μερίζονται πόρους (υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς και δικτυακούς) με δυναμικό τρόπο[MIMIDIS19].
- **Εικονικός πάροχος δικτύου (virtualized network operator):** Πρόκειται για φορείς που νοικιάζουν πόρους από έναν πάροχο υποδομών, είτε για να ενισχύσουν υπάρχουσες υποδομές που τους ανήκουν είτε για να αποκτήσουν κάλυψη, σε περίπτωση που δεν κατέχουν καθόλου πόρους¹³. Αν και εικονικοί πάροχοι υπάρχουν εδώ και μια δεκαετία τουλάχιστον, η τεχνολογία 5G αναμένεται να δώσει νέα διάσταση στην έννοια αυτή, προσφέροντας τεράστια

¹¹ Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, μεταξύ άλλων: <https://en.wikipedia.org/wiki/OpenStack>

¹² Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε, π.χ.: <https://kubernetes.io/>

¹³ Ήδη από τα δίκτυα 3G/4G και έπειτα, εμφανίστηκαν αρκετοί εικονικοί πάροχοι παγκοσμίως με πολλούς από αυτούς να αποδεικνύονται ως πολύ κερδοφόρες επιχειρήσεις.

ευελιξία και πολλά επιχειρηματικά μοντέλα. Το μοντέλο MVNO θα αναλυθεί περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο.

- **Μεσάζων υπηρεσιών (service broker):** Πρόκειται για τον «συνεκτικό κρίκο» μεταξύ του παρόχου του φυσικού δικτύου και των εικονικών παρόχων υπηρεσιών, εφαρμογών και γενικότερα των καθετοποιημένων εφαρμογών (verticals). Στόχος είναι η συλλογή των απαιτήσεων για τις υπηρεσίες και η αντιστοίχισή τους σε συγκεκριμένους πόρους δικτύου (π.χ. σε συγκεκριμένες δράσεις κατατμήσεων του δικτύου και στα αντίστοιχά τους τεμάχια/φέτες δικτύου). Ο μεσάζων μπορεί να είναι μέρος του προμηθευτή υποδομών, του παρόχου δικτύου ή μια ανεξάρτητη οντότητα.
- **Πάροχοι εφαρμογών (application providers):** Πρόκειται για φορείς που παρέχουν υπηρεσίες και εφαρμογές «πάνω από ένα δίκτυο» (Over the Top – OTT), το οποίο μπορεί να τους ανήκει ή όχι. Τελευταία γίνεται πολύς λόγος για αυτές τις υπηρεσίες και για το πώς μπορεί να «κανιβαλίσουν» τους πόρους δικτύου, χωρίς να καταβάλλουν αντίστοιχο τίμημα πρόσβασης και/ή χρήσης αυτών. Παράδειγμα αποτελούν οι υπηρεσίες video-on-demand (π.χ. Netflix), για τις οποίες οι πάροχοι δικτύου καταναλώνουν πολλούς πόρους, χωρίς να λαμβάνουν κάποια έσοδα. Μέχρι πρότινος, υπήρχαν -και εξακολουθούν να υπάρχουν- σκέψεις από τους παρόχους, για επιπρόσθετη χρέωση των πελατών τους για τέτοιου είδους υπηρεσίες. Η κείμενη νομοθεσία, όμως, για την πλήρωση της προοπτικής της ουδετερότητας του δικτύου (net neutrality) περιπλέκει ακόμα περισσότερο τα ζητήματα [LG19]. Με την έλευση του 5G δίνεται η δυνατότητα στους παρόχους OTT να αποκτήσουν δικά τους τεμάχια δικτύου στις χώρες κάλυψης των υπηρεσιών τους, ώστε να μην εξαρτώνται από τους τοπικούς παρόχους και για να μπορούν να προσφέρουν συγκεκριμένη εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας στους πελάτες τους.
- **Καθετοποιημένοι τομείς (verticals):** Πρόκειται για φορείς που προσφέρουν ένα εύρος υπηρεσιών σε συγκεκριμένες βιομηχανίες οι οποίες δεν ανήκουν συνήθως στο χώρο των τηλεπικοινωνιών, εκμεταλλευόμενοι πόρους δικτύου και υποδομές νέφους από τους αντίστοιχους παρόχους. Η ανάπτυξη αυτών αναμένεται να επιτευχθεί μέσω της ψηφιακοποίησης των καθετοποιημένων τομέων (π.χ. των εργοστασίων, των μεταφορών και της ιατρικής περίθαλψης).

Οι συνέργειες μεταξύ διαφορετικών τμημάτων αυτού του νέου επιχειρηματικού «μωσαϊκού» είναι πλέον εφικτές μέσω των δυνατοτήτων που προσφέρει η τεχνολογία

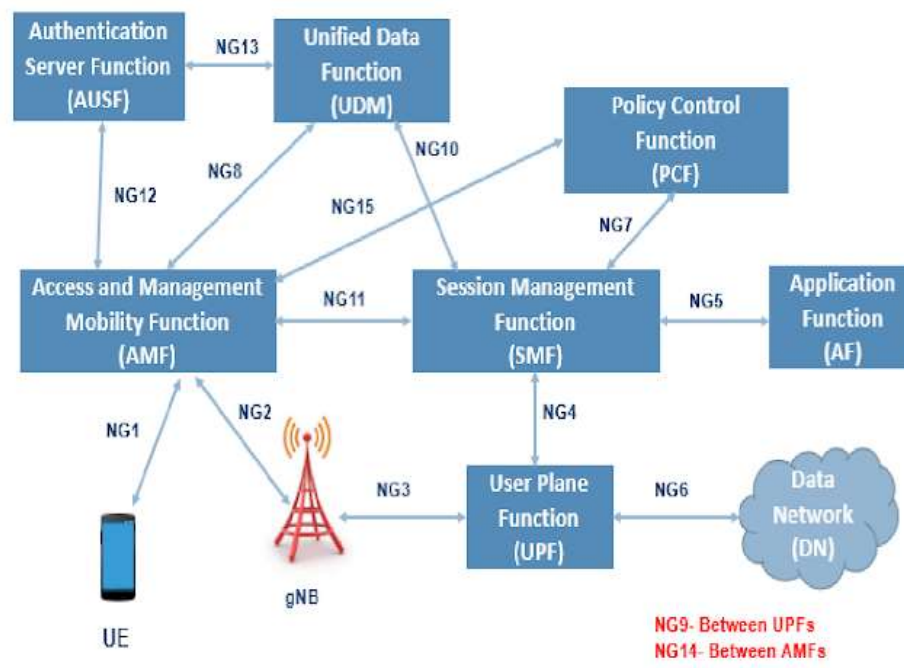
5G και συγκεκριμένα μέσω της δημιουργίας (επανα-)προγραμματιζόμενων δικτυακών λειτουργιών από άκρο-σε-άκρο και δια της διαχείρισής τους ως τμημάτων ενός ενιαίου και συνολικού προγράμματος λογισμικού (softwarized networks) [DRAEXLER18]. **Οι πόροι από το νέφος και το δίκτυο κορμού μέχρι το δίκτυο πρόσβασης και την τελική συσκευή, παρακολουθούνται και υπόκεινται σε διαχείριση με βέλτιστο και δυναμικό τρόπο, παρομοίως με τον τρόπο που ένα λειτουργικό σύστημα διαχειρίζεται όλα τα προγράμματα που «τρέχουν» παράλληλα όπως και τους πόρους (CPU, RAM, αποθηκευτικό χώρο) που θα χρησιμοποιήσει το καθένα από αυτά.** Αυτή η διαχείριση των πόρων και η δημιουργία λογικών τεμαχίων του δικτύου είναι το «κλειδί» για τη νέα εποχή των τηλεπικοινωνιών η οποία μέσω της ευελιξίας και της ευκολίας δημιουργίας υπηρεσιών και της κατανομής αυτών στους εκάστοτε ενδιαφερόμενους, θα αυξήσει τα κέρδη για τους παρόχους υποδομών, δικτύων και νέφους, ενώ θα αυξήσει ταυτόχρονα και τις επιλογές του τελικού χρήστη.

4.1.1 Από τα Δίκτυα Οντοτήτων στα Δίκτυα Δυνατοτήτων

Γίνεται φανερό ότι η ικανοποίηση των νέων απαιτήσεων των υπηρεσιών των δικτύων 5G απαιτεί μια ριζική αλλαγή στον τρόπο σχεδιασμού των δικτύων. Συγκεκριμένα, φαίνεται ότι προτείνεται μάλλον ο σχεδιασμός ενός δικτύου δυνατοτήτων (network of capabilities) και όχι ο σχεδιασμός ενός δικτύου οντοτήτων (network of entities). Με άλλα λόγια, τα δίκτυα πλέον δεν θα διαχειρίζονται μόνο τη συνδεσιμότητα των συσκευών με το Διαδίκτυο ή με άλλα δίκτυα, αλλά θα διαχειρίζονται τις δυνατότητες και τις υπηρεσίες που χρειάζονται οι συνδεδεμένες συσκευές.

Με οδηγό τις τεχνολογίες SDN και NVF για την υλοποίηση ενός πιο ευέλικτου, ελαστικού και δυναμικού δικτύου, το πλαίσιο δράσεων 3GPP επανασχεδίασε το δίκτυο κορμού, ορίζοντας μια περισσότερο αρθρωτή (modular) αρχιτεκτονική (βλ. Εικόνα 13), όπου οι βασικές οντότητες του πυρήνα εξελιγμένου πακέτου (Evolved Packet Core – EPC) διαιρέθηκαν σε δικτυακές λειτουργίες (network functions), ώστε σε συνδυασμό και με το νέο δίκτυο πρόσβασης (New Radio) να είναι δυνατή η δημιουργία τεμαχίων δικτύου από άκρη-σε-άκρη. Η λειτουργία AMF (Access and Management Mobility Function) επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται στο δίκτυο μέσω μηχανισμών επαλήθευσης ταυτότητας (authentication), εξουσιοδότησης (authorization), ενώ διαχειρίζεται και την κινητικότητά τους (λειτουργίες του συμβατικού MME). Ακόμα και αν η συσκευή χρησιμοποιεί διαφορετικές και πολλές τεχνολογίες πρόσβασης, η διαχείριση αυτών γίνεται από το AMF. Η λειτουργία SMF (Session Management Function) είναι υπεύθυνη για τη διαχείριση των συνεδριών (sessions) των συσκευών και την απόδοση

διευθύνσεων IP, ενώ ελέγχει και το UPF (User Plane Function) για την τελική μετάδοση των δεδομένων στη συσκευή. Σημαντικό ρόλο παίζει η λειτουργία AF (Application Function), καθώς είναι υπεύθυνη για τις πληροφορίες που θα δοθούν στο PCF (Policy Control Function) για τον έλεγχο της QoS κάθε τεμαχίου του δικτύου. Η λειτουργία AUSF (Authentication Server Function) αποθηκεύει δεδομένα για την επαλήθευση ταυτότητας και την εξουσιοδότηση της πρόσβασης των χρηστών. Οι λειτουργίες AMF, SMF και UPF διαθέτουν επίσης διεπαφές ή σημεία αναφοράς (reference points) για τη σύνδεσή τους με το NR (New Radio). Συγκεκριμένα το σημείο αναφοράς NG1 για την επικοινωνία του AMF με τα τερματικά/συσκευές, το NG2 για την επικοινωνία του RAN (σταθμού βάσης) με το AMF, και το NG3 για την επικοινωνία του RAN με το UPF. Η αρχιτεκτονική αυτή δίνει τη δυνατότητα σε όλες οι λειτουργίες δικτύου E2E ώστε να υλοποιούνται μέσω NFVs και άρα να μπορούν να υπόκεινται σε διαχείριση με δυναμικό και ελαστικό τρόπο [KKC17].



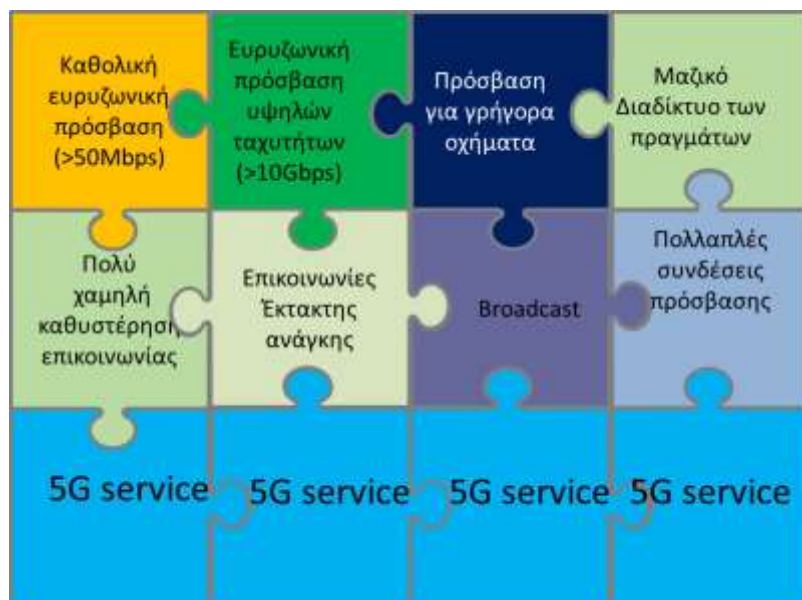
Εικόνα 13: Δίκτυο λειτουργιών (network functions) ¹⁴.

Αυτός ο δυναμικός χαρακτήρας του οικοσυστήματος 5G επιτρέπει τη δημιουργία και εξυπηρέτηση υπηρεσιών, οι οποίες αποτελούνται από τις παρακάτω δυνατότητες ή από συνδυασμό αυτών [AFOLABI20], [FARRIS17], όπως ενδεικτικά περιγράφεται παρακάτω:

¹⁴ Βλέπε: <https://www.5gfundamental.com/2020/06/5g-network-architecture.html>

- **Βελτιωμένη (enhanced) καθολική ευρυζωνική πρόσβαση:** Το όριο των 50Mbps είναι το κατώτατο αποδεκτό όριο για να επιτευχθεί το παγκόσμιο συνδεδεμένο δίκτυο υψηλό ταχυτήτων.
- **Ενισχυμένη (enhanced) ευρυζωνική πρόσβαση σε πυκνές περιοχές:** Εκτός από το κατώτατο αποδεκτό όριο για καθολική ευρυζωνική πρόσβαση, συγκεκριμένες υπηρεσίες σε συγκεκριμένες τοποθεσίες πρέπει να μπορούν να επιτυγχάνουν υπερυψηλές ταχύτητες της τάξης των 10Gbps, όπως για παράδειγμα σε εμπορικά κέντρα ή σε κατάμεστες αθλητικές εγκαταστάσεις για τη μετάδοση βίντεο πολύ υψηλής ανάλυσης.
- **Συνδεσιμότητα σε οχήματα υψηλών ταχυτήτων κίνησης:** Η δυνατότητα παροχής σύνδεσης σε οχήματα (ή σε συσκευές που κινούνται μέσα σε οχήματα) πολύ υψηλής ταχύτητας (π.χ. σε τρένα υψηλών ταχυτήτων).
- **Μαζικό Διαδίκτυο των πραγμάτων:** Μία από τις κύριες δυνατότητες των δικτύων 5G είναι η σύνδεση ενός τεράστιου πλήθους συσκευών τύπου IoT (π.χ. αισθητήρες, ελεγκτές, κτλ.) με ιδιαίτερες απαιτήσεις όπως το χαμηλό κόστος κατασκευής, η πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η δυνατότητα επικοινωνιών μεγάλης εμβέλειας (long range communications).
- **Επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο:** Πρόκειται για υπηρεσίες και εφαρμογές όπου η απόκριση δικτύου από άκρο-σε-άκρο είναι μικρότερη των 5 msec, όπως για παράδειγμα σε εφαρμογές ασφάλειας οχημάτων ή σε δράσεις χειρουργικής από απόσταση.
- **Επικοινωνία απόλυτης αξιοπιστίας (ultra reliable communications):** Αφορά στη δυνατότητα για παροχή συνδεσιμότητας σε ποσοστό σχεδόν 100%, για εφαρμογές όπου η διαθεσιμότητα πρέπει να είναι πάντα εφικτή (π.χ. αυτόματη οδήγηση, απομακρυσμένα χειρουργεία).
- **Επικοινωνία εκτάκτου ανάγκης:** Αφορά στη δυνατότητα για παροχή συνδεσιμότητας με αξιοπιστία και σε μαζική κλίμακα, σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και/ή μαζικών καταστροφών.
- **Δυνατότητα ευρυεκπομπής (broadcast):** Αφορά στη μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλές συσκευές, π.χ. για αναβάθμιση firmware, για μετάδοση έκτακτων ανακοινώσεων, κτλ.
- **Δυνατότητα για πρόσβαση μέσω πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης:** Πρόκειται για μια από τις βασικές και ουσιαστικές δυνατότητες των δικτύων 5G, όπου κάθε είδους συσκευή (π.χ. από «έξυπνα» τζάμια μέχρι απλούς αισθητήρες) έχει πρόσβαση στο δίκτυο με διαφορετική τεχνολογία πρόσβασης.

Όλες οι παραπάνω δυνατότητες συνθέτουν το «παζλ» (βλ. Εικόνα 14) των υπηρεσιών 5G, όπου ο κεντρικός ενορχηστρωτής του συστήματος επιλέγει με βέλτιστο τρόπο τα «κομμάτια» εκείνα που θα συνθέσουν το σύνολο των δυνατοτήτων για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ποιότητας της υπηρεσίας/εφαρμογής που εκάστοτε εξυπηρετείται. Η δημιουργία μίας υπηρεσίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση μίας -ή και συνδυασμού περισσότερων από μία- από τις παραπάνω δυνατότητες, που ουσιαστικά ισοδυναμεί με τη χρήση ενός ή περισσότερων τμημάτων δικτύου που μπορεί να αλληλεπιδρούν μέσω του διαχειριστή δικτυακών λειτουργιών (MANO).

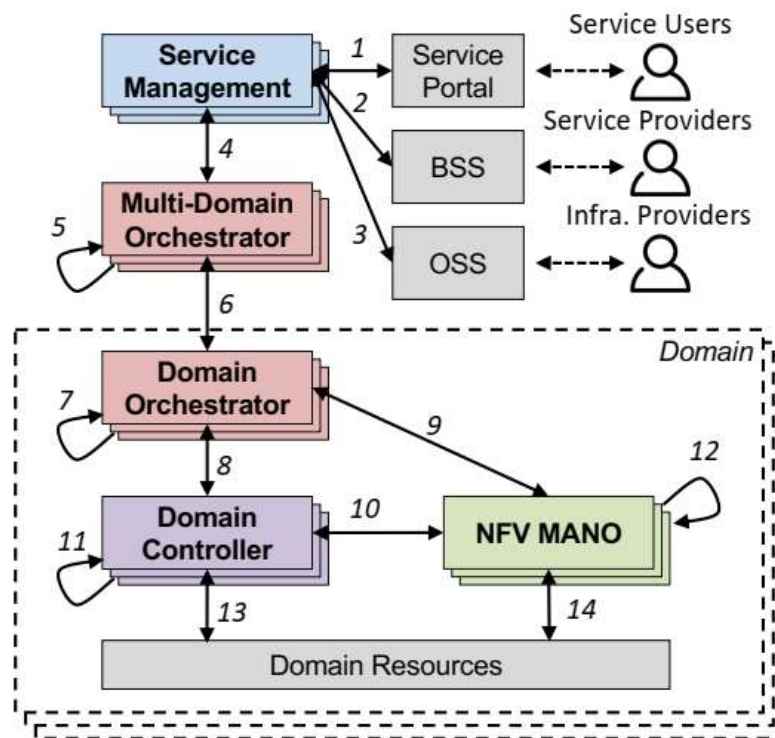


Εικόνα 14: Επιλογή δυνατοτήτων για τη συγκρότηση υπηρεσιών 5G.

Προφανώς, το πρόβλημα αυτό (όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια) είναι εξαιρετικά σύνθετο, αφού ο ενορχηστρωτής αναλαμβάνει το ρόλο να ικανοποιήσει ένα πλήθος υπηρεσιών, η κάθε μία εκ των οποίων αναφέρεται σε εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά QoS, και διαθέτοντας ένα περιορισμένο-πεπερασμένο πλήθος πόρων. Όπως ενδεικτικά φαίνεται στην Εικόνα 15, οι απαιτήσεις ποιότητας παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση. Για παράδειγμα, η καθυστέρηση κυμαίνεται από τα 1000msec μέχρι το 1msec, με τις εφαρμογές εκτάκτου ανάγκης (mission critical) να απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση (latency), αλλά να μην έχουν υψηλές απαιτήσεις σε bandwidth, ενώ οι εφαρμογές κινητής ευρυζωνικότητας (mobile broadband) να έχουν περισσότερες απαιτήσεις (bandwidth, mobility, speed, capacity, κλπ.). Από τα παραπάνω γίνεται επίσης

Προς αυτήν την κατεύθυνση έχει προταθεί η έννοια του Λειτουργικού Συστήματος 5G (5G Operating System ή 5G OS) [DRAEXLER18], το οποίο παρέχει τις παρακάτω λειτουργίες:

- Έλεγχος και διαχείριση των 5G υπηρεσιών που «τρέχουν» πάνω από την ετερογενή, πολλαπλών-τομέων (multi-domain), 5G υποδομή.
- Υλοποίηση κοινών λειτουργιών μεταξύ των εικονικών και των φυσικών λειτουργιών δικτύου (όπως για παράδειγμα ενορχηστρωτές NNFV, διαχειριστές υπηρεσιών, BSS, OSS, κτλ.).
- Συνδυασμός του ελέγχου και της διαχείρισης των υπηρεσιών, δια της διαχείρισης των φυσικών και εικονικών πόρων από άκρη-σε-άκρη (E2E). Οι E2E δράσεις κατατμήσεων δικτύου αποτελούνται από υπολογιστικούς, αποθηκευτικούς, δικτυακούς πόρους και λειτουργίες διαχείρισης, που θα πρέπει να κατανέμονται και να τροποποιούνται δυναμικά, όταν αυτό απαιτείται.



Εικόνα 16: Η αρχιτεκτονική του 5G OS [DRAEXLER18].

Για την πρακτική υλοποίηση του 5G OS παρέχονται εγγυήσεις από τις τεχνολογίες SDN, NNFV και MANO που μπορούν να ενορχηστρώνουν από άκρο-σε-άκρο τους πόρους και τις λειτουργίες διαχείρισης. Η Εικόνα 16 αναπαριστά μια γενική προσέγγιση της αρχιτεκτονικής του 5G OS, με τα λειτουργικά στοιχεία, τις διεπαφές (interfaces) και την

υποδομή 5G στην οποία στηρίζεται. Η υποδομή οργανώνεται σε προκαθορισμένους τεχνολογικούς και διαχειριστικούς (administrative) τομείς (domains), οι οποίοι μπορεί να αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου (π.χ. εγκατάσταση μιας νέας τεχνολογίας στο δίκτυο πρόσβασης) αλλά το 5G OS δεν μπορεί να προβεί σε αλλαγή πάνω σε αυτούς. Αντιθέτως, το 5G OS αναλαμβάνει να ενσωματώσει τους νέους τομείς στους υπάρχοντες μηχανισμούς δημιουργίας και διαχείρισης τεμαχίων δικτύου, με βάση τις προδιαγραφές των τομέων αυτών.

Τα στοιχεία του 5G OS οργανώνονται με ιεραρχικό τρόπο λαμβάνοντας αιτήσεις υπηρεσιών και διαχείρισης πόρων από ανώτερα στοιχεία στην αρχιτεκτονική, κατευθύνοντάς τα προς τα κατώτερα στοιχεία και τελικά στην πραγματική υποδομή του δικτύου. Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο του 5G OS είναι αυτό που αφορά στη διαχείριση υπηρεσιών (Service Management) το οποίο είναι υπεύθυνο για την μετατροπή των απαιτήσεων υπηρεσιών σε συγκεκριμένες προδιαγραφές, με βάση τις οποίες θα σχηματιστούν τα τεμάχια/φέτες δικτύου με τις αντίστοιχες κατανομές πόρων. Για παράδειγμα, ένας πάροχος υπηρεσιών μπορεί να ζητήσει την εξυπηρέτηση υπηρεσιών video streaming (ρευσμάτωσης βίντεο) σε ένα γήπεδο ποδοσφαίρου για συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο. Με βάση τις γενικές απαιτήσεις (π.χ. bandwidth, latency, κτλ.) θα πρέπει ο διαχειριστής υπηρεσιών να δημιουργήσει συγκεκριμένες δράσεις τεμαχισμού, παράλληλα λαμβάνοντας υπόψη και την εύρυθμη λειτουργία του συνόλου του δικτύου (π.χ. για να μην προκαλέσει συμφόρηση (congestion) σε άλλες υπηρεσίες).

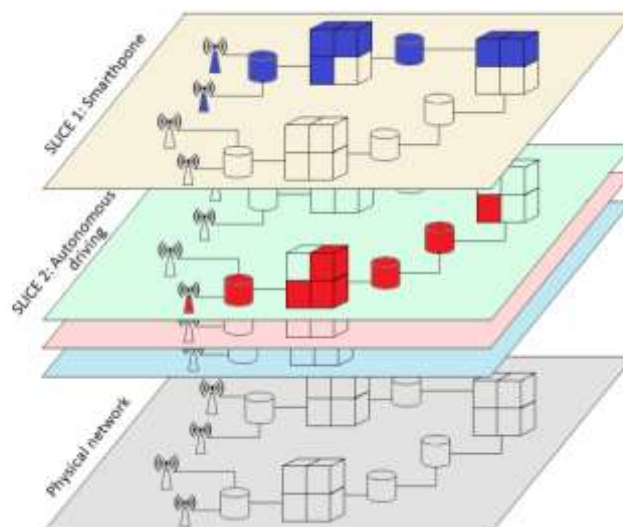
Οι συγγραφείς της εργασίας [DRAEXLER18] στην οποία προτείνεται το 5G OS, λαμβάνουν υπόψη τις προδιαγραφές 3GPP ώστε να υπάρχει συμβατότητα με τη λογική του NFV MANO. Για παράδειγμα, το στοιχείο «διαχειριστής υπηρεσιών» (βλ. Εικόνα 16) προβλέπεται ως Λειτουργία Διαχείρισης Υπηρεσιών Επικοινωνίας (Communication Service Management Function ή CSMF) από τις προδιαγραφές 3GPP [3GPPRel15 TR 28.801]. Επίσης, τα στοιχεία πολλαπλών τομέων και εντοπισμού τομέων (Domain Orchestrator) που φαίνονται στην Εικόνα 16, περιλαμβάνουν τις λειτουργίες που προτείνονται από το 3GPP, δηλαδή τη λειτουργία διαχείρισης τεμαχίων δικτύου (Network Slice Management Function ή NSMF) και τη λειτουργία διαχείρισης υποδικτύων τεμαχίων δικτύου (Network Slice Subnet Management Function ή NSSMF).

Ένα σημαντικό βήμα για την υλοποίηση του 5G OS είναι η δημιουργία κοινών μοντέλων περιγραφής για τις δράσεις τεμαχισμού δικτύου, όπως αυτό κατά το ETSI OSM [OSM18] που επιδιώκει την προτυποποίηση των περιγραφών υπηρεσιών δικτύου (network descriptors) για εικονικές συνδέσεις και εικονικές λειτουργίες δικτύων, ώστε

να είναι εφικτή η διαλειτουργικότητα και η συνέργεια μεταξύ διαφορετικών παρόχων και προμηθευτών υλικού και λογισμικού.

4.2.2 Διαχείριση στο Έπακρο και από Άκρο-σε-Άκρο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η διαχείριση πόρων E2E και κάποιες εργασίες για την βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων αυτών. Η μεγαλύτερη δυσκολία στη διαχείριση πόρων στα δίκτυα 5G προέρχεται από την ανάγκη για υποστήριξη πολλών διαφορετικών εφαρμογών, κάθε μία με πολύ διαφορετικές απαιτήσεις σε QoS, όπως για παράδειγμα οι εφαρμογές eMBB, mMTC και URLLC [ITU17], [NGNMS16]. Επιπρόσθετα, τα νέα εμπορικά μοντέλα που εισάγονται με το 5G, δηλαδή τα μοντέλα πολλαπλών «ενοικιαστών» (multi-tenant), με τα πολλαπλά επίπεδα ετερογενών κατατμήσεων (multi-tier heterogeneous slices) (βλ. Εικόνα 17), όπου απεικονίζονται τα πολλαπλά επίπεδα ενοικιαστών και οι πόροι που χρησιμοποιούν ανάλογα με τις υπηρεσίες που εξυπηρετούν, περιπλέκουν ακόμα περισσότερο το πρόβλημα της κατανομής των πόρων [OLADE]020]. Αν στα παραπάνω προσθέσουμε και το δυναμικό, χρονο-μεταβλητό χαρακτήρα των ασύρματων επικοινωνιών (π.χ. λόγω του ασύρματου καναλιού μετάδοσης) καθώς και τις δυναμικές απαιτήσεις των χρηστών (είτε χονδρικής είτε λιανικής), τότε το πρόβλημα κατανομής πόρων γίνεται μια πραγματική πρόκληση, χωρίς προφανή λύση.



Εικόνα 17: Γραφική απεικόνιση των δράσεων κατατμήσεων δικτύου και του μερισμού πόρων [FOSSATI20].

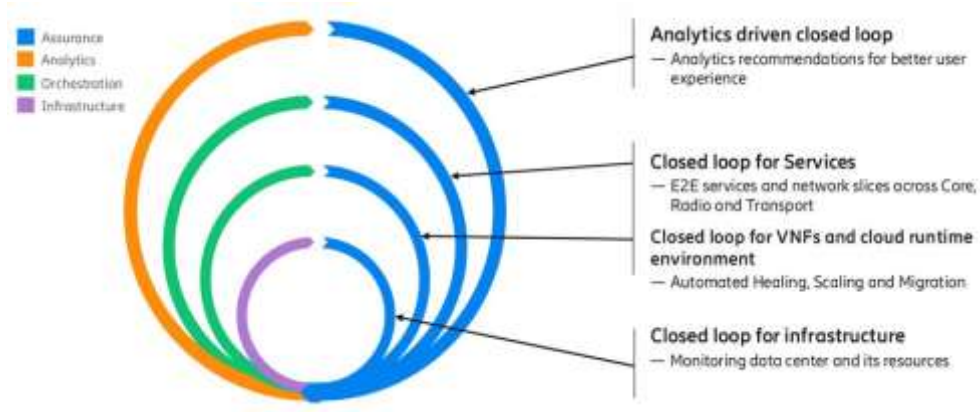
Τα τελευταία χρόνια, έχουν παρουσιαστεί πολλές εργασίες πάνω σε αυτό το πρόβλημα¹⁵, με αυτές να διαφοροποιούνται ως προς:

- Τον τύπο των πόρων που λαμβάνουν υπόψη στην κατανομή και το συνδυασμό αυτών, όπως τους πόρους ραδιοδικτύου, το εύρος ζώνης του οπισθόφορου (backhaul) και του εμπροσθόφορου (fronthaul) δικτύου, την επεξεργαστική νεφούπολογιστική ισχύ, το πλήθος των VNFs και των συνδέσεων μεταξύ τους, τους αποθηκευτικούς πόρους ή ακόμα και το πλήθος των σταθμών βάσης που χρειάζονται.
- Τη μετρική (metrics) ή τις μετρικές βελτιστοποίησης, όπως η μεγιστοποίηση της χρήσης πόρων, η μεγιστοποίηση του κέρδους των παρόχων υπηρεσιών και η μεγιστοποίηση της «δίκαιης» κατανομής πόρων (fairness). Στις παραπάνω μετρικές, λαμβάνονται υπόψη και οι ικανοποιήσεις συγκεκριμένων περιορισμών (constraints), όπως η ικανοποίηση της QoS κάθε υπηρεσίας. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του προβλήματος και οι τεχνικές για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Παραδείγματα αυτών είναι η θεωρία παιγνίων (game theory), ο γραμμικός και μη γραμμικός προγραμματισμός.

Στην πρόσφατη εργασία [OLADE]O20] οι συγγραφείς εξετάζουν την κατανομή των πόρων ραδιοδικτύου, θεωρώντας τις τρεις βασικές εφαρμογές των δικτύων 5G σε ένα περιβάλλον πολλών ενοικιαστών (multi-tenant) με πολλά επίπεδα κατατμήσεων (multi-tier). Αναπτύσσουν έναν δυναμικό μηχανισμό κατανομής των πόρων για τη μεγιστοποίηση της χρήσης των πόρων (utilization), λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σε καθυστέρηση (latency) και ρυθμό δεδομένων για κάθε υπηρεσία, καθώς και άλλων παραμέτρων, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Όσον αφορά στη μοντελοποίηση του προβλήματος, αυτό αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μέγιστης χρήσης (maximum utility optimization), όπου το κύριο πρόβλημα μετασχηματίζεται και διασπάται (decomposed) σε μικρότερα προβλήματα μέσω της ιεραρχικής διάσπασης (hierarchical decomposition). Με αυτόν τον τρόπο οι χρήστες των τεμαχίων κατανέμονται ιεραρχικά στα ανώτερα επίπεδα, στο δίκτυο πολλαπλών ενοικιαστών. Έπειτα, με εφαρμογή θεωρίας παιγνίων και γενετικών αλγορίθμων (genetic algorithms)

¹⁵ Οι εργασίες [FOSSATI20], [OLADE]O20] παρουσιάζουν μια αναλυτική ανασκόπηση των προσπαθειών των τελευταίων ετών, αναφορικά με το πρόβλημα της κατανομής πόρων σε δίκτυα 5G με τεμαχισμό δικτύου.

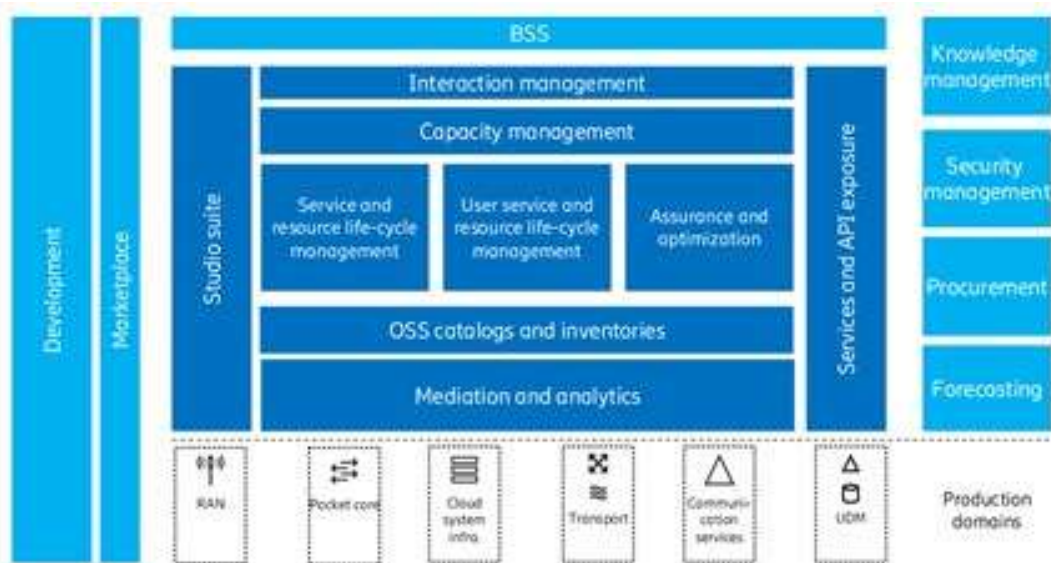
βελτιστοποιείται η αντιστοίχιση των χρηστών των τεμαχίων στα αντίστοιχα σημεία πρόσβασης. Οι ερευνητές στην εργασία [FOSSATI20] εστιάζουν στη βέλτιστη κατανομή πόρων, με στόχο τη μεγιστοποίηση της δίκαιης κατανομής τους στους χρήστες και τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των χρηστών (user satisfaction). Η βασική λογική είναι η συγκέντρωση όλης της πληροφορίας σχετικά με τις απαιτήσεις των χρηστών και των διαθέσιμων πόρων, ώστε να σχηματισθεί η συνάρτηση βελτιστοποίησης. Το σύστημα που τελικά προτείνεται, πέρα από τη δίκαιη κατανομή πόρων, εξυπηρετεί καταστάσεις κορύφωσης φόρτου (peak traffic) μέσω της διατήρησης ενός ποσοστού αδρανών πόρων (idle resources).



Εικόνα 18: Λύση της Ericsson για αυτοματισμό δυναμικού τεμαχισμού [ERICSSON20].

Για την αποδοτική και δυναμική διαχείριση των πόρων, οι μηχανισμοί αυτοματισμού είναι ζωτικής σημασίας. Ο σχεδιασμός και η υλοποίησή τους, ειδικά για αυτοματισμούς που λαμβάνουν υπόψη τις δράσεις καταταμίσεων δικτύου E2E, ενέχει πολλές προκλήσεις. Οι μηχανισμοί θα πρέπει να επιτρέπουν ουσιαστικά την αυτόνομη δημιουργία των τεμαχίων, με αυτόματη αποδοχή ή απόρριψη των αιτήσεων δημιουργίας και χρήσης, με βάση τους πόρους του δικτύου και τις απαιτήσεις των υπηρεσιών [TONINI20]. Η σημασία της αυτοματοποίησης για την υλοποίηση ενός πραγματικού δυναμικού τεμαχισμού δικτύου έχει γίνει αντιληπτή σε όλους τους χώρους των τηλεπικοινωνιών και αποτελεί πολλές φορές την αιχμή του δόρατος για πολλούς προμηθευτές εξοπλισμού και υπηρεσιών. Η Ericsson, για παράδειγμα (βλ. Εικόνα 18), παρουσιάζει τις τεχνολογίες αυτοματισμού ως μια από τις βασικότερες προϋποθέσεις για την υλοποίηση των δικτύων 5G και του δυναμικού τεμαχισμού. Το όραμά της είναι ένα δίκτυο που θα ελέγχεται μέσω εμπορικών απαιτήσεων από τα υψηλότερα επίπεδα (higher level business intents), που θα έχει μεγάλο βαθμό αυτοματισμού και αυτο-βελτιστοποίησης (self-optimization) και

που θα μπορεί να βελτιώνεται μέσω μηχανισμών μηχανικής μάθησης (machine learning - ML) [ERICSSON20]. Ζωτικής σημασίας είναι η απαίτηση για ανθεκτικότητα σε απρόβλεπτα γεγονότα, τα οποία σε συμβατικά δίκτυα θα προκαλούσαν απώλεια των υπηρεσιών. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά προφανώς δεν θα πρέπει να έχουν κανένα αρνητικό αντίκτυπο στην ασφάλεια του δικτύου και των χρηστών. Το απολύτως αυτοματοποιημένο αυτό δίκτυο, ονομάζεται «δίκτυο μηδενικής επαφής» (zero-touch network), με την έννοια ότι δεν χρειάζεται ανθρώπινη παρέμβαση, είτε για τη διάρθρωση (configuration) είτε για την αντιμετώπιση προβλημάτων. Σημαντικό μέρος των αυτοματοποιημένων διαδικασιών είναι το λεγόμενο «παράδειγμα βρόχου» (loop paradigm, Εικόνα 19), το οποίο επιτυγχάνεται μέσω του σχεδιασμού των πολιτικών (policies) που απαιτούνται για κάθε εφαρμογή και των αποφάσεων που πρέπει να λαμβάνονται για κάθε γεγονός. Σε αυτή τη διαδικασία, καθοριστικό όλο παίζει η ανάλυση των δεδομένων (Data Analytics - DA).



Εικόνα 19: Λειτουργική άποψη του αυτοματισμού [ERICSSON20]

Οι πολιτικές αναπαριστούν τους κανόνες που ελέγχουν τις αποφάσεις που λαμβάνονται από το βρόχο ελέγχου (control loop). Οι αποφάσεις ενεργοποιούνται από το Module COM (Control, Orchestration, Management), το οποίο αλληλεπιδρά με ανώτερα επίπεδα με ιεραρχικό τρόπο, τα οποία στέλνουν αιτήσεις για ενημερώσεις (update), διάρθρωση (configure) ή «ίαση» (heal). Με τη χρήση ανάλυσης δεδομένων, τεχνητής νοημοσύνης και χρήσης πολιτικών, οι βρόχοι ελέγχου αποκτούν την ιδιότητα

της προσαρμοστικότητας και τον κεντρικό ρόλο για να εξασφαλίσουν ότι η κατανομή των πόρων βελτιστοποιείται για τις εξυπηρετούμενες υπηρεσίες.

Η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει τη δημιουργία συστημάτων που λαμβάνουν αποφάσεις αυτόνομα, με βάση το περιβάλλον τους και τα ερεθίσματα που λαμβάνουν από αυτό. Τα ερεθίσματα αυτά δεν είναι άλλα από πληροφορίες που συλλέγονται από το δίκτυο μέσω μετρήσεων. Αυτό εξυπακούεται ότι σε ένα δίκτυο 5G με E2E δυναμικό τεμαχισμό, όπου διαφορετικοί εξοπλισμοί από διαφορετικούς προμηθευτές αλληλεπιδρούν, θα πρέπει να υπάρχουν ανοικτές διεπαφές (open interfaces) με προτυποποιημένα (standardized) τεχνικά χαρακτηριστικά. Διάφορα μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή πληροφοριών από το φυσικό επίπεδο και να διεγείρουν ενέργειες στο επίπεδο δικτύου, όπως για παράδειγμα σε λειτουργίες δρομολόγησης ή κατανομή πόρων ραδιοδικτύου. Αυτά τα δεδομένα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση/πρόβλεψη της κίνησης ώστε να ληφθούν αποφάσεις, όπως για παράδειγμα αλλαγή κατανομής πόρων στις δράσεις κατατμήσεων και στα προκύπτοντα τεμάχια/φέτες του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται καταστάσεις όπου οι SLAs μπορούν να παραβιαστούν [MUSUMECI19].

Κεφάλαιο 5. Προκλήσεις Εφαρμογής του Δυναμικού Τεμαχισμού Δικτύου

5.1 Νέες Δυνατότητες, Νέες Αγορές

Η αναδυόμενη αγορά 5G αναμένεται να προσφέρει ένα ευρύ σύνολο υπηρεσιών επιτρέποντας την ικανοποίηση των απαιτήσεων για μια απολύτως «κινητή» και συνδεδεμένη κοινωνία [MBK20], ενώ ο βασικός σχεδιαστικός παράγοντας για την αρχιτεκτονική 5G είναι η υποστήριξη της πληθώρας των καθετοποιημένων βιομηχανιών (verticals) που θα παράσχουν τις εφαρμογές. Προς αυτήν την κατεύθυνση, το συνεργατικό πλαίσιο 5GPPP που αφορά σε σύμπραξη μεταξύ φορέων του δημοσίου και ιδιωτικού τομέα [5GPPP16] διακρίνει πέντε βασικούς κάθετους τομείς: τον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, της ενέργειας, των μέσων μαζικής ενημέρωσης και της ψυχαγωγίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας και τέλος του βιομηχανικού κατασκευαστικού τομέα.

Η συνύπαρξη αυτών των καθετοποιημένων βιομηχανιών εξαρτάται από την ικανότητα του δικτύου 5G για να εξυπηρετεί τις αναδυόμενες υπηρεσίες οι οποίες έχουν διαφορετικές απαιτήσεις αναφορικά με την προσφερόμενη ποιότητα υπηρεσίας (όπως π.χ. σε σχέση με τον λανθάνοντα χρόνο, το εύρος ζώνης, την αξιοπιστία και τη χωρητικότητα). Η αρχιτεκτονική προσέγγιση των δικτύων υπό μια μορφή θεώρησης “one-size-fits-all” (ένα μέγεθος για εξυπηρέτηση όλων) δεν είναι πλέον σε θέση ώστε να αντιμετωπίσει τόσο πολλούς και διαφορετικούς βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs) για όλους τους παραπάνω κλάδους. Ωστόσο, τα δίκτυα 5G με τις τρέχουσες τάσεις μετατροπής του δικτύου σε λογισμικό (network softwarization) μέσω των τεχνολογιών SDN και NFV, θα αξιοποιήσουν τον προγραμματισμό, την ευελιξία και τη λειτουργικότητα για τη δημιουργία πολλαπλών λογικών δικτύων. Κάθε λογικό δίκτυο, που αναφέρεται ως

τεμάχιο/φέτα δικτύου, είναι προσαρμοσμένο για μια συγκεκριμένη υπηρεσία πάνω από τις φυσικές υποδομές δικτύου.

Ο διαχωρισμός του δικτύου σε λογικά δίκτυα δεν είναι κάτι το καινούριο. Για παράδειγμα, εδώ και δεκαετίες υπάρχουν τα εικονικά ιδιωτικά δίκτυα (Virtual Private Networks – VPNs) και τα εικονικά τοπικά δίκτυα (Virtual Local Area Networks – VLANs), ωστόσο καμία από αυτές τις λύσεις δεν ταιριάζει με τις προσδοκίες των 5G υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας και συγκεκριμένα με τις απαιτήσεις που αφορούν σε εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, σε μεγάλο εύρος ζώνης και στις μαζικές επικοινωνίες τύπου μηχανής.

Οι δυνατότητες που προσφέρει το 5G και ιδίως αυτές που προσφέρει ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου, φαίνεται ότι θα είναι εκείνη η εφαλτήρια δύναμη για τον πολυσυζητημένο ψηφιακό μετασχηματισμό που θα ενισχύσει την παραγωγικότητα και θα ενδυναμώσει την οικονομία. **Ειδικότερα, το 5G αναμένεται να είναι η κινητήρια δύναμη για το μαζικό IoT και τις υπηρεσίες πολύ μεγάλης αξιοπιστίας/πολύ μικρής καθυστέρησης που αναμένεται να ενισχύσουν περαιτέρω την αγορά τηλεπικοινωνιών.** Με την τεχνολογία 5G και τον τεμαχισμό δικτύου δημιουργούνται νέα εμπορικά μοντέλα, τα οποία επιτρέπουν τον μερισμό των πόρων δικτύου από άκρο-σε-άκρο, ακόμα και μεταξύ διαφορετικών παρόχων υπηρεσιών (service providers). Πρόσφατα, η βιομηχανία πληροφορικής και επικοινωνιών αποδέχθηκε με θέρμη την έννοια του “XaaS” δηλαδή του «**οτιδήποτε ως υπηρεσία**», το οποίο σημαίνει πρακτικά ότι είναι δυνατή η χρήση και επαναχρησιμοποίηση στοιχείων λογισμικού για τη διεκπεραίωση δικτυακών λειτουργιών. Για παράδειγμα, στην εργασία [TALEB15] μελετήθηκε η ικανότητα δημιουργίας κατ’ απαίτηση (on demand) ελαστικών δικτύων κορμού σε υποδομές νέφους, καθώς και η διαχείριση του κύκλου ζωής αυτών.

Στη συνέχεια αναλύεται το πώς οι πάροχοι δικτύων μπορούν να διαθέτουν προσαρμοσμένα τεμάχια/φέτες δικτύου στους πελάτες τους, δηλαδή το πώς παρέχουν την έννοια του Naas (Network as-a-Service). Με βάση την εκάστοτε σχέση μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών -ή παρόχων δικτύου- και των καταναλωτών, τα επιχειρηματικά μοντέλα του NaaS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, όπως παρακάτω [JCMG16], [ZLCZ16]:

- **Business-to-Business (B2B):** Οι πάροχοι δικτύου παρέχουν τεμάχια δικτύου σε άλλη εταιρεία, στην οποία θα ανήκουν τόσο το διατιθέμενο λογικό δίκτυο, όσο και οι τερματικές συσκευές (όπως για παράδειγμα δίκτυα επιτήρησης video για

εταιρείες παροχής υπηρεσιών ασφαλείας ή έξυπνα δίκτυα εργοστασίων για κατασκευαστικές εταιρείες). Στην περίπτωση B2B, οι φορείς εκμετάλλευσης παρέχουν συνήθως όχι μόνο προσαρμοσμένες ασύρματες συνδέσεις σε επιχειρήσεις, αλλά και τον πλήρη έλεγχο των τερματικών στην επιχείρηση.

- **Business-to-Consumer (B2C):** Οι τελικοί καταναλωτές μπορούν να αγοράσουν προσαρμοσμένες συνδέσεις/αγωγούς δεδομένων (data pipes) από τους παρόχους υπηρεσιών/δικτύων για τα τερματικά τους. Παράδειγμα αποτελούν οι συσκευές για το «έξυπνο» σπίτι. Στην περίπτωση του μοντέλου B2C, οι τελικοί πελάτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν, για παράδειγμα, τις υπηρεσίες με τη χρήση δομοστοιχείων καρτών αναγνώρισης (ταυτότητας) του συνδρομητή (Subscriber Identity Module – SIM) στις συσκευές τους. Γενικά, οι πελάτες απλώς χρησιμοποιούν το προσαρμοσμένο δίκτυο, χωρίς να τους ανήκει.
- **Business-to-Business-to-Consumer (B2B2C):** Ο πάροχος δικτύου/υπηρεσιών διαδραματίζει το ρόλο του παρόχου χονδρικής. Σε αυτήν την περίπτωση οι πάροχοι προσφέρουν αποκλειστικές συνδέσεις, που ονομάζονται MVNO (mobile virtual network operator) ως υπηρεσία, στον μεσάζοντα, χωρίς να εμπλέκεται το κομμάτι της λιανικής. Ωστόσο, ο μεσάζων μπορεί να έχει περισσότερο έλεγχο του δικτύου σε σύγκριση με τα παραδοσιακά MVNO μοντέλα, τα οποία συχνά αρκούνται μόνο στη λήψη αρχείων χρέωσης από τους φορείς εκμετάλλευσης του παρόχου του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (MNO), π.χ. μοντέλο light MVNO.

Υπό μια άλλη προοπτική, υπάρχουν τρία σενάρια παροχής υπηρεσιών του μοντέλου NSaaS, τα οποία έχουν διαφορετικούς κύκλους ζωής, αντικείμενα υπηρεσίας και κλίμακες κατατμήσεων δικτύου, ως εξής:

- **Βιομηχανική φέτα δικτύου (Industrial Slice):** Πελάτες με παρόμοιες απαιτήσεις υπηρεσίας δικτύου καταχωρούνται (registered) με την ίδια φέτα, αποτυπώνοντας σε αυτήν κοινές απαιτήσεις των χρηστών (όπως υψηλό εύρος ζώνης και χαμηλό λανθάνοντα χρόνο).
- **Μονοπωλιακή φέτα (Monopolized slice):** Οποιοσδήποτε (συνήθως μια επιχείρηση) που πληρώνει για την αποκλειστική χρήση της φέτας και την οποία χρησιμοποιεί ως ιδιωτικό δίκτυο.
- **Φέτα γεγονότος (Event slice):** Μια φέτα που δημιουργείται για ένα συγκεκριμένο γεγονός, συνήθως μικρού κύκλου ζωής (όπως αθλητικές εκδηλώσεις, συναυλίες, ακόμη και πωλήσεις-προσφορές σε εμπορικά κέντρα).

Το NaaS προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα στους παρόχους τηλεπικοινωνιών μέσω της δυνατότητας διαφοροποίησης της ποιότητας υπηρεσίας ανά σύνδεσμο δεδομένων (data pipes), προσφέροντας έτσι υπηρεσίες τύπου OTT (over-the-top), αλλά και τις παραδοσιακές υπηρεσίες φωνής, σύντομων μηνυμάτων (SMS) και δεδομένων.

Επιπρόσθετα, χάρη στο NaaS, ο (επανα-)σχεδιασμός και η παραμετροποίηση του δικτύου απλοποιείται σε έναν απλό (επανα-)προγραμματισμό κάποιων ρουτίνων λογισμικού, συντομεύοντας έτσι κατά πολύ τον χρόνο-προς-την-αγορά (time-to-market) για νέες υπηρεσίες, ακόμα και από μήνες σε ώρες [ZLCZ16]. Με άλλα λόγια, **θεωρώντας ότι η δημιουργία εικονικών/λογικών υποδομών δικτύου είναι εφικτή μέσω του E2E δυναμικού τεμαχισμού του δικτύου και άρα του προγραμματισμού εικονικών μηχανών που δυναμικά προσθαφαιρούν πόρους, τότε το δίκτυο πλέον αποτελείται από πακέτα λογισμικού μιας βιβλιοθήκης, δυνάμενα να προγραμματίζονται.** Τέλος, η λογική του NaaS εμπλουτίζει τα προϊόντα των παρόχων δικτύου αφού μπορούν να προσφέρουν κατ' απαίτηση δίκτυα σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις και όχι μόνο να κατασκευάζουν μεγάλα δίκτυα που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από μεγάλες επιχειρήσεις.

5.2 Κανονιστικές/Ρυθμιστικές Προκλήσεις

Η συνδεσιμότητα των δικτύων 5G αναμένεται να επιτρέψει την ανάπτυξη των οικοσυστημάτων IoT, υποστηρίζοντας το μετασχηματισμό κρίσιμων βιομηχανιών (ιδίως των μεταφορών, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της υγείας και της ενέργειας), δημιουργώντας νέες λύσεις για υπάρχουσες τεχνολογίες (π.χ. cloud computing). Ενδεικτικά, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή αναμένει ότι η ανάπτυξη του δικτύου 5G θα αποφέρει 213 δισεκατομμύρια ευρώ παγκοσμίως μέχρι το τέλος του 2025 [EU20], [ABI20].

Η ανάπτυξη του δικτύου 5G και των σχετικών υπηρεσιών δημιουργεί αναμφισβήτητα ευκαιρίες σε διάφορους τομείς αλλά παράλληλα παρουσιάζει διάφορες προκλήσεις, από οικονομική και κανονιστική/ρυθμιστική σκοπιά. Από ρυθμιστικής άποψης, οι κύριες νομικές προκλήσεις των δικτύων 5G περιλαμβάνουν:

- Το θεσμικό πλαίσιο των επενδύσεων,
- τον μερισμό του φάσματος,
- τη διαχείριση της ποιότητας δεδομένων,
- την ασφάλεια/ιδιωτικότητα,
- την ουδετερότητα του δικτύου και

- την προστασία των καταναλωτών.

Για καθέναν από αυτούς τους τομείς έχουν συσταθεί εθνικές και/ή κοινοτικές Αρχές ή αρμόδιοι εποπτικοί φορείς. Ως εκ τούτου, καθίσταται απόλυτα αναγκαίο το να αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη και ενιαία στρατηγική για την υποστήριξη της ανάπτυξης δικτύων 5G ή, με άλλα λόγια, **είναι απαραίτητη η ανάπτυξη μιας τυποποιημένης (standardized) διαδικασίας συντονισμού των εμπλεκόμενων Αρχών και λοιπών φορέων.**

Η στρατηγική για την ανάπτυξη του 5G αποτελεί κορυφαία προτεραιότητα στη στρατηγική ανάπτυξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Τα τελευταία χρόνια, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει αναπτύξει πολλαπλές δεσμευτικές και μη δεσμευτικές νομοθετικές πρωτοβουλίες για την αντιμετώπιση ορισμένων από τις κύριες προκλήσεις που σχετίζονται με το νέο δίκτυο 5G σε διαφορετικούς τομείς [EU20]. Στο πλαίσιο της κανονιστικής στρατηγικής της ΕΕ, τα θεσμικά όργανά της έχουν ανατεθεί στο Σώμα των Ευρωπαϊκών Ρυθμιστικών Αρχών για την Ηλεκτρονική Επικοινωνία (Body of European Regulators for Electronic Communication – BEREC), ρόλος του οποίου είναι η υποστήριξη δημόσιων και ιδιωτικών φορέων για την αντιμετώπιση των νομικών προκλήσεων που προκύπτουν από την ανάπτυξη 5G. Αντανακλώντας την πρωτοβουλία της ΕΕ, σε εθνικό επίπεδο, έχουν πραγματοποιηθεί από τις εθνικές κυβερνήσεις διάφορες δράσεις για την ανάπτυξη κατάλληλης εθνικής στρατηγικής για το 5G δίκτυο με την υποστήριξη διαφορετικών Ρυθμιστικών Αρχών (σχετικών με τις τηλεπικοινωνίες, τους καταναλωτές, το απόρρητο, κτλ.).

5.2.1 Ο Ρόλος των Ρυθμιστών για τα Δίκτυα 5G

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται οι ρόλοι των εθνικών και ευρωπαϊκών Ρυθμιστικών Αρχών σχετικά με την υλοποίηση και εφαρμογή των κοινοτικών και εθνικών νομοθεσιών, καθώς και με την προέλευσή της. Ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στο ρόλο του BEREC, που μπορεί να θεωρηθεί ως το «σημείο επαφής και συντονισμού» όλων των πρωτοβουλιών σχετικά με τη νέα ενιαία ψηφιακή αγορά (Digital Single Market) [EU4DIGITAL] η οποία περιλαμβάνει και τα δίκτυα 5G.

Σε εθνικό επίπεδο, τα τελευταία τριάντα χρόνια δημιουργήθηκαν πολλοί εθνικοί Οργανισμοί και Αρχές σε όλη την επικράτεια της ΕΕ. Η διαχείριση τέτοιων πρωτοβουλιών προϋποθέτει ένα πολύ υψηλό επίπεδο εξειδίκευσης σε πολλούς τομείς, γεγονός που οδήγησε στο μετασχηματισμό αυτών των φορέων σε υβριδικά σχήματα, αποτελούμενα

τόσο από δημόσιες όσο και από ιδιωτικές οντότητες/φορείς που αλληλεπιδρούν [HEIMS19].

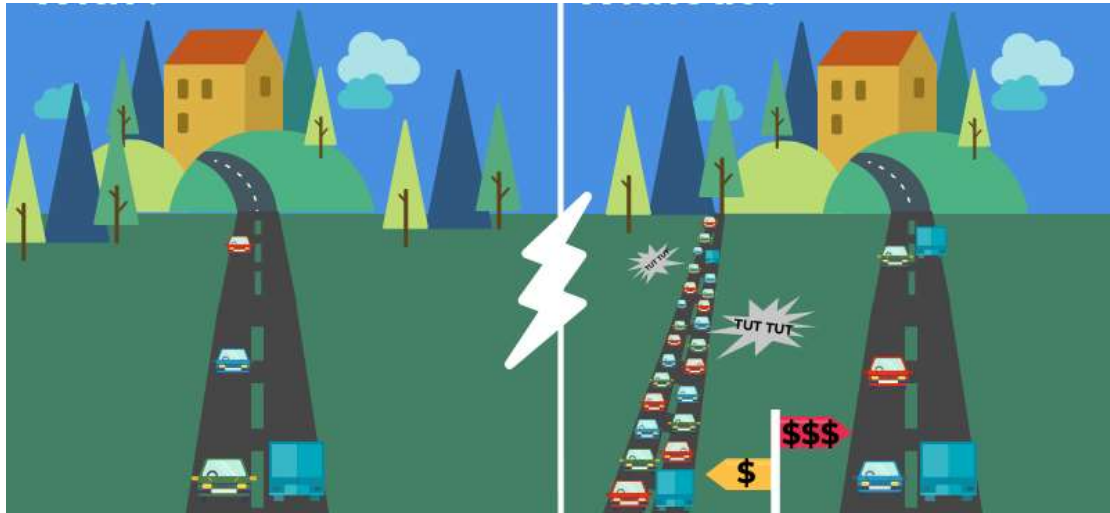
Στην Ελλάδα, για παράδειγμα, όσον αφορά στην Εθνική Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (ΕΕΤΤ), ο Πρόεδρος και οι δύο Αντιπρόεδροι, για τους τομείς ηλεκτρονικών επικοινωνιών και ταχυδρομικών υπηρεσιών αντίστοιχα, επιλέγονται και διορίζονται από το Υπουργικό Συμβούλιο, ύστερα από πρόταση του Υπουργού Ψηφιακής Πολιτικής. Τα υπόλοιπα έξι μέλη διορίζονται από τον Υπουργό Ψηφιακής Πολιτικής, Τηλεπικοινωνιών & Ενημέρωσης. Οι πράξεις διορισμού όλων των μελών δημοσιεύονται στην Εφημερίδα της Κυβερνήσεως. Για την Ολομέλεια της ΕΕΤΤ, επιλέγονται πρόσωπα εγνωσμένου κύρους, που απολαμβάνουν ευρείας κοινωνικής αποδοχής και διακρίνονται για την επιστημονική κατάρτισή τους και την επαγγελματική ικανότητα τους στον τεχνικό, οικονομικό ή νομικό τομέα. Τα μέλη, κατά την άσκηση των καθηκόντων τους, απολαμβάνουν πλήρους προσωπικής και λειτουργικής ανεξαρτησίας [ΕΕΤΤ]. Τα μέλη της ΕΕΤΤ απαρτίζονται από άτομα με αναγνωρισμένο ακαδημαϊκό έργο ή αναγνωρισμένη συμβολή στον ιδιωτικό τομέα στον εκάστοτε τομέα εξειδίκευσής τους. Παράλληλα, η ΕΕΤΤ προχωράει σε δημόσιες διαβουλεύσεις με συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων (π.χ. πάροχοι τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών) πριν την θεσμοθέτηση κάποιου κανονισμού ή ρύθμισης.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, επί του παρόντος, υπάρχουν 45 Οργανισμοί-Αρχές και αποκεντρωμένοι φορείς σε ολόκληρη την επικράτεια της ΕΕ, που έχουν συσταθεί σε διαφορετικούς τομείς και είναι σχεδιασμένοι με διαφορετικές δομές και ευθύνες. Οι Οργανισμοί-Αρχές της ΕΕ και οι αποκεντρωμένοι φορείς έχουν τον πρωταρχικό ρόλο για να καλύψουν το χάσμα μεταξύ δημόσιων και ιδιωτικών συμφερόντων και για να εξασφαλίσουν την εναρμονισμένη εφαρμογή των διατάξεων της ευρωπαϊκής νομοθεσίας.

5.2.2 Ουδετερότητα Δικτύου

Σύμφωνα με τη μέχρι τώρα ανάλυση, το βασικότερο συστατικό των δικτύων 5G αποτελεί η δυναμική και σε πραγματικό χρόνο δημιουργία και διαχείριση εικονικών λογικών δικτύων και των αντίστοιχων πόρων τους, κατά τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη αξιοποίηση των εμπλεκόμενων πόρων καθώς και η ταυτόχρονη ικανοποίηση/πλήρωση της ποιότητας υπηρεσίας (δηλαδή ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου). Τα λογικά αυτά δίκτυα πρέπει να είναι ικανά ώστε να εξυπηρετήσουν οποιαδήποτε υπηρεσία με οποιαδήποτε προδιαγεγραμμένη ποιότητα υπηρεσίας (π.χ.

ταχύτητα μετάδοσης, μέγιστη καθυστέρηση μετάδοσης, κτλ.). Όπως χαρακτηριστικά απεικονίζεται στην Εικόνα 20, η ουδετερότητα δικτύου υπονοεί ότι υπάρχει ένας κοινός δίαυλος εξυπηρέτησης όλων των δεδομένων (αριστερό μέρος της Εικόνας), και δεν επιτρέπεται «ιδιαιτέρη» μεταχείριση για συγκεκριμένα δεδομένα (δεξί μέρος της Εικόνας), π.χ. με βάση κάποια εμπορική συμφωνία με τους πελάτες.



Εικόνα 20: Εικαστική απεικόνιση της ουδετερότητας δικτύου [RESCHINI18].

Οι παραπάνω απαιτήσεις συνδέονται άμεσα με τη διαχείριση της ποιότητας συνδέσεων των πελατών (ανεξάρτητα από το μοντέλο B2C, B2B, B2B2C, κτλ.), και συνεπώς με τη συσχέτιση μεταξύ της υπηρεσίας και της ποιότητας. Με άλλα λόγια, **ο διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να γνωρίζει τις υπηρεσίες που «τρέχουν» στο δίκτυο και τα χαρακτηριστικά εκάστης εξ αυτών (πηγή και προορισμός δεδομένων, QoS, τοποθεσία, κτλ.), ώστε να «υπολογίσει» και τον βέλτιστο τρόπο κατανομής των συναφών πόρων.** Για παράδειγμα, ένα τεμάχιο δικτύου για την εξυπηρέτηση υπηρεσιών ασφάλειας οδήγησης οχημάτων θα έχει υψηλή προτεραιότητα σε σχέση με το αντίστοιχο για μια υπηρεσία παρακολούθησης καλλιέργειας. Με μια πρώτη επιφανειακή ματιά, αυτή η διάκριση φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με τη βασική απαίτηση της ουδετερότητας δικτύου (net neutrality), όπως καταγράφεται στο Άρθρο 3 του σχετικού ευρωπαϊκού Κανονισμού (Telecom Single Market ή TSM) [TSMEU15], [YL19], όπου αναφέρεται ότι:

Το άρθρο 3 παράγραφος 1 αναγνωρίζει το δικαίωμα των τελικών χρηστών για πρόσβαση και διανομή πληροφοριών και περιεχομένου, χρήση και παροχή εφαρμογών και υπηρεσιών και χρήση τερματικού εξοπλισμού της επιλογής τους, ανεξάρτητα από την τοποθεσία του τελικού χρήστη ή του παρόχου ή την τοποθεσία, την προέλευση ή

τον προορισμό των πληροφοριών, περιεχόμενο, εφαρμογή ή υπηρεσία. Το άρθρο 3 παράγραφος 2 καθιστά σαφές ότι αυτοί οι περιορισμοί δεν περιορίζουν τους παρόχους υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο και τους τελικούς χρήστες από το να συνάπτουν συμφωνίες «με βάση εμπορικές και τεχνικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά των υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο, όπως τιμή, όγκο δεδομένων ή ταχύτητα», εφόσον αυτές οι συμφωνίες δεν περιορίζουν την άσκηση των δικαιωμάτων τελικών χρηστών που ορίζονται στην παράγραφο 1. Το πρώτο εδάφιο του άρθρου 3 παράγραφος 3 απαιτεί από τους παρόχους υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο να αντιμετωπίζουν ισότιμα τα δεδομένα. Χωρίς διάκριση, περιορισμό ή παρεμβολή, και ανεξάρτητα από τον αποστολέα και τον παραλήπτη, το περιεχόμενο, τις εφαρμογές ή τις υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται ή τον τερματικό εξοπλισμό που χρησιμοποιείται.

Ωστόσο, αν κανείς εξετάσει με περισσότερη προσοχή τον Κανονισμό TSM, τότε διαπιστώνεται ότι αναγνωρίζονται κάποιες εξαιρέσεις που αφορούν:

- Στη δυνατότητα εφαρμογής «σε λογικά πλαίσια διαχείρισης κίνησης δεδομένων» (reasonable traffic management) και
- σε εξειδικευμένες υπηρεσίες (specialized services).

Όσον αφορά στην πρώτη εξαίρεση, το άρθρο 3 παράγραφος 3 ορίζει ότι οι κανόνες δεν εμποδίζουν τους παρόχους δικτύου να υλοποιήσουν λογικά μέτρα διαχείρισης της κίνησης δεδομένων, διευκρινίζοντας ότι **η διαχείριση αυτή θα πρέπει να είναι διαφανής και αμερόληπτη, ενώ δεν θα πρέπει να βασίζεται σε εμπορικά κριτήρια, αλλά σε αντικειμενικώς διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας συγκεκριμένων κατηγοριών κίνησης δεδομένων.**

Όσον αφορά στη δεύτερη εξαίρεση, το άρθρο 3 παράγραφος 5 αναγνωρίζει ότι **οι πάροχοι ηλεκτρονικών επικοινωνιών «είναι ελεύθεροι να προσφέρουν υπηρεσίες πρόσβασης στο Διαδίκτυο, οι οποίες είναι βελτιστοποιημένες για συγκεκριμένο περιεχόμενο, εφαρμογές ή συνδυασμό τους».** Στο πλαίσιο των δράσεων του BEREC σημειώνεται ότι αυτή η πρόταση είναι απλά μια εναλλακτική περιγραφή για τις «εξειδικευμένες υπηρεσίες». Ειδικότερα, αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει υπηρεσίες που «είναι βελτιστοποιημένες για συγκεκριμένο περιεχόμενο, εφαρμογές ή υπηρεσίες ή συνδυασμό τους, όπου η βελτιστοποίηση είναι απαραίτητη για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του περιεχομένου, των εφαρμογών ή υπηρεσιών για ένα συγκεκριμένο επίπεδο ποιότητας. Οι εξειδικευμένες υπηρεσίες δεν θα πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή να προσφέρονται ως αντικατάσταση των υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο και δεν πρέπει να είναι σε βάρος της διαθεσιμότητας γενικής ποιότητας υπηρεσιών πρόσβασης στο Διαδίκτυο για τελικούς χρήστες» [YL19], [KANTOLA19].

Σχετικά με τον τεμαχισμό δικτύου και τη διαχείριση πόρων στα δίκτυα 5G δεν είναι ακόμα σαφές το εάν θα εμπίπτουν ρυθμιστικά σε αυτές τις κατηγορίες των «εξειδικευμένων υπηρεσιών». Από τη μία πλευρά, η λογική πίσω από τον Κανονισμό TSM είναι ότι η διαχείριση της κίνησης δεδομένων έχει σαν στόχο την αποτελεσματική χρήση των πόρων του δικτύου και τη βελτιστοποίηση της συνολικής ποιότητας μετάδοσης. Οι εξειδικευμένες υπηρεσίες, αντίθετα, είναι «βελτιστοποιημένες για συγκεκριμένο περιεχόμενο, εφαρμογές ή υπηρεσίες ή συνδυασμό τους» (κατά το άρθρο 3 παράγραφος 5).

Δεδομένου ότι ο τεμαχισμός δικτύου έχει σχεδιαστεί για να υποστηρίζει τις εφαρμογές και υπηρεσίες που απαιτούνται από συγκεκριμένους κλάδους, φαίνεται εκ πρώτης όψεως να μην ταιριάζει απόλυτα στην κατηγορία «διαχείρισης κίνησης», η οποία εστιάζει στην απόδοση του δικτύου, στο σύνολό του. Αντίθετα, φαίνεται να «ταιριάζει» περισσότερο στην κατηγορία των εξειδικευμένων υπηρεσιών, οι οποίες εστιάζουν στις επιδόσεις συγκεκριμένου περιεχομένου, εφαρμογής ή υπηρεσίας¹⁶. Εξάλλου, η ιδέα του τεμαχισμού δικτύου φαίνεται να είναι περισσότερο προσανατολισμένη στις εφαρμογές από ό,τι στο δίκτυο. Επιπλέον, η υποσημείωση 26 της παραγράφου 101 των κατευθυντήριων γραμμών του BEREC αναγνωρίζει τη σχέση μεταξύ εξειδικευμένων υπηρεσιών και του τεμαχισμού δικτύου σημειώνοντας ότι: «ο τεμαχισμός δικτύου σε δίκτυα 5G μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών [FM18], [NKEN18].

Εφόσον, η διαφοροποίηση μεταξύ των κατηγοριών «διαχείρισης κίνησης» και «εξειδικευμένων υπηρεσιών» δεν είναι απόλυτα σαφής, στην συνέχεια θα επιχειρηθεί να αναλυθούν ακόμα περισσότερο.

5.2.2.1 Διαχείριση Κίνησης Δεδομένων – Διαφοροποίηση Ποιότητας

Η έννοια της διαφοροποιημένης ποιότητας υπηρεσίας είναι αρκετά παλιά και συναντιέται για πρώτη φορά κατά τη δεκαετία του 1970, όταν μισθωμένες γραμμές χρησιμοποιούνταν για τη σύνδεση κεντρικών υπολογιστών με τερματικούς υπολογιστές και απομακρυσμένα κέντρα, ώστε να προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με το τυπικό τηλεφωνικό δίκτυο. Μέχρι το 1976, το πρωτόκολλο X.25 είχε δημιουργηθεί για να παρέχει τη δυνατότητα για ένα παγκόσμιο δίκτυο μεταγωγής πακέτων (packet-switched). Με την αύξηση της χρήσης των δικτύων δεδομένων τη δεκαετία του 1980, δημιουργήθηκε η ανάγκη για περισσότερες επιλογές ποιότητας, που οδήγησε στο

¹⁶ Η Παράγραφος 75 του BEREC περιέχει παρόμοια περιγραφή για τις εξειδικευμένες υπηρεσίες.

πρωτόκολλο ATM (Asynchronous Transfer Mode) και το οποίο εξελίχθηκε στα μοντέρνα πρωτόκολλα MPLS (Multi Protocol Label Switching) [ON20], [HZDS20]

Όλα αυτά τα πρωτόκολλα έχουν ως γενικότερο στόχο τη δημιουργία ειδικών ροών (flows) για την παροχή συγκεκριμένης ποιότητας υπηρεσίας. Από την άποψη της προτυποποίησης με βάση το μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection), τα πρωτόκολλα αυτά κινούνται στα επίπεδα 2 και 3 (μεταγωγής (switching) και δρομολόγησης (routing)). Η έννοια της διαφοροποιημένης ποιότητας υπηρεσίας εισήχθη αργότερα και τις κινητές επικοινωνίες μέσω των δεικτών QCI (QoS Class Identifier) στα πρότυπα του LTE από την Έκδοση 8 και εφεξής [3GPP23203Rel8]. Στη συνέχεια, η ανάπτυξη τεχνολογιών όπως το SDN και το NFV έδωσαν νέα ώθηση στη δυνατότητα για δυναμική διαφοροποίηση της ποιότητας επικοινωνίας, αφού πλέον οι λειτουργίες του δικτύου ισοδυναμούν με ρουτίνες του προγράμματος λογισμικού.

Όπως σημειώθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ο κανονισμός TSM επιτρέπει κατ'εξαίρεση την «εντός λογικών πλαισίων» διαχείριση της κίνησης, εφόσον αυτή είναι διαφανής και χωρίς διακρίσεις, ενώ δεν βασίζεται σε εμπορικά συμφέροντα, αλλά στην αντικειμενική ικανοποίηση των τεχνικών απαιτήσεων των εκάστοτε κατηγοριών κίνησης. Ο παραπάνω κανόνας συμπληρώνεται από την απαίτηση ώστε η διαχείριση να μην θέτει φραγμούς/περιορισμούς, να μην καθυστερεί, να μην αλλοιώνει, να μην περιορίζει και να μην κάνει διακρίσεις (discriminate) με βάση το περιεχόμενο των δεδομένων, την εφαρμογή ή την υπηρεσία που τελικά προσφέρεται. Τέλος, στον παραπάνω κανόνα προστίθενται τρεις προϋποθέσεις για την εφαρμογή του, ως εξής:

- Η συμβατότητα με την εθνική νομοθεσία,
- η διατήρηση της ασφάλειας και της ακεραιότητας του δικτύου, των υπηρεσιών και των συσκευών που εξυπηρετεί¹⁷ και
- η αποτροπή φαινομένων συμφόρησης.

Τι είναι, όμως, η «εντός λογικών πλαισίων» διαχείριση της κίνησης; Ο σχετικός ορισμός δίνεται ως εξής από τον Κανονισμό TSM: *Ο στόχος της «εντός λογικών πλαισίων» διαχείριση κίνησης είναι η αποδοτική χρήση των δικτυακών πόρων και η βελτιστοποίηση της συνολικής ποιότητας μεταδόσεων, σε ένα δίκτυο με αντικειμενικά διαφοροποιημένες απαιτήσεις ποιότητας ανά υπηρεσία ή εφαρμογή.*

Ερμηνεύοντας τα παραπάνω, καταρχήν φαίνεται ότι επιτρέπεται στους διαχειριστές του δικτύου να διαχειρίζονται με διαφορετικό τρόπο υπηρεσίες που αντικειμενικά έχουν

¹⁷ Περιλαμβάνει την πρόληψη από κυβερνο-επιθέσεις που συμβαίνουν μέσω της χρήσης κακόβουλου λογισμικού ή την κλοπή της ταυτότητας των χρηστών.

διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας (π.χ. σε ταχύτητα μετάδοσης ή σε λανθάνουσα καθυστέρηση) προς το όφελος του συνόλου του δικτύου. Αρκεί η διαχείριση αυτή να βασίζεται καθαρά σε τεχνικούς λόγους και όχι σε εμπορικές συμφωνίες. Αυτό σημαίνει ότι κίνηση δεδομένων που προέρχονται από υπηρεσίες/εφαρμογές, που απαιτούν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά, θα πρέπει να υπόκεινται σε διαχείριση με τον ίδιο τρόπο. Για παράδειγμα, δύο εφαρμογές για επιτήρηση καλλιέργειας με ίδιες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, θα πρέπει να μην διαφοροποιούνται ως προς τον τρόπο που το δίκτυο της εξυπηρετεί¹⁸.

Εκτός από τον Κανονισμό TSM [TSMEU15], οι οδηγίες του BEREC περιλαμβάνουν 19 διακριτές παραγράφους για την υλοποίηση της διαχείρισης της κίνησης, ως εξαίρεση στον γενικό κανόνα περί της ουδετερότητας του δικτύου [BEREC16]. Όπως και στον Κανονισμό TSM, στο πλαίσιο που τίθεται από το BEREC αναφέρεται ότι η διαχείριση της κίνησης **δεν θα πρέπει να βασίζεται σε εμπορικές συμφωνίες¹⁹, αλλά μόνο σε αντικειμενικώς διαφορετικές απαιτήσεις υπηρεσίας για κάθε κατηγορία κίνησης**. Δίνονται συγκεκριμένα παραδείγματα για το τι περιλαμβάνονται στις αντικειμενικώς διαφορετικές απαιτήσεις, όπως:

- Καθυστέρηση μετάδοσης (latency).
- Διακύμανση καθυστέρησης μετάδοσης (jitter).
- Απώλεια πακέτων (packet loss).
- Εύρος ζώνης (bandwidth).

Επιπλέον, αναφέρονται οι εφαρμογές που είναι «ευαίσθητες» στο χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της αποστολής και της λήψης πακέτων, ως παράδειγμα εφαρμογής που αντικειμενικά απαιτεί διαφορετική ποιότητα υπηρεσίας και συνεπώς διαφορετική αντιμετώπιση από τον διαχειριστή του δικτύου. Γενικές εφαρμογές, όπως π.χ. ο μερισμός αρχείων, η τηλεφωνία μέσω IP (VoIP) και η αποστολή μηνυμάτων, μπορούν επίσης να

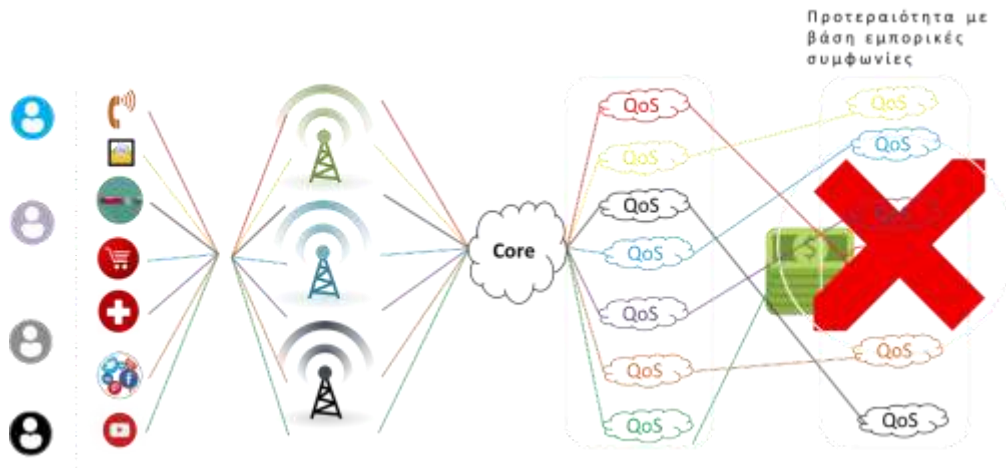
¹⁸ Να σημειωθεί ότι η διαχείριση της κίνησης προϋποθέτει και τις αντίστοιχες μετρήσεις ποιότητας. Τέτοιες μετρήσεις δεν θα πρέπει να διατηρούνται από τον διαχειριστή του δικτύου για περισσότερο από όσο χρειάζεται για τους σκοπούς της διαχείρισης της κίνησης του δικτύου.

¹⁹ Παράδειγμα εμπορικής συμφωνίας είναι η επιβολή επιπρόσθετων χρεώσεων για τη χρήση συγκεκριμένης κατηγορίας κίνησης (όπως π.χ. video streaming). Άλλο παράδειγμα είναι η διαφορετική τιμολόγηση για συγκεκριμένες υπηρεσίες/εφαρμογές, π.χ. κάποιου συγκεκριμένου παρόχου υπηρεσιών video on demand [BEREC16, Παράγραφος 68].

υπόκεινται σε κανόνες διαχείρισης κίνησης μόνο εάν ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις:

- Η γενική εφαρμογή απαιτεί αντικειμενικώς διαφορετική QoS.
- Γενικές εφαρμογές με ισοδύναμες QoS αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο.
- Η διαχείριση κίνησης για αυτές τις εφαρμογές, εφαρμόζεται μόνο για να ικανοποιήσουν το διαφορετική QoS.

Στην εργασία [YL19] αποτιμάται, σύμφωνα με τους συγγραφείς, ότι τόσο ο Κανονισμός TSM όσο και οι οδηγίες του BEREC για την «σε λογικά πλαίσια διαχείριση της κίνησης» δεν περιλαμβάνουν τα επιχειρηματικά μοντέλα που εισάγονται με το 5G. Το επιχείρημα είναι ότι ο τεμαχισμός δικτύου αλλά και η διαχείριση των πόρων στα δίκτυα 5G δεν «επικεντρώνονται» πρωτίστως στις συνολικές επιδόσεις του δικτύου, αλλά στην ποιότητα υπηρεσίας της κάθε διακριτής υπηρεσίας/εφαρμογής. Επιπλέον, ακόμα και εάν θεωρηθούν τα επιχειρηματικά μοντέλα 5G ως περιπτώσεις διαχείρισης της κίνησης, η απαγόρευση του Κανονισμού για διαχείριση της κίνησης με βάση εμπορικές συμφωνίες θα ερχόταν σε αντίθεση με τη λογική της χρέωσης ανά δράση κατάτμησης του δικτύου. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Κανονισμό TSM δεν επιτρέπεται να δίνεται προτεραιότητα σε μια δράση κατάτμησης δικτύου -και στην αντίστοιχη φέτα δικτύου- για υπηρεσίες ασφάλειας οχημάτων (ΥΠ1), σε σχέση με μια δράση κατάτμησης για επιτήρηση καλλιέργειας (ΥΠ2) -και στην αντίστοιχη της δικτυακή φέτα-, επειδή ο πελάτης της ΥΠ1 καταβάλει ενδεχομένως μεγαλύτερο χρηματικό τίμημα. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 21, ο τεμαχισμός δικτύου E2E θα πρέπει να γίνεται με βάση τις τεχνικές προδιαγραφές της εκάστοτε υπηρεσίας (QoS) και δεν θα πρέπει η απόφαση κατανομής των πόρων να λαμβάνει υπόψη τυχόν εμπορικές συμφωνίες.



Εικόνα 21: Η παροχή υπηρεσιών κατά προτεραιότητα με βάση εμπορικές συμφωνίες απαγορεύεται.

5.2.2.2 Εξειδικευμένες Υπηρεσίες

Ο Κανονισμός TSM αναγνωρίζει την ανάγκη για την παροχή υπηρεσιών με διαφοροποιημένες απαιτήσεις σε ποιότητα υπηρεσίας που δεν μπορεί να προσφέρει η συμβατική υπηρεσία πρόσβασης στο Διαδίκτυο, αναφέροντας σαν παράδειγμα τις υπηρεσίες M2M. Αυτές τις υπηρεσίες τις χαρακτηρίζει ως «εξειδικευμένες υπηρεσίες», οι οποίες επιτρέπεται να παρέχονται εφόσον δεν επηρεάζονται οι υφιστάμενες υπηρεσίες ως προς τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα. Η ευθύνη για την αξιολόγηση των επιπτώσεων αυτών των εξειδικευμένων υπηρεσιών τις υπάρχουσες υπηρεσίες, αφήνεται στην αρμοδιότητα των εθνικών ρυθμιστικών Αρχών (εν προκειμένω στην ΕΕΤΤ για την Ελλάδα) με βάση αντικειμενικές μετρήσεις ποιότητας για:

- Καθυστέρηση μετάδοσης (latency).
- Διακύμανση καθυστέρησης μετάδοσης (jitter).
- Απώλεια πακέτων (packet loss).
- Εύρος ζώνης (bandwidth).
- Συμφόρηση δικτύου.
- Πραγματικές ταχύτητες σε σχέση με τις διαφημιζόμενες.
- Επιδόσεις των συμβατικών υπηρεσιών και σύγκριση με της επιδόσεις των εξειδικευμένων υπηρεσιών.
- Ποιότητα με βάση την αξιολόγηση των τελικών χρηστών.

Παρόλο που δεν είναι σαφές το πώς θα γίνονται αυτές οι μετρήσεις και αξιολογήσεις ποιότητας (δηλαδή σχετικά με το ποια συγκεκριμένη μεθοδολογία ή άλλη προσέγγιση θα πρέπει να ακολουθείται), είναι σαφής η πρόθεση του ρυθμιστή ώστε να ελέγξει την

επίδραση των νέων υπηρεσιών τις συμβατικές υπηρεσίες πρόσβασης στο Διαδίκτυο και για να διασφαλίσει την ομαλή παροχή τους.

Ωστόσο, ο Κανονισμός TSM κατανοεί ότι στις κινητές επικοινωνίες, λόγω των μεταβλητών συνθηκών, η αρνητική επίδραση των εξειδικευμένων υπηρεσιών μπορεί να είναι πιο πιθανή. Για αυτόν το λόγο, προτείνει ότι μια σύντομη και μικρής έντασης αρνητική επίδραση στις κινητές επικοινωνίες δεν θα πρέπει να συνιστά λόγο για τον αποκλεισμό ανάπτυξης τέτοιων εξειδικευμένων υπηρεσιών. Για παράδειγμα, θα ήταν μη αποδεκτή μια συμφόρηση αρκετών λεπτών στο δίκτυο λόγω μιας υπηρεσίας M2M όπου η ταυτόχρονη εκπομπή δεδομένων από χιλιάδες συσκευές θα εμπόδιζε χρήστες κινητής τηλεφωνίας οι οποίοι δεν θα είχαν πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Τουναντίον, θα ήταν αποδεκτό το εάν η υπηρεσία M2M προκαλούσε μια μικρή πτώση της ταχύτητας πρόσβασης από smartphone, για μερικά μόνο δευτερόλεπτα. Η ίδια επίδραση θα ήταν μη αποδεκτή εάν αφορούσε συσκευές με κρίσιμη συνδεσιμότητα, όπως για παράδειγμα συσκευές αποτροπής σύγκρουσης σε αυτοκίνητα. Συμπερασματικά, γίνεται κατανοητό **ότι υπάρχει ένα μεγάλο θεματικό «κενό» σχετικά με το τι μπορεί θεωρείται ως αποδεκτό αναφορικά με την επίδραση των «εξειδικευμένων υπηρεσιών» σε συμβατικές υπηρεσίες ή ακόμα περισσότερο σε άλλες «εξειδικευμένες υπηρεσίες».**

Οι οδηγίες BEREC, όντας στην ίδια λογική με τον Κανονισμό TSM, αναγνωρίζουν την ανάγκη για εξειδικευμένες υπηρεσίες οι οποίες απαιτούν συγκεκριμένη ποιότητα υπηρεσίας που δεν υφίσταται σε συμβατικές υπηρεσίες πρόσβασης²⁰. Επιπρόσθετα, οι οδηγίες αναφέρουν ότι η απαίτηση ποιότητας υπηρεσίας μπορεί να είναι ακόμα και μεταβλητή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Για παράδειγμα, υπηρεσίες video streaming μπορεί να έχουν μεταβλητές απαιτήσεις QoS ανάλογα με την ανάλυση μετάδοσης (standard definition, high definition, κτλ.). Μια ακόμα σημαντική σημείωση για τα επιχειρηματικά μοντέλα 5G (π.χ. B2B ή B2B2C) είναι η αναγνώριση ότι οι εξειδικευμένες υπηρεσίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τις επιχειρήσεις.

Οι οδηγίες BEREC είναι σαφώς πιο κοντά στη λογική των δικτύων 5G και συγκεκριμένα του δυναμικού τεμαχισμού δικτύου, καθώς (Παράγραφος 110) αναφέρουν ότι οι εξειδικευμένες υπηρεσίες δεν μπορούν να παρέχονται μέσω της απλής λογικής της δημιουργίας προτεραιοτήτων σε σχέση με τις συμβατικές υπηρεσίες.

²⁰ Ως παραδείγματα δίνονται από τον BEREC η διάθεση φωνής μέσω LTE (VoLTE), η τηλεόραση μέσω IP (IPTV), οι υπηρεσίες υγείας σε πραγματικό χρόνο (π.χ. απομακρυσμένα χειρουργεία), υπηρεσίες M2M και γενικές εφαρμογές δημοσίου ενδιαφέροντος.

Αντίθετα, θα μπορούσαν να παρέχονται μέσω συνδέσεων που είναι λογικά διαχωρισμένες από τις συμβατικές συνδέσεις πρόσβασης στο Διαδίκτυο.

Από τα παραπάνω διαφαίνεται ότι τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα που εισάγουν τα δίκτυα 5G «ταιριάζουν» περισσότερο στη λογική των «εξειδικευμένων υπηρεσιών» που αναφέρονται στον Κανονισμό TSM και τις οδηγίες BEREC, με της τελευταίες να αναφέρονται εμφανώς ξεκάθαρα σε υπηρεσίες 5G (υπηρεσίες M2M, υπηρεσίες υγείας σε πραγματικό χρόνο, κτλ.), καθώς και σε επιχειρηματικά μοντέλα B2B. Επιπλέον υφίστανται αναφορές σε συγκεκριμένες τεχνολογίες με τις οποίες θα μπορούσε να υλοποιηθεί η εξυπηρέτηση τέτοιων υπηρεσιών, όπως ο τεμαχισμός δικτύου. Ωστόσο, δεν είναι απόλυτα ξεκάθαρο το «βάθος» της επιτρεπόμενης δυναμικότητας και ευελιξίας του δικτύου, καθώς δεν αναλύεται περαιτέρω εάν οι εξειδικευμένες υπηρεσίες (και ο συνδυασμός αυτών) θα πρέπει να είναι προκαθορισμένες ή εάν θα επιτρέπεται η δημιουργία οποιασδήποτε υπηρεσίας με οποιαδήποτε απαίτηση σε ποιότητα υπηρεσίας, κάτι που βρίσκεται στην καρδιά της δυναμικότητας των δικτύων 5G.

Συμπερασματικά²¹, φαίνεται ότι ο Κανονισμός TSM και οι οδηγίες του BEREC δεν είναι απόλυτα σαφείς για το εάν το υπάρχον ρυθμιστικό πλαίσιο είναι αρκετό για τη νομική υποστήριξη των υπηρεσιών 5G, σε όλο το εύρος τους. Για να αποφευχθούν προβλήματα λόγω της δυνατότητας διαφορετικής ερμηνείας των κανονισμών αυτών από κάθε εμπλεκόμενο, ανάλογα και με τα εκάστοτε συμφέροντα, θα πρέπει να συνταχθούν νέοι κανονισμοί και οδηγίες καθώς οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις συντάσσονται με τη λογική των προηγούμενων γενιών δικτύων που έχουν ένα σαφή περιορισμό: δηλαδή, δεν υποστηρίζουν τη δυνατότητα υποστήριξης οποιασδήποτε υπηρεσίας με οποιαδήποτε απαίτηση σε σχέση με την ποιότητα. Αντίθετα, τα δίκτυα προηγούμενων γενιών χαρακτηρίζονται από τον πεπερασμένο χαρακτήρα των υποστηριζόμενων υπηρεσιών.

5.2.3 Ασφάλεια

Από την έως τώρα ανάλυση έχει καταστεί σαφές το ότι τα δίκτυα 5G διαφέρουν σημαντικά από τα υφιστάμενα δίκτυα λόγω της δυνατότητας που προσφέρουν για τον μερισμό των πόρων δικτύου από άκρο-σε-άκρο μεταξύ πολλών διαφορετικών ενδιαφερόμενων μερών (stakeholders), όπως παρόχων υπηρεσιών, διαχειριστών δικτύων, παρόχων υποδομών, τελικών χρηστών (είτε χονδρικής είτε λιανικής), κτλ. Ο

²¹ Το συμπέρασμα αυτό αποτελεί προσωπική γνώμη του συγγραφέα αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, με βάση την ανάλυση της βιβλιογραφίας.

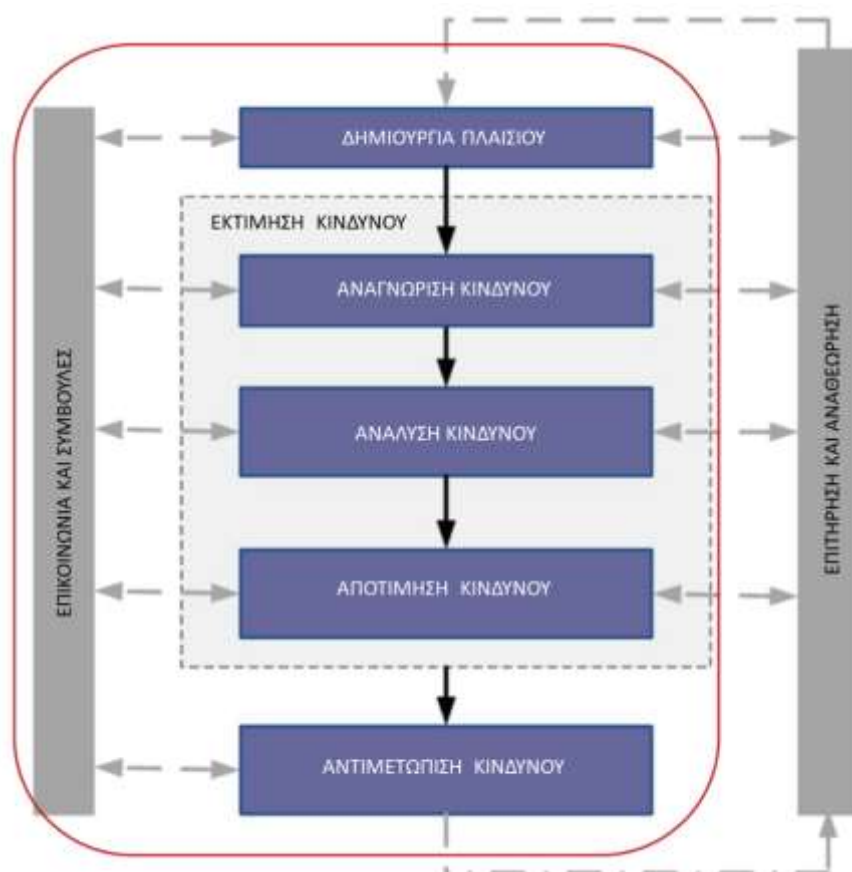
μερισμός του δικτύου δημιουργεί, εξ ορισμού, υψηλή διακινδύνευση και μεγάλες απαιτήσεις για τη διατήρηση της ασφάλειας του δικτύου.

Ταυτόχρονα όμως, δημιουργείται και μια επιπρόσθετη ανάγκη για συνεργασία μεταξύ πολλών διαφορετικών μερών για την επίτευξη της ασφάλειας από άκρο-σε-άκρο αλλά και στο σύνολο του δικτύου. Αυτή η προσπάθεια δεν συνιστά μια μορφή τετριμμένης προσπάθειας, καθώς κάθε ενδιαφερόμενο μέρος έχει διαφορετική αντίληψη για την ασφάλεια και έχει διαφορετικά κίνητρα και/ή στόχους. Εξαιτίας αυτού του σύνθετου μωσαϊκού, επιβάλλεται η παρέμβαση κάποιας ανώτερης ρυθμιστικής Αρχής, η οποία θα προσδιορίσει τους κανόνες που θα πρέπει να εφαρμοστούν για την επίτευξη της ασφάλειας των δικτύων 5G. Στόχος αυτής της προσέγγισης θα είναι η επίτευξη της λεγόμενης «ασφάλειας μέσω σχεδιασμού» (security by design), η οποία περιλαμβάνει τις ακόλουθες προκλήσεις [BATALA20]:

- Τα σενάρια κινδύνων τα οποία θα πρέπει να λάβει υπόψη ο ρυθμιστής για τις φάσεις δημιουργίας και λειτουργίας των δικτύων 5G. Δεδομένων των πρακτικά απεριόριστων εφαρμογών/υπηρεσιών που προσφέρει το 5G και των επιχειρηματικών μοντέλων B2B, B2B2C και B2C, η προσπάθεια αυτή είναι πραγματικά μια τεράστια πρόκληση.
- Τις πιθανές πηγές των κινδύνων (π.χ., οι πιθανές επιθέσεις) που θα πρέπει να λάβει υπόψη ο ρυθμιστής, τόσο για τη φάση δημιουργίας όσο και τη φάση λειτουργίας των δικτύων 5G.
- Την υποχρεωτική επιβολή των κανονισμών για όλα τα εμπλεκόμενα μέρη (από τους κατασκευαστές εξοπλισμού, μέχρι τους παρόχους υπηρεσιών) ώστε να διασφαλιστεί η «ασφάλεια μέσω σχεδιασμού».
- Την εύρεση των μετρικών εκείνων που θα χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της ασφάλειας των δικτύων 5G.
- Τη συμβατότητα με πιθανούς εθνικούς κανονισμούς και περιορισμούς.

Όσον αφορά στις πιθανές επιθέσεις, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμιστής δεν ενδιαφέρεται για τις εξωτερικές επιθέσεις σε μεμονωμένα στοιχεία του δικτύου, καθώς αυτά θα πρέπει να μπορούν να αντιμετωπιστούν από τον εκάστοτε πάροχο δικτύου και/ή τον προμηθευτή υλικού/λογισμικού. Αυτό που έχει σημασία για τον ρυθμιστή είναι εκείνου του τύπου οι επιθέσεις στις οποίες οι διαχειριστές του δικτύου δεν μπορούν να αντιδράσουν κατάλληλα.

Στην εργασία [ΒΑΤΑΛΑ20], ακολουθήθηκε η μεθοδολογία του EN-ISO/IEC 27005 (Εικόνα 22), με σκοπό να προσαρμοστεί στις ανάγκες των δικτύων 5G και του τεμαχισμού δικτύου, ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπόψη η συμβατότητα με τις προσδοκίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής.



Εικόνα 22: Ενέργειες διαχείρισης κινδύνων [ISO18].

Τα χαρακτηριστικά των δικτύων 5G που συνδέονται άμεσα με τους κινδύνους ασφαλείας και που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη στα πιθανά μέτρα αντιμετώπισης είναι τα παρακάτω:

- Τα δίκτυα 5G είναι δίκτυα παροχής υπηρεσιών και όχι μόνο δίκτυα παροχής συνδεσιμότητας, όπως τα μέχρι τώρα δίκτυα.
- Το επίπεδο ελέγχου (σηματοδοσία) διαχωρίζεται από το επίπεδο χρήστη (ροή δεδομένων χρήστη).
- Στα δίκτυα 5G υπάρχει δυναμική διαχείριση πόρων (π.χ. δυναμικός τεμαχισμός δικτύου).
- Τα εν λόγω δίκτυα βασίζονται και σε ανοικτές διεπαφές (open interfaces), ενώ παρέχεται η δυνατότητα σύνδεσης συγκεκριμένων λειτουργιών με τις διεπαφές

αυτές, με στόχο τη διαλειτουργικότητα (interoperability) μεταξύ διαφορετικών προμηθευτών εξοπλισμού/λογισμικού.

- Η αρχιτεκτονική των δικτύων 5G επιτρέπει το διαχωρισμό της κίνησης με βάση την εκάστοτε εφαρμογή/υπηρεσία που εξυπηρετείται.
- Επιτρέπεται η χρήση πολλών διαφορετικών τύπων ασύρματης πρόσβασης (π.χ. μέσω WiFi ή μέσω μακροκυψέλης, κτλ.).

Κοινός παρονομαστής στα παραπάνω είναι οι τεχνολογίες SDN και NFV, δηλαδή το γεγονός ότι οι περισσότερες λειτουργίες είναι ουσιαστικά προγράμματα λογισμικού. Το γεγονός αυτό αποτελεί και έναν από τους μεγαλύτερους κινδύνους του 5G καθώς η παρέμβαση σε αυτά τα εν δυνάμει προγράμματα μπορεί να γίνει μέσω της παρέμβασης στον κώδικα του προγράμματος, σε αντίθεση με τα συμβατικά δίκτυα όπου αντίστοιχη παρέμβαση θα επέβαλλε την αλλαγή κάποιου στοιχείου υλισμικού (hardware) [AHMAD18].

5.2.4 Ιδιωτικότητα και Προσωπικά Δεδομένα

Όπως συζητήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα δίκτυα 5G και ο δυναμικός τρόπος κατανομής των πόρων στις διάφορες υπηρεσίες, προϋποθέτουν την ύπαρξη μετρήσεων, όπως το είδος της υπηρεσίας (π.χ. eMBB, URLLC, mMTC), η τοποθεσία του χρήστη, καθώς και η χρήση ιστορικών δεδομένων (analytics) [MARTINI20]. Ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία των Δεδομένων (General Data Protection Regulation ή GDPR) [GDPR16] από την άλλη, θέτει συγκεκριμένους περιορισμούς για τον τύπο των δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, να υποστούν επεξεργασία και να αποθηκευτούν. Ο Κανονισμός περιέχει έξι βασικές αρχές για την επεξεργασία των δεδομένων:

- Νομιμότητα (lawfulness), δικαιοσύνη (fairness) και διαφάνεια (transparency): Η διαφάνεια έχει να κάνει με την πληροφόρηση του υποκειμένου του οποίου οι πληροφορίες θα χρησιμοποιηθούν, σχετικά με το είδος της επεξεργασίας που θα υποστούν. Η δικαιοσύνη και η διαφάνεια σημαίνει ότι η επεξεργασία πρέπει να ικανοποιεί τις δοκιμές (tests) που περιγράφονται στον Κανονισμό GDPR.
- Περιορισμός του σκοπού: Τα προσωπικά δεδομένα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο για συγκεκριμένο, πλήρως αποσαφηνισμένο και νόμιμο σκοπό. Η επεξεργασία των δεδομένων απαγορεύεται πέραν αυτού του σκοπού χωρίς τη συγκατάθεση του υποκειμένου.

- Ελαχιστοποίηση δεδομένων: Η συλλογή των δεδομένων θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή για το συγκεκριμένο σκοπό που εξυπηρετούν και αυστηρά περιορισμένη για το σκοπό αυτό.
- Ακρίβεια: Τα δεδομένα πρέπει να είναι ακριβή και όπου κρίνεται απαραίτητο να επικαιροποιούνται.
- Περιορισμοί αποθήκευσης: Τα προσωπικά δεδομένα αποθηκεύονται με τέτοιον τρόπο που επιτρέπει την αναγνώριση των δεδομένων για τον σκοπό για τον οποίο υπόκεινται σε επεξεργασία.
- Ακεραιότητα και απόρρητο, ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων.

Ο Κανονισμός GDPR τέθηκε σε ισχύ από τη 25^η Μαΐου 2018 μετά από μια μακρά περίοδο αναμονής, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι οι ομάδες εργασίας του 5G είχαν γνώση των περιεχομένων του και τη δυνατότητα να τον εκλάβουν υπόψη κατά το σχεδιασμό των προδιαγραφών, όσον αφορά στην προστασία των δεδομένων, στην ιδιωτικότητα και στην ασφάλεια [ORTIZ20]. Εκτός από τους οργανισμούς προτυποποίησης, οι κατασκευαστές τηλεπικοινωνιακού εξοπλισμού θα πρέπει να υιοθετήσουν τη λογική της «ασφάλειας και ιδιωτικότητας από το σχεδιασμό» (“security and privacy by design”). Επιπρόσθετα, οι πάροχοι υπηρεσιών θα πρέπει να αναλύσουν το πώς ο Κανονισμός GDPR επηρεάζει τα επιχειρηματικά μοντέλα τους και να λάβουν μέτρα για να διασφαλίσουν τη συμβατότητά τους. Η συμβατότητα με τον Κανονισμό GDPR περιπλέκεται ακόμα περισσότερο, σε περιπτώσεις όπου απαιτείται λειτουργία στα σύνορα μεταξύ χωρών όπου ενδέχεται να ισχύουν διαφορετικοί κανονισμοί – ρυθμιστικά πλαίσια.

Στην εργασία [ORTIZ20], οι συγγραφείς επικεντρώνονται στις υπηρεσίες αυτοματοποιημένης οδήγησης, όπου ο εντοπισμός και η εκμετάλλευση αδυναμιών ασφαλείας θα μπορούσε να έχει τεράστιες επιπτώσεις ακόμα και για ανθρώπινες ζωές. Ο κανονισμός GDPR υπαγορεύει την προστασία των μηνυμάτων που περιέχουν προσωπικές πληροφορίες όπως τον κωδικό ταυτοποίησης οχήματος, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για κακόβουλες ενέργειες. Για παράδειγμα, ένας κακόβουλος χρήστης μπορεί να κατασκευάσει ένα προφίλ ενός συγκεκριμένου οχήματος παρατηρώντας πού και πότε χρησιμοποιούνται υπηρεσίες από το συγκεκριμένο όχημα. Οι ίδιοι συγγραφείς προτείνουν την τεχνολογία υπολογιστικής άκρου για πολλαπλή πρόσβαση (multi-access edge computing ή MEC) ως μια λύση για να μεταφερθούν τα θέματα ιδιωτικότητας και ασφαλείας στους τοπικούς παρόχους δικτύου, οι οποίοι θα εφαρμόζουν την εκάστοτε πολιτική και τους κανονισμούς. Με αυτόν τον τρόπο οι κατασκευαστές οχημάτων δεν θα

είναι υποχρεωμένοι να λάβουν υπόψη στην υλοποίηση κάθε πιθανό κανονισμό, παγκοσμίως.

Σε μία άλλη προσέγγιση, η Ericsson²² αναλύοντας τις απαιτήσεις του Κανονισμού GDPR, πρότεινε τα ακόλουθα θέματα που θα πρέπει να λάβουν υπόψη οι κατασκευαστές εξοπλισμού 5G, οι πάροχοι υπηρεσιών 5G και οι οργανισμοί προτυποποίησης:

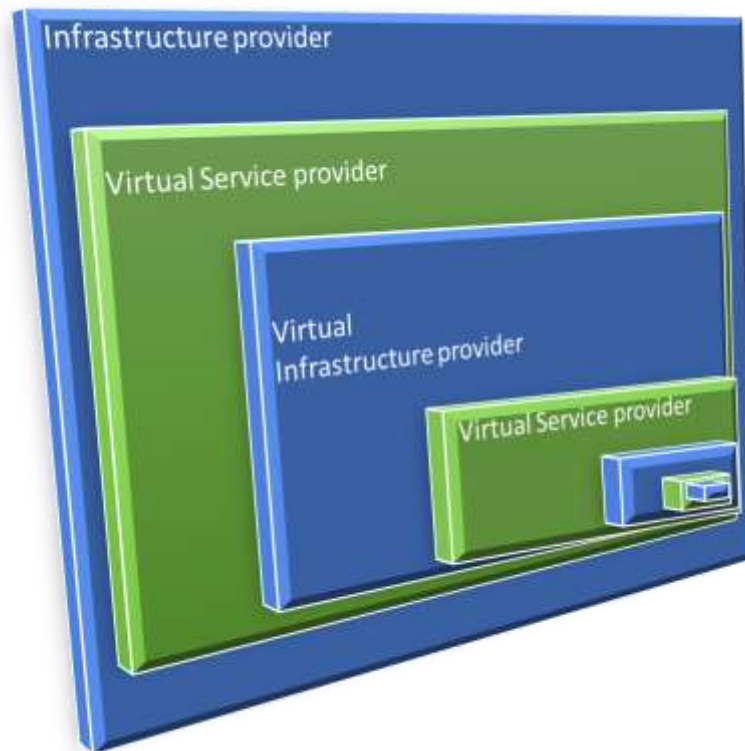
- **Αυτοματισμός:** Η τεχνολογία εικονικοποίησης (virtualization) αποτελεί βασικό συστατικό των δικτύων 5G, με τις εικονικές λειτουργίες δικτύου (VNFs) να πρέπει να ξεκινούν, να κλιμακώνονται (scale up/down) και να τερματίζουν αυτόματα. Ως εκ τούτου, γίνεται αδύνατο ή τουλάχιστον εξαιρετικά δύσκολο να διασφαλίζεται χειροκίνητα η ικανοποίηση των απαιτήσεων που θέτει ο Κανονισμός GDPR. Για αυτό το λόγο, θα πρέπει να αναπτυχθούν εκείνοι οι αυτοματοποιημένοι μηχανισμοί που θα διασφαλίζουν σε πραγματικό χρόνο συμμόρφωση με τον Κανονισμό GDPR, και οι οποίοι θα συλλέγουν τις απαραίτητες πληροφορίες σε περίπτωση παραβάσεων ασφαλείας και θα τις αποστέλλουν στα κατάλληλα κανάλια επικοινωνίας (π.χ. στον ελεγκτή GDPR). Αυτοματοποιημένες διαδικασίες θα πρέπει επίσης να υπάρχουν για αντικείμενα σχετικές με τον τελικό χρήστη (όπως συμφωνίες συναίνεσης, μεταφορά δεδομένων, διαγραφή δεδομένων, κτλ.).
- **Εκ των προτέρων ενέργειες:** Η εξασφάλιση ασφάλειας και ιδιωτικότητας από τον σχεδιασμό θα πρέπει να υιοθετηθεί από τους οργανισμούς προτυποποίησης και στη συνέχεια από τους κατασκευαστές εξοπλισμού. Οι μηχανισμοί ασφαλείας από τον σχεδιασμό έχουν αποδειχθεί πολύ πιο ισχυροί, (π.χ. σε περιπτώσεις ενσωματωμένων (embedded) SIM (eSIM))²³.
- **Αποφυγή πολύπλοκων λύσεων (over-engineering):** Οι απαιτήσεις του Κανονισμού GDPR θα πρέπει να ικανοποιούνται και να διασφαλίζονται μέσω απλών λύσεων που θα είναι εφικτές, πρακτικές και θα επιτρέπουν την αντιμετώπιση προβλημάτων (troubleshooting). Υπευθυνότητα και σοβαρότητα: Ο Κανονισμός GDPR θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη, καθώς πιθανή παραβίασή του επιφέρει τεράστια πρόστιμα που θα αποτελούσαν κίνδυνο ακόμα και για την οικονομική επιβίωση των εμπλεκόμενων εταιρειών.

²² Για περισσότερες πληροφορίες βλέπε: <https://www.ericsson.com/en/blog/2017/12/5g-and-the-eu-general-data-protection-regulation>

²³ Βλέπε: <https://www.gsma.com/esim/>

5.2.4.1 Ανίχνευση και Εντοπισμός Χρήσης Υπηρεσίας

Τα δίκτυα 5G και τα επιχειρηματικά μοντέλα που εισήγαγαν, δημιουργούν μια πολυπλοκότητα σχετικά με το ποιος τελικά χρησιμοποιεί τους πόρους του δικτύου αφού ο πάροχος υποδομών μπορεί να προμηθεύσει μέρος των υποδομών σε τρίτους, οι οποίοι με τη σειρά τους γίνονται εικονικοί πάροχοι υποδομών. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 23, οι εικονικοί πάροχοι υποδομών με τη σειρά τους μπορούν να παρέχουν μέρος αυτής της υποδομής σε παρόχους υπηρεσιών ή και να προσφέρουν οι ίδιοι υπηρεσίες. Αυτή η αρχιτεκτονική αναμένεται ότι θα δημιουργήσει προβλήματα στις συνήθεις διαδικασίες και τακτικές για την ανίχνευση ιχνών εγκληματικών πράξεων, σε αναλογία με τα προβλήματα που δημιούργησε η τεχνολογία νεφροϋπολογιστικής (cloud computing), με την οποία τα ίχνη διασπείρονται σε πολλαπλές τοποθεσίες [RICCI19].



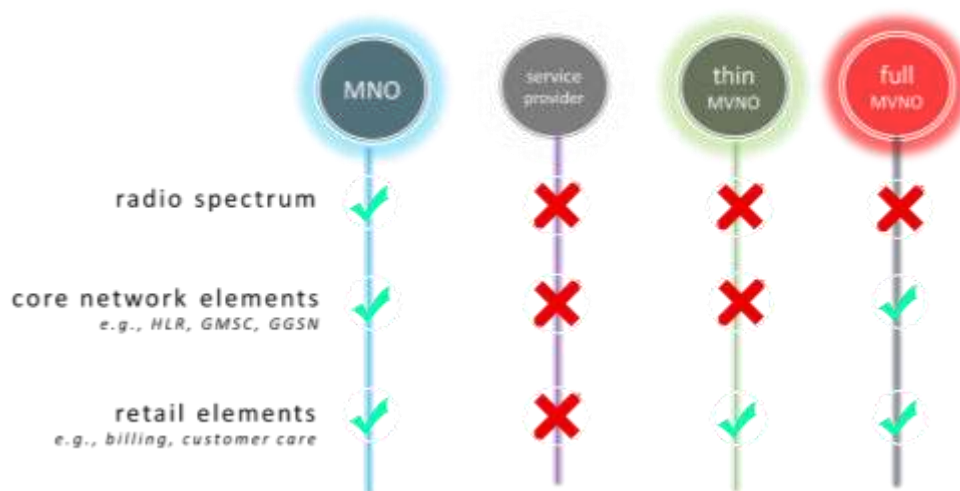
Εικόνα 23: Γενική απεικόνιση της λογικής των πολλών ενοικιαστών (Multi-tenancy).

Για παράδειγμα εάν ένας χρήστης εξυπηρετείται από έναν MVNO πάροχο υπηρεσιών 5G, ο οποίος πάροχος χρησιμοποιεί υποδομές από έναν εικονικό πάροχο υποδομών, τότε η E2E διερεύνηση των ιχνών του, θα πρέπει να περάσει από τουλάχιστον τρία επίπεδα. Αν λάβουμε επίσης υπόψη τον Κανονισμό GDPR για την αποθήκευση προσωπικών

δεδομένων και τις συμφωνίες μεταξύ διαφορετικών παρόχων, τότε διαπιστώνεται ότι το ζήτημα της ανίχνευσης ιχνών γίνεται εξαιρετικά πολύπλοκο.

5.3 MVNO as-a-Service

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ένα από τα σημαντικότερα B2B μοντέλα της τηλεπικοινωνιακής αγοράς, το μοντέλο MVNO, το οποίο υφίσταται ήδη από τις αρχές του 1990 [THANH01]. Με την πάροδο του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας δημιουργούνται νέοι τύποι MVNO, με βάση τα «κομμάτια» της εμπορικής και τεχνολογικής αλυσίδας που μοιράζονται με τον αρχικό πάροχο (Mobile Network Operator - MNO). Για παράδειγμα, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 24*, υπάρχει ο τύπος του MVNO ως πάροχος υπηρεσιών κινητής τηλεφωνίας, χωρίς να κατέχει φάσμα συχνοτήτων, ραδιοδίκτυο, δίκτυο κορμού και συστήματα τιμολόγησης. Ουσιαστικά είναι ένας μεταπωλητής υπηρεσιών που αγοράζει υπηρεσίες από τον MNO σε τιμές χονδρικής και πωλεί τις ίδιες υπηρεσίες σε τιμές λιανικής. Ένας άλλος πιο διαδεδομένος τύπος MVNO είναι αυτός του full MVNO, όπου το κομμάτι που μοιράζεται με τον MNO είναι μόνο αυτό του ραδιοδικτύου. Ο τύπος αυτός απαιτεί αρχική επένδυση σε εξοπλισμό, καθώς και συμφωνίες με άλλους παρόχους υπηρεσιών για δρομολογήσεις κλήσεων κτλ., όπως και συμφωνίες για περιαγωγή σε άλλες χώρες (roaming). Η παγκόσμια αγορά MVNO έφτασε τα 60,5 δισεκατομμύρια δολάρια το 2018 και η πρόβλεψη είναι ότι θα φτάσει τα 103 δισεκατομμύρια το 2023 [SACOTO20].



Εικόνα 24: Τύποι MVNO.

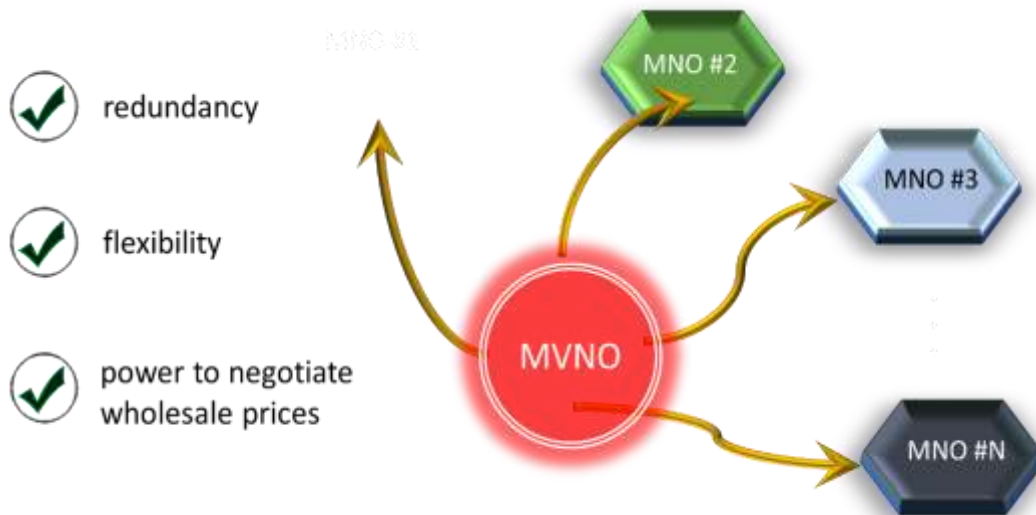
Με τη συμβατική τεχνολογία, η υλοποίηση δικτύων τύπου MVNO είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα. Προηγείται συνήθως διαγωνισμός για την εύρεση του καταλληλότερου MNO από οικονομική και τεχνολογική σκοπιά, διαγωνισμός για τον εξοπλισμό του δικτύου κορμού και των συστημάτων πληροφορικής, με όλες αυτές τις διαδικασίες να διαρκούν για αρκετούς μήνες. Στη συνέχεια, ο μερισμός του δικτύου του MNO γίνεται με στατικό σχεδιασμό, με βάση συγκεκριμένες χωρητικότητες και συγκεκριμένες υπηρεσίες που θα εξυπηρετούνται (τηλεφωνία, mobile internet, SMS, MMS, κτλ.). Νέες υπηρεσίες πολλές φορές απαιτούν νέες συμφωνίες και νέο σχεδιασμό και υλοποιήσεις [THANH01].

Η ανάπτυξη του 5G και ειδικότερα του (δυναμικού) τεμαχισμού δικτύου προσφέρει πλέον την δυνατότητα για δυναμικό μερισμό και δυναμική χρήση πόρων του δικτύου, μεταξύ διαφορετικών παικτών-συμφεροντούχων. Με αυτόν τον τρόπο, οι MNOs έχουν νέους τρόπους για αύξηση των εσόδων, αφού μπορούν να παρέχουν υπηρεσίες MVNO μέσω της παροχής των αντίστοιχων τεμαχίων/φετών του δικτύου [BEREC19]. Οι πόροι ραδιοδικτύου είναι ζωτικής σημασίας για παροχή υπηρεσιών και ως εκ τούτου η κατάτμηση πόρων ραδιοδικτύου (RAN slicing) έχει λάβει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον τόσο από ερευνητική άποψη όσο και από την πλευρά των κατασκευαστών εξοπλισμού. Ο τεμαχισμός RAN χρησιμοποιεί τεχνολογίες εικονικοποίησης για να παρέχει λογικά δίκτυα πρόσβασης τα οποία αντιστοιχούν σε πραγματικούς πόρους κάποιου παρόχου υποδομών. Τα λογικά αυτά δίκτυα μπορούν να περιλαμβάνουν διαφορετικού τύπου τεχνολογίες πρόσβασης, εξαρτώμενες από την εκάστοτε εξυπηρετούμενη εφαρμογή [RICHART16]. Ο MVNO έχει πλήρη έλεγχο αυτών των λογικών δικτύων και μπορεί να βελτιστοποιεί τη χρήση των διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης με βάση τους δικούς του αλγορίθμους (π.χ. για βελτιστοποίηση του κέρδους διατηρώντας την QoS μέσα στα πλαίσια του SLA με τους πελάτες [HZDS20]).

Το ετερογενές μοντέλο τριών επιπέδων χρησιμοποιείται συνήθως για την καλύτερη αποτύπωση του τεμαχισμού του RAN [HTKH17]. Με βάση αυτό, ο πάροχος υποδομών²⁴, κατανέμει τους φυσικούς πόρους (δηλαδή συχνότητες και ισχύ εκπομπής) στους MVNOs, οι οποίοι με τη σειρά τους κατανέμουν τους πόρους αυτούς στους δικούς τους τελικούς πελάτες. Το πρόβλημα αυτό αποτελεί μία δύσκολη μαθηματική πρόκληση, που συνήθως στη βιβλιογραφία επιλύεται αφού διαχωριστεί σε δύο επιμέρους «τμήματα» (ήτοι αυτό μεταξύ του παρόχου υποδομών και του MVNO και εκείνο μεταξύ του MVNO και του τελικού χρήστη) [HZDS20].

²⁴ Σημειώνεται εδώ ότι ο πάροχος υποδομών μπορεί να είναι και εικονικός πάροχος υποδομών, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα του προβλήματος για κατανομή των πόρων με βέλτιστο τρόπο.

Ένας σημαντικός περιορισμός των υπαρχόντων μοντέλων MVNO είναι ότι συνήθως λαμβάνουν υπηρεσίες από έναν μόνο πάροχο δικτύου MNO καθώς είναι τεχνικά δύσκολο να έχουν ταυτόχρονα διασύνδεση με περισσότερους MNOs, ενώ και οικονομικά είναι ασύμφορο καθώς απαιτείται η πληρωμή εφάπαξ παγίων σε κάθε MNO πέρα από την πληρωμή, ανάλογα με τη χρήση του δικτύου. Αυτός ο περιορισμός πλέον δεν θα υφίσταται χάρη στην τεχνολογία 5G και στον δυναμικό τεμαχισμό, οπότε οι MVNOs θα έχουν τη δυνατότητα -όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 25- για μία ευέλικτη και δυναμική επιλογή του MNO από τον οποίο θα δέχονται τις υπηρεσίες [SACOTO20]. Στην εργασίας [SCP16], οι συγγραφείς εισήγαγαν την έννοια του “5G Network Slice Broker”, όπου επιτρέπεται η δημιουργία MVNOs ως πάροχοι υπηρεσιών OTT (over-the-top), «νοικιάζοντας» πόρους από τους παρόχους υποδομών.



Εικόνα 25: Δυνατότητα δυναμικής επιλογής παρόχου δικτύου από τον πάροχο MVNO.

Γίνεται αντιληπτό ότι το μοντέλο MVNO με πολλαπλούς παρόχους MNOs, εκτός από το τεχνικό αντικείμενο του τεμαχισμού του δικτύου και της κατανομής των δικτυακών πόρων, περιλαμβάνει και στοιχεία από την οικονομική θεωρία αφού πλέον η βελτιστοποίηση του κέρδους γίνεται θέμα ζωτικής σημασίας. Η βελτιστοποίηση του κέρδους αφορά τόσο στους MNOs που θα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες λιανικής στους τελικούς πελάτες αλλά και υπηρεσίες χονδρικής στους MVNOs, όσο και στους MVNOs που θα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες λιανικής στους πελάτες (αλλά και σε άλλους παρόχους ως χονδρική).

Με την τεχνολογία 5G τα επιχειρηματικά μοντέλα πολλαπλών MNOs και πολλαπλών MVNOs είναι εφικτά, δημιουργώντας την ευκαιρία σε περισσότερες εταιρείες να προσφέρουν υπηρεσίες, αυξάνοντας τον ανταγωνισμό και τελικά την ποιότητα υπηρεσίας προς τον τελικό καταναλωτή. Όπως προτείνεται στην εργασία [SACOTO20], με το μοντέλο των πολλαπλών MNOs ο MVNO είναι σε θέση ώστε να προσφέρει τελικά υπηρεσίες σε μεγαλύτερο πλήθος συνδρομητών σε σχέση με το συμβατικό μοντέλο του ενός MNO ανά MVNO και άρα προσφέρονται μεγαλύτερα περιθώρια κέρδους. Παράλληλα, με τη διάθεση περισσότερων MNOs ο MVNO έχει πρόσβαση σε μεγαλύτερο πλήθος πόρων δικτύου, ανεξάρτητων μεταξύ τους, γεγονός που προσφέρει αυξημένη αποδοτικότητα και αξιοπιστία. Πολύ σημαντικός παράγοντας για την οικονομική επιβίωση του MVNO σε μοντέλα πολλαπλών MNOs είναι η δυνατότητα επιλογής χρήσης πόρων με βάση την τιμή προσφοράς από κάθε MNO. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να βελτιστοποιεί τα έξοδα χρήσης ή ακόμα και να διαπραγματεύεται νέες τιμές με τους MNO. Με τα συμβατικά μοντέλα απλού MNO, οι MVNOs συνήθως δεσμεύονται με πολυετή συμβόλαια, καθώς είναι τεχνικά δύσκολο να αλλάζουν πάροχο MNO.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο δυναμικός τεμαχισμός δικτύου και η τεχνολογία 5G γενικότερα, δημιουργούν τις συνθήκες για ένα ιεραρχικό μοντέλο παροχής υπηρεσιών από το επίπεδο των υποδομών μέχρι και το επίπεδο εφαρμογής, όπου πολλαπλοί εμπλεκόμενοι συμφεροντούχοι μπορούν να βελτιστοποιήσουν την τεχνικο-οικονομική λειτουργία του δικτύου τους, με βάση τις τιμές των πόρων δικτύου, τις προσφερόμενες υπηρεσίες και την ποιότητα αυτών. Το μοντέλο αυτό είναι σαφώς πιο πολύπλοκο από τα συμβατικά μοντέλα, αλλά υπό προϋποθέσεις δύναται να συμβάλει στην αύξηση του ανταγωνισμού.

Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε και αναλύθηκε η προοπτική τεμαχισμού δικτύου που αποτελεί βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι των δικτύων 5^{ης} γενιάς. Τα δίκτυα αυτά σχεδιάστηκαν για την εξυπηρέτηση νέων υπηρεσιών και εφαρμογών, οι απαιτήσεις των οποίων σε θέματα ποιότητας δεν μπορούσαν να ικανοποιηθούν επαρκώς από τα υπάρχοντα δίκτυα. Οι υπηρεσίες αυτές ταξινομήθηκαν από την 3GPP καταρχήν σε τρεις κύριες κατηγορίες, ήτοι: Υπηρεσίες με εξαιρετικά αξιόπιστη, χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (URLLC), υπηρεσίες με βελτιωμένη ευρυζωνική κινητή πρόσβαση (eMBB) και υπηρεσίες μαζικής επικοινωνίας τύπου μηχανής (mMTC). Αυτές έχουν πολύ διαφορετικές απαιτήσεις σε σύγκριση με τις συμβατικές εφαρμογές, με αποτέλεσμα οι παραδοσιακές λύσεις πρόσβασης στο ραδιοδίκτυο και οι συναφείς λύσεις για τη διαχείριση των δικτυακών πόρων να μην είναι πλέον οι καταλληλότερες, καθώς δεν μπορούν να εγγυηθούν επαρκώς την τελική ποιότητα της διατιθέμενης υπηρεσίας.

Οι παραπάνω απαιτήσεις, μεταφράζονται στην ανάγκη να ώστε οι πόροι του δικτύου να υπόκεινται σε διαχείριση στο έπακρο και με εντελώς δυναμικό τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται αφενός μεν η μέγιστη αποδοτικότητα δικτύου, αφετέρου δε η ικανοποίηση των διαφορετικών υπηρεσιών. Αυτό, με τη σειρά του απαιτεί την εφαρμογή κατάλληλων αρχιτεκτονικών προσεγγίσεων και τεχνολογιών με την αιχμή του δόρατος να εστιάζεται στον δυναμικό τεμαχισμό δικτύου. Η εφικτότητα του δυναμικού τεμαχισμού είναι πλέον δυνατή μέσω των τεχνολογιών SDN και NFV. **Θεωρώντας ότι η δημιουργία εικονικών/λογικών υποδομών δικτύου είναι εφικτή μέσω του από άκρη-σε-άκρη (E2E) δυναμικού τεμαχισμού του δικτύου και κατ'αναλογία του προγραμματισμού εικονικών μηχανών που δυναμικά προσθαφαιρούν πόρους, τότε το δίκτυο πλέον αποτελείται από πακέτα λογισμικού μιας βιβλιοθήκης, δυνάμενα να (επανα-)προγραμματίζονται.** Ο δυναμικός τεμαχισμός μετασχηματίζει τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών προσφέροντας:

- **Κάλυψη των απαιτήσεων πραγματικών επιχειρηματικών μοντέλων**, σχεδιασμένων για την πλήρωση συγκεκριμένων βιομηχανικών αναγκών, μέσα σε ένα γενικότερο πλαίσιο υποστήριξης πολλαπλών «μισθωμάτων» (multi-tenancy).
- **Ουσιαστική μείωση του χρόνου δημιουργίας νέων υπηρεσιών** και ενεργοποίησης αυτών, με επακόλουθο την αύξηση της αποδοτικότητας του δικτύου (time-to-market).
- **Δημιουργία σημαντικής ικανότητας «ελαστικότητας» στην υποδομή του δικτύου**, καθιστώντας το δίκτυο ικανό ώστε να προσαρμόζεται και να ανταποκρίνεται σε διακυμάνσεις φορτίου κίνησης.
- **Υιοθέτηση χαρακτηριστικών προγραμματισμού σε επίπεδο δικτύου και σε επίπεδο υπηρεσιών**, επιτρέποντας τη γρήγορη και εύκολη ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων του δικτύου ή την επέκταση υπαρχόντων και τη δημιουργία νέων υπηρεσιών και συναφών εμπορικών μοντέλων.
- **Ενσωμάτωση τεχνικών διαχείρισης και/ή ενορχήστρωσης για τη δυναμική παραμετροποίηση του δικτύου**, για τη βελτίωση των διατεματικών επιδόσεων.
- **Υποστήριξη υψηλού επιπέδου αυτοματοποίησης**, με χρήση μεθόδων ανάλυσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης.

Τα νέα δίκτυα έχουν πλέον μετασχηματιστεί σε δίκτυα δυνατοτήτων (networks of capabilities), τα οποία δεν διαχειρίζονται μόνο τη συνδεσιμότητα των συσκευών με το Διαδίκτυο ή με άλλα δίκτυα, αλλά διαχειρίζονται τις δυνατότητες και τις υπηρεσίες που χρειάζονται οι συνδεδεμένες συσκευές. Οι δυνατότητες αυτές συνοψίζονται ως εξής:

- **Βελτιωμένη (enhanced) καθολική ευρυζωνική πρόσβαση:** Το όριο των 50Mbps είναι το κατώτατο αποδεκτό όριο για να επιτευχθεί το παγκόσμιο συνδεδεμένο δίκτυο υψηλό ταχυτήτων.
- **Ενισχυμένη (enhanced) ευρυζωνική πρόσβαση σε πυκνές περιοχές:** Γεγονός το οποίο συνεπάγεται ότι συγκεκριμένες υπηρεσίες σε συγκεκριμένες τοποθεσίες πρέπει να μπορούν να επιτυγχάνουν υπερυψηλές ταχύτητες της τάξης των 10Gbps.
- **Συνδεσιμότητα σε οχήματα υψηλών ταχυτήτων κίνησης:** Υπονοεί τη δυνατότητα παροχής σύνδεσης σε οχήματα (ή σε συσκευές που κινούνται μέσα σε οχήματα) πολύ υψηλής ταχύτητας (π.χ. σε τρένα υψηλών ταχυτήτων).

- **Μαζικό Διαδίκτυο των πραγμάτων:** Μία από τις κύριες δυνατότητες των δικτύων 5G είναι η σύνδεση ενός τεράστιου πλήθους συσκευών τύπου IoT (π.χ. αισθητήρες, ελεγκτές, κτλ.).
- **Επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο:** Πρόκειται για υπηρεσίες και εφαρμογές όπου η απόκριση δικτύου από άκρο-σε-άκρο είναι μικρότερη των 5 msec.
- **Επικοινωνία απόλυτης αξιοπιστίας (ultra reliable communications):** Αφορά στη δυνατότητα για παροχή συνδεσιμότητας σε ποσοστό σχεδόν 100%, για εφαρμογές όπου η διαθεσιμότητα πρέπει να είναι πάντα εφικτή.
- **Δυνατότητα ευρυεκπομπής (broadcast):** Αφορά στη μετάδοση δεδομένων σε πολλαπλές συσκευές.
- **Δυνατότητα για πρόσβαση μέσω πολλαπλών τεχνολογιών πρόσβασης:** Πρόκειται για μια από τις βασικές και ουσιαστικές δυνατότητες των δικτύων 5G, όπου κάθε είδους συσκευή έχει πρόσβαση στο δίκτυο με διαφορετική τεχνολογία πρόσβασης.

Τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς ενισχύουν και εξελίσσουν τα επιχειρηματικά μοντέλα, μέσω της έννοιας του NaaS (Network as-a-Service). Με βάση την εκάστοτε σχέση μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών -ή παρόχων δικτύου- και των καταναλωτών, τα επιχειρηματικά μοντέλα του NaaS μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες όπως:

- **Business-to-Business (B2B):** Οι πάροχοι δικτύου παρέχουν τεμάχια δικτύου σε άλλη εταιρεία στην οποία θα ανήκουν τόσο το διατιθέμενο λογικό δίκτυο, όσο και οι τερματικές συσκευές.
- **Business-to-Consumer (B2C):** Οι τελικοί καταναλωτές μπορούν να αγοράσουν προσαρμοσμένες συνδέσεις/αγωγούς δεδομένων (data pipes) από τους παρόχους υπηρεσιών/δικτύων για τα τερματικά τους.
- **Business-to-Business-to-Consumer (B2B2C):** Ο πάροχος δικτύου/υπηρεσιών διαδραματίζει το ρόλο του παρόχου χονδρικής. Σε αυτήν την περίπτωση, οι πάροχοι προσφέρουν αποκλειστικές συνδέσεις, που ονομάζονται MVNO (mobile virtual network operator) ως υπηρεσία στον μεσάζοντα, χωρίς να εμπλέκεται το κομμάτι της λιανικής.

Ωστόσο, τα δίκτυα 5^{ης} γενιάς απαιτούν συνεχή και σε πραγματικό χρόνο εποπτεία του δικτύου και των στοιχείων ποιότητας κάθε υπηρεσίας, ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη κατανομή των πόρων σε κάθε δράση κατάτμησης του δικτύου. Αυτή η βασική απαίτηση θέτει διάφορα ζητήματα σε σχέση με ισχύουσες νομοθεσίες και κανονισμούς.

Φαίνεται ότι οι υπάρχοντες κανονισμοί (π.χ. ο κανονισμός TSM και οι οδηγίες του BEREC) δεν είναι απόλυτα σαφείς για το εάν το υπάρχον ρυθμιστικό πλαίσιο είναι αρκετό για τη νομική υποστήριξη των υπηρεσιών 5G, σε όλο το εύρος τους. Για να αποφευχθούν προβλήματα λόγω της δυνατότητας διαφορετικής ερμηνείας των κανονισμών αυτών από κάθε εμπλεκόμενο, ανάλογα και με τα εκάστοτε συμφέροντα, θα πρέπει να συνταχθούν νέοι κανονισμοί και οδηγίες καθώς οι μέχρι τώρα προσεγγίσεις συντάσσονται με τη λογική των προηγούμενων γενιών δικτύων που έχουν ένα σαφή περιορισμό: δηλαδή, δεν υποστηρίζουν τη δυνατότητα υποστήριξης οποιασδήποτε υπηρεσίας με οποιαδήποτε απαίτηση σε σχέση με την ποιότητα. Αντίθετα, τα δίκτυα προηγούμενων γενιών χαρακτηρίζονται από τον πεπερασμένο χαρακτήρα των υποστηριζόμενων υπηρεσιών.

Βιβλιογραφία

[3GPPRel16]	https://www.3gpp.org/release-16
[3GPP23501]	3GPP TS 23.501, V15.2.0 (2018-06): The 3 rd Generation Partnership Project: Technical Specification Group Services and System Aspects; System Architecture for the 5G System; Stage 2 (Release 15) https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.501/
[3GPPRel15 TR 28.801]	The 3 rd Generation Partnership Project (3GPP): 3GPP TR 28.801 V15.0.0 (2018-01): Telecommunications management; Study on management and orchestration of network slicing for next generation network (Release 15) https://itectec.com/archive/3gpp-specification-tr-28-801/
[3GPPR23203Rel 8]	The 3 rd Generation Partnership Project (3GPP): 3GPP TS 23.203 Policy and Charging Control Architecture”, Rel. 8. https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=810
[3GPPRel15 TR 23.707]	The 3 rd Generation Partnership Project (3GPP): 3GPP TR 23.707, “Architecture Enhancements for Dedicated Core Networks,” Tech. Rep. V13.0.0, 12 2014, release 13 https://itectec.com/archive/3gpp-specification-tr-23-707/
[3GPPTS28.530]	3GPP TS 28.530, “Management and orchestration; Concepts, use cases and requirements,” Technical Specification (TS) 28.530, 12 2018, version 15.1.0
[3GPPRel15 TS 28.531]	The 3 rd Generation Partnership Project (3GPP): 3GPP TS 28.531 V15.0.0: Provisioning of network slicing for 5G networks and services: Detailed specification of network slice provisioning/Network slice management (2018) https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3274
[3GPPRel17]	https://www.3gpp.org/release-17

	https://www.rimedolabs.com/blog/3gpp-rel-17-way-forward-within-5g-standardization/
[5GPPP16]	5G-PPP, "5g empowering vertical industries, white paper," 2016. https://5g-ppp.eu/roadmaps/
[5GPPARCH16]	5GPPP Architecture Working Group, et al. (2016, July). View on 5G Architecture. White Paper.
[AA17]	Al-Falahy, N., and Alani, Y. (2017): Technologies for 5G networks: challenges and opportunities. IT Professional 19(1), 12-20.
[ABI20]	ABI Research Projects 5G Worldwide Service Revenue to Reach \$247 Billion in 2025, https://www.abiresearch.com/press/abi-research-projects-5g-worldwide-service-revenue/ , accessed 02/06/2020
[AFOLABI18]	Afolabi, I., Taleb, T., Samdanis, K., Ksentini, A., and Flinck, H. (2018): Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(3), 2429-2453.
[AFOLABI20]	Afolabi, I., Prados-Garzon, J., Baga, T., Taleb, T., and Ameigeiras, P. (2020): Dynamic resource provisioning of a scalable E2E network slicing orchestration system. IEEE Transactions on Mobile Computing, 19(1), 2594-2608.
[AHMAD18]	Ahmad, I., Kumar, T., et al. (2018): Overview of 5G security challenges and solutions. IEEE Communications Standards Magazine, 2(1), 36-43.
[Alexiou17]	Alexiou, A. (2017): 5G Wireless Technologies. Institution of Engineering & Technology, London, UK.
[AZTGKSH17]	An, X., Zhou, X., Trivisonno, A., Guerzoni, P., Kalokylos, A., Soldani, D., and Hecker, A. (2017): On end to end network slicing for 5g communication systems. Transaction Emerging Telecommunications Technologies, 28(4),
[Badmus19]	Badmus, I. (2019): End-to-end network slicing architecture and implementation for 5g micro-operator leveraging multi-domain and multi-tenancy. Master's thesis, University of Oulu, Finland. http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201912213416.pdf

[BATALA20]	Batalla, J.M., Andrukiewicz, E., Gomez, G.P., Sapiecha, P., Mavromoustakis, C.X., Mastorakis, G., et al. (2020): Security risk assessment for 5G networks: National perspective. IEEE Wireless Communications, 27(4), 16-22.
[BEGA20]	Bega, D., Gramaglia, M., Fiore, M., Banchs, A., & Costa-Perez, X. (2020, July). AZTEC: Anticipatory Capacity Allocation for Zero-Touch Network Slicing. In IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications (pp. 794-803). IEEE.
[BEREC16]	Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) (2016). BEREC Guidelines on the Implementation by National Regulators of European Net Neutrality Rules, BoR (16) 127. https://berec.europa.eu/eng/document_register/subject_matter/berec/regulatory_best_practices/guidelines/6160-berec-guidelines-on-the-implementation-by-national-regulators-of-european-net-neutrality-rules
[BEREC19]	Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC) (2019): Report on the impact of 5G on regulation and the role of regulation in enabling the 5G ecosystem, Document number: BoR (19) 245, 05.12.2019
[BW16]	Bossong, R., and Wagner, B. (2016): A typology of cybersecurity and public-private partnerships in the context 81ft he EU. Springer international Publishing
[Cisco20]	Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper, Updated: March 9, 2020. https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf
[CFSGS20]	Cominardi, L, Deiss, T., et al. (2020): MEC Support for Network Slicing: Status and Limitations from a Standardization Viewpoint. IEEE Communications Standards Magazine 4(2), 22-30.
[CSLDZK20]	Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Lazaridis, P., Dardamanis, A., Zaharis, Z., and Kostopoulos, A., (2020): Dynamic Network Slicing: Challenges and Opportunities. In Proceedings of the AIAI 2020 IFIP

	WG 12.5 International Workshops, Neos Marmaras, Greece, June 5-7, 2020. IFIP AICT 585, pp.47-60. Springer
[CSKG18]	Chochliouros, I.P., Spiliopoulou, A.S., Kourtis, A., Giannoulakis, I., et al.: Enhancing network management via NFV, MEC, cloud computing and cognitive features: the “5G ESSENCE” modern architectural approach. In: Iliadis, L., Maglogiannis, I., Plagianakos, V. (eds.), Proceedings of the AIAI 2018. IFIP AICT, vol. 520, pp. 50-61. Springer Cham (2018).
[DAVIES19]	Davies, D. (2019, May): Small Cells – Big in 5G, Nokia. https://www.nokia.com/blog/small-cells-big-5g/
[DONATO19]	Donato, D., and Qin,, H. (2019): Using OpenAPI 3 Specifications of the 5G Core to Generate Validators in Erlang. Master’s Thesis, University of Gothenburg, Sweden. https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/300477/1/CSE%2019-99%20Donato%20Qin.pdf
[DRAEXLER18]	Dräxler, S., Karl, H., Kouchaksaraei, H.R., Machwe, A., Dent-Young, C., Katsalis, K., and Samdanis, K. (2018, June): 5G OS: Control and orchestration of services on multi-Domain heterogeneous 5G infrastructures. In Proceedings of the 2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Ljubljana, Slovenia, pp. 1-9. IEEE.
[EETT]	https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/EETT/Structure/index.html
[ERICSSON20]	Ericsson Network capabilities https://www.ericsson.com/en/future-technologies/architecture/network-capabilities
[ETSIMANO14]	The NFV Management and Orchestration (MANO) framework as specified by ETSI (cf. [6])
[ETSIGS18]	European Telecommunications Institute (ETSI): Network Function Virtualisation (NFV); Management and Orchestration; Report on Management and Connectivity for Multi-Site Services, document ETSI GS NFV IFA 022, V3.1.1, 2018

	https://www.etsi.org/deliver/etsi_gr/NFV-IFA/001_099/022/03.01.01_60/gr_NFV-IFA022v030101p.pdf
[EU20]	European Commission, Connectivity for a European Gigabit Society, available at https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/connectivity-europeangigabit-society-brochure , accessed 02/06/2020.
[EU4DIGITAL]	https://eufordigital.eu/discover-eu/eu-digital-single-market/
[FARRIS17]	Farris, I., Taleb, T., Flinck, H., and Iera, A. (2012): Providing ultra-short latency to user-centric 5G applications at the mobile network edge. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies (2018), 1-14. https://acris.aalto.fi/ws/portalfiles/portal/32827551/ELEC_Taleb_providing_ultra_short.pdf
[FEI16]	Hu, F. (2016): Opportunities in 5G Networks: A Research and Development Perspective. CRC Press
[FM18]	Frias, Z., and Martínez, J.P. (2018): 5G networks: Will technology and policy collide? Telecommunications Policy, 42(8), 612-621.
[FGVW99]	Foschini, G.J., Golden, G.D., Valenzuela, R.A., and Wolniansky, P.W. (1999): Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multi-element arrays. IEEE Journal on Selected areas in communications, 17(11), 1841-1852.
[FOSSATI20]	Fossati, F., Moretti, S., Perny, P., & Secci, S. (2020). Multi-resource allocation for network slicing. IEEE/ACM Transactions on Networking.
[GARCIA20]	Garcia-Aviles, G., Donato, C., Gramaglia, M., Serrano, P., & Banchs, A. (2020). ACHO: A framework for flexible re-orchestration of virtual network functions. Computer Networks, 180, 107382.
[GCSB15]	Garces, P.C., Costa-Perez, X., Samdanis K., and Banchs, A. (2015): RMSC: A cell slicing controller for virtualized multi-tenant mobile networks. In Proceedings of the IEEE 81 st Vehicular Technology Conference (VTC Spring 2015), Glasgow, UK, May 11-14, 2015, pp.1-6.
[GDPR16]	European Parliament and Council (2016): European Union. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the

	Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC. Official Journal of the European Union, L 119(1), pp.1-88, 2016.
[GGWW19]	Gittler, T., Gontarz, A., Weiss, L., and Wegener, K. (2019). A fundamental approach for data acquisition on machine tools as enabler for analytical Industrie 4.0 applications. <i>Procedia CIRP</i> , 79, 586-591.
[GL08]	Galis, A., Lin, C.: Towards 5G network slicing – motivations and challenges. <i>IEEE 5G Technol. Focus</i> 1(1), 1-6 (2017). http://5g.ieee.org/tech-focus/march-2017#networkslicing
[GUDE08]	Gude, N., Koponen, T., Pettit, J., Pfaff, B., Casado, M., McKeown, N., et al. (2008). NOX: towards an operating system for networks. <i>ACM SIGCOMM Computer Communication Review</i> , 38(3), 105-110.
[GUDIPATI13]	Gudipati, A., et al. (2013, August): “SoftRAN: Software Defined Radio Access Network”, ACM HotSDN, Hong Kong.
[GUTIERREZ18]	Gutierrez-Estevez, D.M., Gramaglia, M., De Domenico, A., Di Pietro, N., Khatibi, S., Shah, K., et al. (2018, April): The path towards resource elasticity for 5G network architecture. In <i>Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)</i> , Barcelona, Spain, pp. 214-219.
[HEIMS19]	Heims, E. (2019): Building EU Regulatory Capacity. <i>Executive Politics and Governance</i> .
[HTKH17]	Ho, T.M., Tran, N.H., Kazmi, S.M., and Hong, C.S. (2017): Dynamic pricing for resource allocation in wireless network virtualization: A Stackelberg game approach. In <i>Proceedings of the International Conference of Information Networking (ICOIN)</i> , pp. 429-434, Da Nang, Vietnam.
[HZDS20]	Hu, J., Zheng, Z., Di, B., and Song, L. (2020). Multi-layer radio network slicing for heterogeneous communication systems. <i>IEEE Transactions on Network Science and Engineering</i> , 1-1.
[ISO18]	International Organization for Standardization (ISO) (2018): ISO/IEC (2018): ISO/IEC 27005: Information Technology-Security

	Techniques-Information Security Risk Management. Geneva, Switzerland. https://www.iso.org/standard/75281.html
[ITU02]	International Telecommunications Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) (2002, July). Recommendation X.680: Information Technology – Abstract Syntax Notation One (ASN.1): Specification of basic notation.
[ITU08]	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector (ITU-T): Recommendation Y.3112 (12/2008): Framework for the Support of Multiple Network Slicing. https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3112/en
[ITU15]	International Telecommunication Union (ITU) (2015, June): IMT for 2020 and beyond. Draft new Recommendation ITU-R M. [IMT.VISION]. [Online]. Available: http://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Pages/default.aspx
[ITU17]	International Telecommunication Union – Regulation Sector (ITU-R) (2017): Minimum Requirements Related to Technical Performance for IMT-2020 Radio Interface(s). [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REPM.2410-2017-PDF-E.pdf
[JC20]	Jamalova, M., and Constantinovits, M. (2020): “Smart for development: Income level as the element of smartphone diffusion. Management Science Letters, 10, 1141-1150.
[JCMG16]	Jiang, M., Condoluci, M., Mahmoodi, T., and Guijarro, L.: Economics of 5G network slicing: optimal and revenue-based allocation of radio and core resources in 5G. https://nms.kcl.ac.uk/toktam.mahmoodi/files/TWC-16.pdf
[KANTOLA19]	Kantola, R. (2019). Net Neutrality Under EU Law—a Hindrance to 5G Success. In proceedings of the 30 th European Conference of the International Telecommunications Society (ITS): “Towards a Connected and Automated Society”, Helsinki, Finland, 16 th -19 th June, 2019. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/205187/1/Kantola.pdf

[KK21]	Kumar, K., Singh, A.K., Kumar, S., Sharma, P., and Sharna, J. (2021): The Role of Dynamic Network Slicing in 5G: IoT and 5G Mobile Networks. In Kumar, S., Trivedi, M. C., Ranjan, P., & Punhani, A. (Eds.), Evolution of Software-Defined Networking Foundations for IoT and 5G Mobile Networks (pp. 159-171). IGI Global. http://doi:10.4018/978-1-7998-4685-7.ch009
[KKC17]	Kim, J., Kim, D., & Choi, S. (2017). 3GPP SA2 architecture and functions for 5G mobile communication system. ICT Express, 3(1), 1-8.
[KKTH19]	Kazmi, S.M.A., Ullah Kahn, L., Tran., N.H., and Hong, C.S. (2019): Network Slicing for 5G and Beyond Networks. Springer Nature Switzerland.
[KMZP13]	Kokku, R., Mahindra, R., Zhang H., and Rangarajan, S. (2013): Cellslice: Cellular wireless resource slicing for active RAN sharing. In Proceedings of the 5 th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS 2013), Bangalore, India, January 7-10, 2013, pp. 1-10
[LG19]	Lozada, H.R., and Gary, H.K. (2019): Net neutrality repeal and its effect on consumers. International Journal of Business and Social Science, 10(1), 1-5.
[LODGE08]	Lodge, M. (2008): Regulation, the Regulatory State and European Politics. West European Politics, 31(1), 280-301.
[MARTINI20]	Martini, B., Mori, P., Marino, F., Saracino, A., Lunardelli, A., La Marra, A., et al. (2020): Pushing forward security in network slicing by leveraging continuous usage control. IEEE Communications Magazine, 58(7), 65-71.
[MBK20]	Messaoudi, F., Bertin, P., and Ksentini, A. (2020, January): Towards the quest for 5G Network Slicing. In Proceedings of the 2020 IEEE 17 th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), pp. 1-7.
[MCKEOWN08]	McKeown, N., Anderson, T., Balakrishnan, H., Parulkar, G., Peterson, L., Rexford, J., et al. (2008). OpenFlow: Enabling innovation in campus networks. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 38(2), 69-74.

[METIS20]	METIS. Mobile and wireless communications system for 2020 and beyond (5G). Available: https://www.metis2020.com/documents/presentations/index.html
[MIMIDIS19]	Mimidis-Kentis, A., Soler, J., Veitch, P., Broadbent, A., Mobilio, M., Riganelli, et al. (2019). The Next Generation Platform as A Service: Composition and Deployment of Platforms and Services. Future Internet, 11(5), 119.
[MUSUMECI19]	Musumeci, F. et al. (2019): An overview on application of machine learning techniques in optical networks. IEEE Communications Surveys Tutorials, 21(2), 1383–1408.
[NGMN15]	Next Generation Mobile Networks Alliance (2015): 5G White Paper. NGMN e.V. https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/images/news/ngmn_news/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf
[NGMN16]	Next Generation Mobile Networks Alliance (2016, April): 5G Security Recommendations Package#2: Network Slicing. NGMN e.V. https://www.ngmn.org/publications/5g-security-recommendations-package-2-network-slicing.html
[NGMNS16]	NGMN. (2016). Description of Network Slicing Concept. Accessed: Jul. 18, 2019. [Online]. Available: https://www.ngmn.org/fileadmin/user_upload/160113_Network_Slicing_v1_0.pdf
[NK14]	Nguyen, V.G., and Kim, Y.H. (2014): Slicing the next mobile packet core Network. In Proceedings of the 11 th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS'14), Barcelona, Spain, August 26-29, 2014, pp.901–904
[NKEN18]	Nooren, P.A., Keesmaat, N.W., van den Ende, A.H., and Norp, A.H.J. (2018, April): 5G and Net Neutrality: a functional analysis to feed the policy discussion. Den Haag: TNO Report (TNO 2018 R10394/1.0). file:///C:/Users/ICHOCH~1/AppData/Local/Temp/TNO-2018-R10394.pdf

[NOKIA16]	Nokia Oyz (2016): Dynamic End-To-End Network Slicing for 5G: Addressing 5G requirements for diverse services, use cases, and business models – White Paper. Nokia http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/5G/NOKIA_dynamic_network_slicing_WP.pdf
[LGDLO20]	Loghin, D., Cai, S., et al. (2020): The disruptions of 5G on data-driven technologies and applications. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 32(6), 1179-1198.
[OLADEJO20]	Oladejo, S.O., and Falowo, O.E. (2020). Latency-Aware Dynamic Resource Allocation Scheme for Multi-Tier 5G Network: A Network Slicing-Multitenancy Scenario. IEEE Access, 8, 74834-74852.
[ON20]	Obiodu, E., and Sastry, N. (2020): From ATM to MPLS and QCI: The Evolution of differentiated QoS standards and implications for 5G network slicing. IEEE Communications Standards Magazine, 4(2), 14-21.
[ORTIZ20]	Ortiz, J., Fernández, P.J., Sanchez-Iborra, R., Bernabe, J.B., Santa, J., & Skarmeta, A. (2020, September): Enforcing GDPR regulation to vehicular 5G communications using edge virtual counterparts. In Proceedings of the 2020 IEEE 3 rd 5G World Forum (5GWF), Bangalore, India, 2020, pp.121-126.
[OSM18]	“OSM Information Model” accessed on 08.02.2018. [Online]. Available: https://osm.etsi.org/wikipub/index.php/OSM_Information_Model
[RADWAN17]	Radwan, A., and Rodriguez, J. (2017): Cloud of mobile small-cells for higher data-rates and better energy-efficiency. In Proceedings of the 23 rd European Wireless Conference, Dresden, Germany, May 2017, pp. 105–109.
[RBBRD16]	Rost, P., Banchs, A., Berberana, I., Reitbach, M., Doll, M., et al. (2016): Mobile network architecture evolution toward 5G. IEEE Communications Magazine, 54(5), 84-91.
[RE19]	De Ree, M., Mantas, G., Radwan, A., Mumtaz, S., Rodriguez, J., and Otung, I.E. (2019). Key management for beyond 5G mobile small cells: A survey. IEEE Access, 7, 59200-59236.

[RESCHINI18]	Reschini, B. (2018): Net neutrality: the end of the free Internet?, 19/07/2018, Visionary Marketing https://visionarymarketing.com/en/2018/07/net-neutrality-the-end-of-the-free-internet/
[RICCI19]	Ricci, J., Baggili, I., and Breitinger, F. (2019): Blockchain-Based Distributed Cloud Storage Digital Forensics: Where's the Beef?. IEEE Security & Privacy, 17(1), 34-42.
[RICHART16]	Richart, M., Baliosian, J., Serrat, J., and Gorricho, J.L. (2016): Resource slicing in virtual wireless networks: A survey. IEEE Transactions on Network and Service Management, 13(3), 462-476.
[RIMKUTE20]	Rimkutė, D. (2020): Building Organizational Reputation in the European Regulatory State: An Analysis of EU Agencies' Communications. Governance, 33, 385-406. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gove.12438
[ROST17]	Rost, P., Mannweiler, C., Michalopoulos, D.S., et al. (2017, May): Network Slicing to Enable Scalability and Flexibility in 5G Mobile Networks. IEEE Communications Magazine, 55(5), 72-79.
[SACOTO20]	Sacoto Cabrera, E.J., Guijarro, L., & Maillé, P. (2020). Game Theoretical Analysis of a Multi-MNO MVNO Business Model in 5G Networks. Electronics, 9(6), 933.
[SCP16]	Samdanis, K., Costa-Perez, X., et al. (2016): From network sharing to multi-tenancy: the 5G network slice broker. IEEE Communications Magazine, 54(7), 32-39.
[SCHUHU17]	Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M. and Wahlster, W. (eds.) 2017. Industrie 4.0 Maturity Index. Managing the Digital Transformation of Companies. Acatech Study. Munich, Utz Publishers.
[SM20]	Soldani, D., and Manzalini, A. (2015): Horizon 2020 and beyond: On the 5G operating system for a true digital society. IEEE Vehicular Technology Magazine, 10(1), 32-42.
[SMYSG19]	Sciancalepore, V., Mannweiler, C., Yousaf, F.Z., Serrano, P., Gramaglia, M., Bradford, J., and Pavón, I.L. (2019): A future-proof

	architecture for management and orchestration of multi-domain nextgen networks. IEEE Access, 7, 79216-79232.
[TALEB15]	Taleb, T., Corici, M., Parada, C., et al. (2015, March): EASE: EPC as a service to ease mobile core network deployment over cloud. IEEE Network, 29(2), 78-88.
[TALEB16]	Taleb, T., Ksentini, A., and Jantti, R. (2016, December): Anything as a Service for 5G Mobile Systems. IEEE Network 30(6), 84-91.
[THANH01]	Van Thanh, D. (2001). Mobile Virtual Network Operators, Guest Editorial, Telektronikk https://www.telenor.com/wp-content/uploads/2012/05/T01_4.pdf
[TSMEU15]	Regulation (EU) 2015/2120 of the European Parliament and of the Council of 25 November 2015 laying down measures concerning open internet access and amending Directive 2002/22/EC on universal service and users' rights relating to electronic communications networks and services and Regulation (EU) No 531/2012 on roaming on public mobile communications networks within the Union (Text with EEA relevance). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32015R2120
[WANG14]	Wang, Y., Vasilakos, A.V., Jin, Q., and Ma, J. (2014): Survey on mobile social networking in proximity (MSNP): approaches, challenges and architecture. Wireless networks, 20(6), 1295-1311.
[WINTER20]	Winter, J. (2020). The evolutionary and disruptive potential of Industrie 4.0. Hungarian Geographical Bulletin, 69(2), 83-97.
[YL19]	Yoo, C.S., and Lambert, J. (2019, November): 5G and Net Neutrality. In Guenter Knieps & Volcker Stocker (eds.), "The Future of the Internet" (pp. 221-245). Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3429948
[ZLCZ16]	Zhou, Z., Li, R., et al. (2016): Network slicing as a service: enabling enterprises' own software defined cellular networks. IEEE Communications Magazine, 54(7), 146-153.

Συντομογραφίες

Αγγλικές συντομογραφίες	
2G	The Second Generation of Mobile Communications
3G	The Third Generation of Mobile Communications
3GPP	The 3 rd Generation Partnership Project
3GPP2	The 3 rd Generation Partnership Project 2
4G	The Fourth Generation of Mobile Communications
5G	The Fifth Generation of Mobile Communications
5GC	5G Core
5GS	5G Satellite
AF	Application Function
AI	Artificial Intelligence
AMF	Access and Management Mobility Function
API	Application Programming Interface
ASN.1	Abstract Syntax Notation One
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AUSF	Authentication Server Function
B2B	Business to Business
B2B2C	Business to Business to Consumer
B2C	Business to Consumer
BEREC	Body of European Regulators for Electronic Communications
BSS	Business Support System
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAPEX	Capital Expenditure
CDMA	Code Division Multiple Access
CN	Core Network
COM	Control, Orchestration, Management

CPU	Central Processing Unit
CSMF	Communication Service Management Function
C-V2X	Cellular Vehicle-to-Everything
D2D	Device-to-Device
DA	Data Analytics
DCCA	Data Center Certified Associate
DevOps	Software development (Dev) and IT operations (Ops)
DN	Data Network
E2E	End-to-End
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EM	Element Manager
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
eMBB	enhanced Mobile Broadband
eNB	evolved Node B
eSIM	Embedded Subscriber Identity Module
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EV-DO	Evolution-Data Optimized
FG	Forwarding Graph
HSS	Home Subscriber Server
GDPR	General Data Protection Regulation
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HAPS	High Altitude Platform Station
HetNet	Heterogeneous Network
HSPA	High-Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
IAB	Integrated Access and Backhaul
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol

IS-95	Interim Standard 95
ISG	Industry Specification Group
IT	Information Technology
ITU	International Telecommunication Union
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LCM	Life-Cycle Management
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control
MANO	Management and Orchestration
MBB	Mobile Broadband
METIS	Mobile and Wireless Communications Enablers for Twenty-Twenty (2020) Information Society
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
ML	Machine Learning
MME	Mobility Management Entity
MNO	Mobile Network Operator
MPLS	Multi-Protocol Label Switching
MVNO	Mobile Virtual Network Operator
MTC	Machine Type Communications
mMTC	massive Machine-Type Communications
NaaS	Network as-a-Service
NB	Narrow Band
NF	Network Function
NFV	Network Function Virtualization
NFVI	Network Function Virtualization Infrastructure
NFVO	Network Function Virtualization Orchestrator
NG	Next Generation
NGMN	Next Generation Mobile Networks

NR	New Radio
NS	Network Service
NS	Network Slice
NSI	Network Slice Instance
NSD	Network Service Descriptor
NSaaS	Network Slicing as-a-Service
NSMF	Network Service Management Function
NSMF	Network Slice Management Function
NSSMF	Network Slice Subnet Management Function
OAM	Operations and Maintenance
ODO	Orchestration Domain
OPEX	Operational Expenditure
OS	Operating System
OSI	Open Systems Interconnection
OSM	Open Source MANO
OSS	Operation Support System
OTT	Over the Top
PaaS	Platform as -a-Service
PC	Personal Computer
PCF	Policy Control Function
PCRF	Policy and Charging Rules Function
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PDU	Personal Data Unit
PGW	Packet Data Network Gateway
PRB	Physical Resource Block
PoP	Point of Presence
QCI	QoS Class Identifier
QoE	Quality of Experience
QoS	Quality of Service
RAM	Radom Access Memory

RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RLC	Radio Link Control
RRC	Radio Resource Control
REST	REpresentational State Transfer
RRU	Remote Radio Unit
S - NSSSI	Single – Network Slice Selection Assistance Information
SC	Small Cell
SDN	Software Defined Networking
SIM	Subscriber Identity Module
SLA	Server Level Agreement
SLA	Service Level Agreement
SMF	Session Management Function
SMS	Short Messages Service
SO	Service Orchestrator
SON	Self-Organizing Network
SGW	Serving Gateway
TSM	Telecom Single Market
TV	Television
UDM	Unified Data Management
UDR	Unified Data Repository
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency communication
V2X	Vehicle-to-Everything
VIM	Virtualized Infrastructure Manager
VLAN	Virtual Local Area Network
VNF	Virtual Network Function
VNFD	Virtualized Network Function Descriptor

VNFM	Virtualized Network Function Manager
VoIP	Voice over IP
VoLTE	Voice over LTE
VPN	Virtual Private Network
XaaS	Something as-a-Service
WAN	Wide Area Network
WWW, www	World Wide Web
Ελληνικές συντομογραφίες	
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση

Αγγλικές – Ελληνικές Ορολογίες

Backhaul	Οπισθοζευκτικό
Beamforming	Διαμόρφωση δέσμης
Broadband	Ευρυζωνικός
Cloud computing	Νεφοϋπολογιστική, υπολογιστική νέφους
Descriptor	Περιγραφέας
Downlink	Κατερχόμενη ζεύξη
Download	Καταφόρτωση
Latency	Λανθάνων χρόνος, Καθυστέρηση μετάδοσης
Multiple input multiple output	Πολλαπλές εισοδοι πολλαπλές έξοδοι
Network slicing	Τεμαχισμός δικτύου, Κατάτμηση δικτύου
Network slice	Τεμάχιο δικτύου, φέτα δικτύου
Router	Δρομολογητής πακέτων
Session	Συνεδρία, σύνοδος
Softwarization	Λογισμικοποίηση
Switch	Μεταγωγέας πακέτων
Uplink	Ανερχόμενη ζεύξη
Upload	Αναφόρτωση
Virtualization	Εικονικοποίηση

