



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**Επισκόπηση των προσαρμοστικών υπηρεσιών  
ροής πολυμέσων σε δίκτυα επόμενης γενιάς**

**Πτυχιακή Εργασία**

του

**Τσοπουριάν Νταβίντ**

(Α.Μ. 2596)

Επιβλέπων: **Νικολάου Σπυρίδων**  
**Λέκτορας**

Καστοριά, Σεπτέμβριος 2024





ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Επισκόπηση των προσαρμοστικών υπηρεσιών  
ροής πολυμέσων σε δίκτυα επόμενης γενιάς**

**Πτυχιακή Εργασία**

του

**Τσοπουριάν Νταβίντ**

(Α.Μ. 2596)

Επιβλέπων: **Νικολάου Σπυρίδων**  
**Λέκτορας**

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3η Οκτωβρίου 2024

.....  
**Βέργαδος Δημήτριος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....  
**Βαρδάκας Ιωάννης**  
Αναπληρωτής Καθηγητής

.....  
**Νικολάου Σπυρίδων**  
Λέκτορας

Καστοριά, Οκτώβριος 2024

Copyright © 2024 - Τσοπουριάν Νταβίντ

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν αποκλειστικά τον συγγραφέα και δεν αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ως συγγραφέας της παρούσας εργασίας δηλώνω πως η παρούσα εργασία δεν αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και δεν περιέχει υλικό από μη αναφερόμενες πηγές.

## *Ευχαριστίες*

*Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια της πτυχιακής μου εργασίας. Περισσότερο, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη συνεχή υποστήριξη και τις εύστοχες συμβουλές του, οι οποίες συνέβαλαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας.*

## Περίληψη

Η πτυχιακή εργασία αυτή εξετάζει τις προσαρμοστικές υπηρεσίες ροής πολυμέσων σε δίκτυα επόμενης γενιάς, εστιάζοντας στη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) μέσω της χρήσης τεχνολογιών Δικτύωσης Οριζόμενης από Λογισμικό (Software-Defined Networking - SDN) και Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (Network Functions Virtualization - NFV).

Αναλύονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την παροχή υψηλής ποιότητας υπηρεσιών πολυμέσων, ενώ προτείνονται λύσεις βελτιστοποίησης της QoE μέσω αυτών των τεχνολογιών.

Εξετάζονται επίσης οι επιπτώσεις των σύγχρονων πολυμεσικών υπηρεσιών και οι στρατηγικές για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων απαιτήσεων των χρηστών σε ετερογενή δίκτυα.

Τέλος, προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη των προσαρμοστικών υπηρεσιών ροής πολυμέσων.

**Λέξεις Κλειδιά:** Quality of Experience (QoE), Software-Defined Networking (SDN), Network Functions Virtualization (NFV), Προσαρμοστική Ροή Πολυμέσων (Adaptive Streaming), Διαχείριση Πολυμεσικών Υπηρεσιών, Υπηρεσίες Ροής Βίντεο

## *Abstract*

This thesis examines adaptive multimedia streaming services in next-generation networks, focusing on the management of Quality of Experience (QoE) through the use of Software-Defined Networking (SDN) and Network Functions Virtualization (NFV) technologies.

The key features and challenges related to the provision of high-quality multimedia services are analyzed, while solutions for optimizing QoE using these technologies are proposed.

The thesis also explores the impact of modern multimedia services and strategies for addressing the growing demands of users in heterogeneous networks.

Finally, future directions for the further development of adaptive multimedia streaming services are proposed.

**Key Words:** Quality of Experience (QoE), Software-Defined Networking (SDN), Network Functions Virtualization (NFV), Adaptive Streaming, Multimedia Service Management, Video Streaming Services

## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή .....	1
1.1 Επισκόπηση και Ανάγκες Έρευνας στη Διαχείριση της QoE με Χρήση SDN και NFV .....	5
Κεφάλαιο 2. Διαχείριση QoE για υπηρεσίες ροής πολυμέσων .....	10
2.1 Ποιότητα Εμπειρίας: Ορισμός .....	10
2.2 Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση QoE: Μετρικές και Μοντέλα .....	11
Κεφάλαιο 3. Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση QoE .....	14
3.1 Παρακολούθηση και Μέτρηση της QoE .....	14
3.2 Βελτιστοποίηση και Έλεγχος QoE στις Πολυμεσικές Υπηρεσίες: Προκλήσεις και Λύσεις .....	16
Κεφάλαιο 4. Υπηρεσίες Ροής Πολυμέσων μέσω Διαδικτύου .....	20
4.1 Λύσεις Προσαρμοστικής Ροής μέσω HTTP (HAS) .....	20
4.2 DASH με Υποστήριξη από Διακομιστή και Δίκτυο (SAND) .....	24
4.3 Αλυσίδα Παράδοσης Πολυμέσων-Θέματα Διαχείρισης Υπηρεσιών .....	25
4.3.1 Ενορχήστρωση και Διαχείριση NFV (NFV Management and Orchestration, NFV-MANO) .....	26
4.3.2 Περιπτώσεις Χρήσης και Υλοποιήσεις της Τεχνολογίας NFV .....	28
4.3.3 Δραστηριότητες Τυποποίησης του NFV .....	28
Κεφάλαιο 5. Διαχείριση Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) Χρησιμοποιώντας SDN και NFV .....	31
5.1 Βελτιστοποίηση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε Ροές Βίντεο μέσω SDN: Προσεγγίσεις και Εφαρμογές .....	33
Κεφάλαιο 6. QoE-Fairness και εξατομικευμένος QoE-Centric έλεγχος στο SDN .....	37
Κεφάλαιο 7. Μηχανισμοί Δρομολόγησης εστιασμένοι στην QoE χρησιμοποιώντας SDN/NFV .....	41
7.1 Πρακτικές Εφαρμογές του Software-Defined Networking (SDN) στην Εξισορρόπηση Φορτίου και Εικονικοποίηση Δικτύων .....	44
7.2 Μηχανισμοί που βασίζονται σε QoE-Aware SDN/NFV με χρήση MPTCP και δρομολόγησης τμημάτων .....	47
7.3 Συνεργατική διαχείριση QoE Service από OTTP και ISP μέσω SDN και NFV .....	49
7.4 Προσεγγίσεις Ευαισθητοποιημένες/Καθοδηγούμενες από την QoE Χρησιμοποιώντας Πλήρη Υιοθέτηση του SDN και NFV .....	51
Κεφάλαιο 8. Παραδείγματα προσαρμοστικών υπηρεσιών ροής πολυμέσων με χρήση αναδιδόμενων τεχνολογιών δικτύωσης .....	54
8.1 Προσαρμοστική Ροή με Επίγνωση της QoE μέσω Cloud/Fog Computing .....	55
8.2 AR/VR, Cloud Gaming και Mulsemmedia (πολλαισθητηριακά μέσα) .....	57
8.2.1 QoE σε Εφαρμογές Εμβύθισης AR/VR και Mulsemmedia .....	57
8.2.2 QoE σε Εφαρμογές Ροής Βίντεο για Cloud Gaming .....	58
Κεφάλαιο 9. Προκλήσεις διαχείρισης προσαρμοστικών υπηρεσιών ροής πολυμέσων και κατευθύνσεις έρευνας σε επόμενες γενιές δικτύων .....	61



9.1 ΟΤΤ-ISP Συνεργατική διαχείριση υπηρεσιών σε δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό .....	<b>63</b>
9.2 Επιχειρηματικά μοντέλα προσανατολισμένα στο QoE σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό .....	<b>65</b>
9.3 Έξυπνες στρατηγικές μεγάλων δεδομένων που βασίζονται σε QoE σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό .....	<b>66</b>
9.4 Κοινή χρήση δικτύου προσανατολισμένη στο QoE και τεμαχισμός σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό .....	<b>67</b>
9.5 Επεκτασιμότητα, ανθεκτικότητα και βελτιστοποίηση σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό .....	<b>68</b>
9.5.1 Επικοινωνίες πολυμέσων στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT).....	<b>70</b>
Συμπεράσματα.....	<b>72</b>
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	<b>75</b>

## *Λίστα Εικόνων*

<a href="#">Εικόνα 1. Σύγκριση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE)</a>	11
<a href="#">Εικόνα 2. Αρχιτεκτονική Προσαρμοστικής Ροής Βίντεο μέσω HTTP (HAS)</a>	23
<a href="#">Εικόνα 3. Αρχιτεκτονική SDN/NFV</a>	36
<a href="#">Εικόνα 4. QoE για προσαρμοστική ροή</a>	40
<a href="#">Εικόνα 5. Wireless OpenFlow Infrastructure</a>	45
<a href="#">Εικόνα 6. Traffic engineering with OpenFlow-based SDN</a>	46
<a href="#">Εικόνα 7. OpenFlow Network Slicing use case</a>	47

## *Λίστα Διαγραμμάτων*

<a href="#">Διάγραμμα 1. Διάγραμμα Προσαρμογής Δικτυακών Πόρων μέσω Διαχείρισης QoS</a>	16
<a href="#">Διάγραμμα 2. Διάγραμμα Διαχείρισης Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) μέσω SDN</a>	32
<a href="#">Διάγραμμα 3. Διάγραμμα Δικτύωσης SDN για Υπηρεσίες Πολυμέσων</a>	36
<a href="#">Διάγραμμα 4. Διάγραμμα Δικτύωσης για IoT Υπηρεσίες μέσω SDN και NFV</a>	53

## *Ευρετήριο Ακρωνυμίων*

5G – Fifth Generation, Πέμπτη Γενιά.

AI – Artificial Intelligence, Τεχνητή Νοημοσύνη.

API – Application Programming Interface, Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών.

CDN – Content Delivery Network, Δίκτυο Παράδοσης Περιεχομένου.

CPS – Cyber-Physical Systems, Κυβερνοφυσικά Συστήματα.

D2D – Device-to-Device, Συσκευή σε Συσκευή.

ELA – Experience Level Agreement, Συμφωνία Επιπέδου Εμπειρίας.

ETSI – European Telecommunications Standards Institute, Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων.

HTTP – Hypertext Transfer Protocol, Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου.

IoT – Internet of Things, Διαδίκτυο των Πραγμάτων.

ITU – International Telecommunication Union, Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών.

M2M – Machine-to-Machine, Μηχανή σε Μηχανή.

MANO – Management and Orchestration, Διαχείριση και Ορχήστρωση.

MEC – Mobile Edge Computing, Υπολογιστική στο Άκρο του Δικτύου.

NFV – Network Functions Virtualization, Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών.

NFVO – Network Functions Virtualization Orchestrator, Ορχηστρωτής Εικονικοποίησης Δικτυακών Λειτουργιών.

QoE – Quality of Experience, Ποιότητα Εμπειρίας.

SDN – Software-Defined Networking, Δικτύωση Καθορισμένη από Λογισμικό.

SLA – Service Level Agreement, Συμφωνία Επιπέδου Υπηρεσίας.

TCP – Transmission Control Protocol, Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης

IP – Internet Protocol, Πρωτόκολλο Διαδικτύου.

VNF – Virtualized Network Function, Εικονικοποιημένη Δικτυακή Λειτουργία.

VNFM – Virtualized Network Function Manager, Διαχειριστής Εικονικοποιημένων Δικτυακών Λειτουργιών.

## Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η κατανάλωση πολυμέσων, όπως βίντεο και άλλες υπηρεσίες, έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια και αναμένεται να συνεχίσει να αυξάνεται στο μέλλον. Επιπλέον, οι συνδεδεμένες συσκευές αναμένεται να φτάσουν τα 14,6 δισεκατομμύρια, ξεπερνώντας τον παγκόσμιο πληθυσμό. Αυτές περιλαμβάνουν συσκευές που επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους χωρίς τη μεσολάβηση δικτύου, γνωστές ως, Συσκευή σε Συσκευή (D2D, Device-to-Device), καθώς και συσκευές που επικοινωνούν αυτόματα μέσω δικτύων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, γνωστές ως Μηχανή σε Μηχανή (M2M, Machine-to-Machine) (Raje, 2023; Shut et al, 2022). Οι D2D επιτρέπουν την άμεση ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών, όπως κινητά ή τάμπλετ, ενώ οι M2M χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα συστήματα, όπως αισθητήρες ή έξυπνες συσκευές, για τη συλλογή και ανταλλαγή δεδομένων (Lloret, 2009; Vakali & Pallis, 2003). Αυτή η τεράστια αύξηση οφείλεται κυρίως στη δημοτικότητα των πλατφορμών ροής βίντεο, όπως το YouTube και το Netflix (Chalaby, 2023).

Με την αυξημένη ζήτηση, οι πάροχοι διαδικτύου (Internet Service Providers – ISP), οι πάροχοι κινητής τηλεφωνίας και οι υπηρεσίες που προσφέρουν περιεχόμενο μέσω του διαδικτύου (Over-The-Top Providers – OTTP) βλέπουν νέες ευκαιρίες για κέρδη (Terzui, 2020; Kumar, 2015). Η εξασφάλιση της καλύτερης δυνατής ποιότητας βίντεο για τους χρήστες είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία αυτών των υπηρεσιών (Bouraqia, 2020). Σήμερα, οι χρήστες απαιτούν υπηρεσίες που είναι πιο απαιτητικές όσον αφορά τη χρήση πόρων, δηλαδή υπηρεσίες που χρειάζονται καλύτερη σύνδεση στο διαδίκτυο και υψηλότερη ποιότητα στην παράδοση περιεχομένου (Zhao, 2012; Kouvatso, 2011). Ωστόσο, η εξασφάλιση μιας καλής εμπειρίας χρήσης είναι μια δύσκολη διαδικασία, διότι επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Πρώτα απ' όλα, οι χρήστες χρησιμοποιούν διάφορες συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα, tablets, υπολογιστές και έξυπνες τηλεοράσεις, οι οποίες έχουν διαφορετικές τεχνικές δυνατότητες, όπως ανάλυση οθόνης, ισχύ επεξεργαστή και δυνατότητες αποθήκευσης (Talebi, 2023; Zhang, 2021). Αυτή η ποικιλία καθιστά δύσκολη την παροχή σταθερής ποιότητας περιεχομένου σε όλους (Kasulaitis, 2015).

Επιπλέον, η ζήτηση για περιεχόμενο είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη. Για παράδειγμα, σε περιόδους αιχμής, περισσότεροι χρήστες μπορεί να προσπαθούν να έχουν πρόσβαση

στο ίδιο περιεχόμενο, γεγονός που επιβαρύνει το δίκτυο και μπορεί να οδηγήσει σε πτώση της ποιότητας (Biernacki & Tutschku, 2014; Morley, et al, 2018). Οι συνθήκες του δικτύου παίζουν επίσης μεγάλο ρόλο. Οι χρήστες μπορεί να συνδέονται από διαφορετικές τοποθεσίες με ποικίλα επίπεδα κάλυψης και ταχύτητας σύνδεσης, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει την εμπειρία τους, ιδιαίτερα αν το δίκτυο είναι ασταθές ή παρουσιάζει συμφόρηση (Reyes-Menendez et al, 2018; Miller et al, 2011). Τέλος, τα Δίκτυα Διανομής Περιεχομένου (Content Delivery Networks – CDNs), που είναι υπεύθυνα για τη μετάδοση του περιεχομένου από τους διακομιστές στους τελικούς χρήστες, μπορεί να έχουν αστάθεια στην απόδοσή τους. Αυτά τα δίκτυα διαχειρίζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων και οποιαδήποτε δυσλειτουργία μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα και την ποιότητα με την οποία το περιεχόμενο φτάνει στους χρήστες (Küfeoğlu, 2022; Chen & Lien, 2014). Επομένως, η παροχή μιας σταθερά καλής εμπειρίας χρήστη είναι πολύπλοκη και απαιτεί συνεχή διαχείριση και βελτιστοποίηση αυτών των παραγόντων (Sobiesiak & O’Keefe, 2011; Terzui, 2020).

Η βελτιστοποίηση της εμπειρίας των χρηστών έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον τόσο της ακαδημαϊκής κοινότητας όσο και της βιομηχανίας. Έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για να βελτιωθεί η αλυσίδα παράδοσης βίντεο, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο τα βίντεο φτάνουν στους χρήστες, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη εμπειρία χρήσης. Οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις για τη βελτίωση της εμπειρίας αυτής επικεντρώνονται είτε στη βελτίωση του δικτύου (καλύτερη κατανομή των πόρων και καλύτερη δρομολόγηση δεδομένων) είτε στη χρήση τεχνικών που προσαρμόζουν τη ροή βίντεο ανάλογα με τις συνθήκες (π.χ., η ποιότητα του βίντεο προσαρμόζεται ανάλογα με την ταχύτητα σύνδεσης).

Παρά τις διάφορες προσπάθειες για τη βελτίωση της εμπειρίας χρήστη, η διαχείρισή της εξακολουθεί να είναι περίπλοκη λόγω πολλών παραγόντων που μπορούν να χωριστούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες. Ένας πρώτος παράγοντας αφορά τη μεταβλητότητα των δικτυακών πόρων και την αστάθεια ασύρματων δικτύων. Τα ασύρματα δίκτυα είναι συχνά ευμετάβλητα, δηλαδή οι ταχύτητες και η ποιότητα του σήματος μπορεί να αλλάζουν γρήγορα. Επίσης, οι διαφορετικοί χρήστες που βρίσκονται σε ετερογενή περιβάλλοντα, όπως σταθερά (οικιακά δίκτυα) και κινητά δίκτυα (κινητά τηλέφωνα), έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και συνθήκες σύνδεσης. Για παράδειγμα, σε πολύ πυκνές περιοχές, όπως τρένα, στάδια ή εμπορικά κέντρα, πολλοί χρήστες προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο ταυτόχρονα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το δίκτυο πρέπει

να προσαρμόζει συνεχώς τον τρόπο που κατανέμει τους πόρους του (π.χ., το εύρος ζώνης) για να εξυπηρετεί σωστά όλους τους χρήστες. Αυτή η συνεχής προσαρμογή είναι ιδιαίτερα δύσκολη, καθώς η ζήτηση μεταβάλλεται διαρκώς.

Επιπλέον νέες και καινοτόμες υπηρεσίες, όπως τα βιντεοπαιχνίδια και η εικονική ή επαυξημένη πραγματικότητα (VR/AR, Virtual Reality/Augmented Reality), απαιτούν πολύ υψηλότερους πόρους δικτύου για να λειτουργούν ομαλά. Αυτές οι εφαρμογές έχουν απαιτητικές ανάγκες σε δεδομένα και πρέπει να παραδίδονται με χαμηλή καθυστέρηση για να προσφέρουν καλή εμπειρία στους χρήστες. Επιπλέον, οι χρήστες σήμερα έχουν υψηλότερες προσδοκίες για την ποιότητα των υπηρεσιών τους και θέλουν γρήγορη, ομαλή και αξιόπιστη απόδοση από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν. Οι πάροχοι υπηρεσιών, όπως οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών, πρέπει να ανταποκρίνονται σε αυτές τις προσδοκίες, ενώ ταυτόχρονα πρέπει να βελτιστοποιούν τα λειτουργικά τους κόστη για να παραμένουν βιώσιμοι.

Ακόμη οι πάροχοι υπηρεσιών διαχειρίζονται τόσο σταθερά δίκτυα (π.χ., οικιακές ευρυζωνικές συνδέσεις) όσο και κινητά δίκτυα (π.χ., δίκτυα κινητής τηλεφωνίας), τα οποία έχουν πολύ διαφορετικές τεχνικές απαιτήσεις και περιορισμούς. Κάθε τύπος δικτύου έχει διαφορετικές δυνατότητες και η διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας σε αυτά τα δίκτυα απαιτεί εξειδικευμένες μεθόδους μέτρησης και αξιολόγησης. Για παράδειγμα, τα κινητά δίκτυα έχουν πιο περιορισμένο εύρος ζώνης και είναι πιο επιρρεπή σε προβλήματα σύνδεσης, οπότε οι μέθοδοι διαχείρισης για τη βελτίωση της εμπειρίας χρήστη πρέπει να προσαρμόζονται σε αυτούς τους περιορισμούς.

Τέλος οι πολυμεσικές υπηρεσίες, όπως η ροή βίντεο, γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς και χρησιμοποιούνται από τεράστιο αριθμό χρηστών. Αυτό δημιουργεί προκλήσεις, καθώς οι τελικοί χρήστες χρησιμοποιούν διαφορετικές συσκευές, όπως κινητά τηλέφωνα, tablets, υπολογιστές και τηλεοράσεις, οι οποίες έχουν διαφορετικές δυνατότητες όσον αφορά το μέγεθος οθόνης, την υπολογιστική ισχύ και την αποθηκευτική χωρητικότητα. Η ετερογένεια αυτή σημαίνει ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλοί παράγοντες κατά την κατανομή πόρων στο δίκτυο. Για παράδειγμα, κάποιος που βλέπει βίντεο σε μια συσκευή με μικρότερη οθόνη ή χαμηλότερη ανάλυση δεν χρειάζεται την ίδια ποσότητα δεδομένων με κάποιον που χρησιμοποιεί συσκευή υψηλής ανάλυσης, όπως μια 4K τηλεόραση. Συνολικά, η διαχείριση της QoE είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί συνεχή προσαρμογή σε πολλούς παράγοντες, καθώς οι ανάγκες των χρηστών, οι τεχνολογίες και οι συνθήκες δικτύου συνεχώς αλλάζουν.

Η αυξανόμενη ζήτηση και οι υψηλές απαιτήσεις των χρηστών για υπηρεσίες υψηλής ποιότητας έχουν αναγκάσει τους παρόχους τηλεπικοινωνιών να επενδύσουν σε νέες και εξελιγμένες τεχνολογίες. Πιο συγκεκριμένα η SDN (Software-Defined Networking, Δικτύωση Καθορισμένη από Λογισμικό) επιτρέπει τη διαχείριση δικτύων μέσω λογισμικού, παρέχοντας καλύτερη προσαρμοστικότητα και ευκολία στις αλλαγές, μειώνοντας την ανάγκη για φυσικές αναβαθμίσεις. Η NFV, (Network Functions Virtualization, Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών), από την άλλη, επιτρέπει την εκτέλεση δικτυακών υπηρεσιών σε εικονικά περιβάλλοντα αντί για εξειδικευμένο υλικό, μειώνοντας έτσι το κόστος και αυξάνοντας την ευελιξία.

Αυτές οι τεχνολογίες γίνονται απαραίτητες λόγω της πίεσης που δημιουργούν οι νέες περιπτώσεις χρήσης. Για παράδειγμα, η ανάγκη για παροχή βίντεο σε υπερυψηλές αναλύσεις όπως 4K και 8K απαιτεί δίκτυα που μπορούν να προσφέρουν υψηλή ταχύτητα και αξιοπιστία. Επίσης, οι ελεγχόμενες από το δίκτυο επικοινωνίες D2D και η MTC, που αναφέρεται σε αυτόματες επικοινωνίες μεταξύ μηχανών, αυξάνουν τη ζήτηση για πιο εξελιγμένα δίκτυα. Το MIIoT, που αφορά τη σύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών στο διαδίκτυο, προσθέτει ακόμη μια διάσταση στην ανάγκη για αποδοτικότερη και πιο ευέλικτη δικτύωση.

Επιπλέον, η Υπολογιστική στο Άκρο του Δικτύου (MEC, Mobile Edge Computing) μεταφέρει την υπολογιστική ισχύ πιο κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την απόδοση, κάτι που είναι κρίσιμο για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση, όπως η εικονική πραγματικότητα (VR) και τα αυτόνομα οχήματα. Το C/FoC προσφέρει αποθηκευτική και υπολογιστική ισχύ σε διάφορα επίπεδα του δικτύου, με το "νέφος" να παρέχει κεντρικούς διακομιστές και την "ομίχλη" να προσεγγίζει πιο κοντά στις συσκευές των χρηστών, προσφέροντας ταχύτερη πρόσβαση. Οι τεχνολογίες αυτές βοηθούν τους παρόχους να αντιμετωπίσουν τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις για γρήγορη και αξιόπιστη συνδεσιμότητα και να ανταποκριθούν στις εξελισσόμενες ανάγκες των χρηστών.

Σε ένα τέτοιο ευέλικτο και γρήγορα μεταβαλλόμενο περιβάλλον, καθίσταται απαραίτητο να εξεταστούν νέες προσεγγίσεις, όπως ο διαχωρισμός των επιπέδων ελέγχου και χρήστη, και να επαναπροσδιοριστούν πιθανώς τα όρια μεταξύ των διαφορετικών δικτυακών τομέων, όπως του δικτύου πρόσβασης και του βασικού δικτύου. Υπάρχει συνεπώς ανάγκη για την ανάπτυξη νέων αυτόνομων πλατφορμών διαχείρισης δικτύου, που να μπορούν να εγγυηθούν την ποιότητα εμπειρίας των

χρηστών, ιδίως σε ετερογενή περιβάλλοντα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, τεχνολογίες όπως το SDN και το NFV έχουν αναγνωρισθεί ως βασικές για τον έλεγχο των μελλοντικών δικτύων, προσφέροντας δυνατότητες προγραμματισμού, κεντρικής διαχείρισης, προσαρμοστικότητας και οικονομικής αποδοτικότητας. Το SDN και το NFV θεωρούνται ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο. Πράγματι, αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να επιτρέψουν την αυτοματοποίηση της διαχείρισης του δικτύου και να διασφαλίσουν ότι πληρούνται οι απαιτήσεις QoS/QoE των τελικών χρηστών, καθώς και οι Συμφωνίες Επιπέδου Εμπειρίας (ELA, Experience Level Agreement), σε ετερογενή περιβάλλοντα. Ακόμη πιο σημαντικά, το SDN και το NFV μπορούν να προσφέρουν πόρους, υποδομές και υπηρεσίες από άκρο σε άκρο σε πολλαπλούς προγραμματιζόμενους τομείς, οι οποίοι ανήκουν σε διαφορετικούς παρόχους ή υπηρεσίες. Παράλληλα συνεχίζονται έρευνες για το πώς τα μελλοντικά δίκτυα και οι υποστηρικτικές τεχνολογίες μπορούν να είναι πλήρως προσαρμόσιμες μέσω λογισμικού και οι πλατφόρμες να λειτουργούν ανεξάρτητα από το υλικό. Παράλληλα με τις τυποποιητικές δραστηριότητες που σχετίζονται με το SDN και το NFV, είναι άμεση η ανάγκη για τη μελέτη της υιοθέτησης αυτών των τεχνολογιών και του τρόπου με τον οποίο μπορούν να επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία, τη διαχείριση και την παροχή υπηρεσιών QoE στις αναδυόμενες και μελλοντικές δικτυακές υποδομές.

## **1.1 Επισκόπηση και Ανάγκες Έρευνας στη Διαχείριση της QoE με Χρήση SDN και NFV**

Η SDN και η NFV είναι δύο σύγχρονες τεχνολογίες που υιοθετούνται γρήγορα από τη βιομηχανία και την ακαδημαϊκή κοινότητα. Ο λόγος που προσελκύουν τόσο μεγάλο ενδιαφέρον είναι επειδή θεωρούνται κρίσιμες για την ανάπτυξη εξατομικευμένων υπηρεσιών που προσαρμόζονται καλύτερα στις ανάγκες των χρηστών, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν πιο αποτελεσματικές λύσεις για τον έλεγχο και τη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) στις πολυμεσικές υπηρεσίες, δηλαδή υπηρεσίες που σχετίζονται με την κατανάλωση περιεχομένου όπως βίντεο και ήχος. Σε τρέχοντα και μελλοντικά δίκτυα, όπως τα δίκτυα 5G (Fifth Generation, Πέμπτη Γενιά), είναι ζωτικής σημασίας να διασφαλιστεί ότι οι χρήστες απολαμβάνουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες, ιδιαίτερα καθώς η ζήτηση για πολυμέσα αυξάνεται ραγδαία. Οι τεχνολογίες SDN και NFV επιτρέπουν στους παρόχους δικτύων να έχουν μεγαλύτερη ευελιξία και έλεγχο στις



υποδομές τους, γεγονός που τους επιτρέπει να προσαρμόζουν δυναμικά τις υπηρεσίες ώστε να βελτιώνουν την QoE. Παράλληλα, έχουν γίνει πολλές μελέτες και ερευνητικές εργασίες που στοχεύουν στην αναγνώριση νέων προσεγγίσεων και περιπτώσεων χρήσης των τεχνολογιών αυτών, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη διαχείριση της QoE τόσο σε σταθερά όσο και σε κινητά δίκτυα. Αυτές οι εργασίες εξετάζουν διάφορες αρχιτεκτονικές και μεθόδους, αναζητώντας τρόπους βελτίωσης της ποιότητας των υπηρεσιών που προσφέρονται στους χρήστες, αντιμετωπίζοντας παράλληλα τις προκλήσεις που θέτουν οι σύγχρονες απαιτήσεις της δικτυακής υποδομής.

Η μελέτη του Meddeb (2020) επικεντρώθηκε στη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε ασύρματα δίκτυα, και πιο συγκεκριμένα σε τρεις βασικούς τομείς: τη μοντελοποίηση, τη μέτρηση και την προσαρμογή της QoE. Στον τομέα της μοντελοποίησης της QoE, η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία μοντέλων που εξηγούν πώς διάφοροι παράγοντες, όπως η ταχύτητα δικτύου, οι καθυστερήσεις και η ποιότητα βίντεο, επηρεάζουν την εμπειρία του χρήστη (Meddeb, 2020). Αυτά τα μοντέλα δίνουν τη δυνατότητα στους παρόχους υπηρεσιών να κατανοούν καλύτερα τι ακριβώς βελτιώνει ή επιδεινώνει την εμπειρία των χρηστών τους, βοηθώντας τους έτσι να προσαρμόσουν τις υπηρεσίες τους για τη βελτιστοποίηση της QoE. Η μέτρηση της QoE αφορά τη συλλογή δεδομένων και την ανάλυση παραγόντων που καθορίζουν την ποιότητα εμπειρίας των χρηστών. Οι μετρήσεις αυτές μπορούν να είναι αντικειμενικές, όπως η ταχύτητα σύνδεσης, η καθυστέρηση και η ποιότητα της ροής βίντεο, αλλά και υποκειμενικές, όπως οι αξιολογήσεις χρηστών για την προσωπική τους εμπειρία. Η σωστή μέτρηση της QoE βοηθά τους παρόχους να κατανοούν τις πραγματικές ανάγκες των χρηστών και να εντοπίζουν τυχόν προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου τους.

Η προσαρμογή της QoE επικεντρώνεται στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη δυναμική προσαρμογή των υπηρεσιών, με στόχο τη διασφάλιση της βέλτιστης εμπειρίας για τους χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα του βίντεο ή άλλων υπηρεσιών προσαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο, ανάλογα με την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου, έτσι ώστε ο χρήστης να έχει την καλύτερη δυνατή εμπειρία, ακόμη και σε περιπτώσεις μειωμένης συνδεσιμότητας ή περιορισμένου εύρους ζώνης (Seufert, Egger, Slanina, Zinner, Hobfeld & Tran-Gia, 2015). Οι Jiang M. et al, (2018) ανέλυσαν τις νέες προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση της QoE για πολυμεσικές υπηρεσίες δικτύου. Αυτές οι υπηρεσίες αφορούν τη μετάδοση δεδομένων, όπως βίντεο και ήχου, σε πραγματικό χρόνο μέσω του διαδικτύου. Η ανάλυσή τους επικεντρώθηκε σε τρόπους

βελτιστοποίησης της εμπειρίας των χρηστών που χρησιμοποιούν τέτοιες υπηρεσίες, ενώ παράλληλα έλαβαν υπόψη τις τεχνικές περιορισμούς και ανάγκες των δικτύων. Μια σειρά μελετών, ασχολήθηκε με στρατηγικές προγραμματισμού βασισμένες στην QoE για ασύρματα συστήματα. Οι στρατηγικές αυτές βοηθούν στην αποτελεσματική διαχείριση των πόρων του δικτύου, ώστε να εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή εμπειρία για τους τελικούς χρήστες, παρά τους τεχνικούς περιορισμούς. Μια άλλη μελέτη εστίασε στην ποιότητα εμπειρίας στη ροή προσαρμοστικού βίντεο μέσω HTTP (Hypertext Transfer Protocol, Πρωτόκολλο Μεταφοράς Υπερκειμένου).

Το προσαρμοστικό βίντεο είναι μια τεχνολογία που προσαρμόζει αυτόματα την ποιότητα του βίντεο ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου του χρήστη, με στόχο τη διατήρηση σταθερής εμπειρίας ανεξαρτήτως των συνθηκών του δικτύου. Τέλος οι Bouten, Latré, Famaey, De Turck & Demeester (2014) παρουσίασαν μια ολοκληρωμένη μελέτη για τα διάφορα μοντέλα QoE που εφαρμόζονται σε εφαρμογές HTTP Adaptive Streaming (HAS). Αυτή η μελέτη ανέλυσε πώς οι τεχνικές προσαρμοστικής ροής μπορούν να βελτιώσουν την εμπειρία του χρήστη σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις διακυμάνσεις της απόδοσης του δικτύου.

Η μελέτη των Bouten et al. (2014) παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε επίπεδο δικτύου, εστιάζοντας κυρίως στα κινητά δίκτυα. Πιο πρόσφατα, οι ερευνητές Seufert, Egger, Slanina, Zinner, Hobfeld & Tran-Gia, (2015) εξέτασαν τη διαχείριση της QoE σε υπηρεσίες προσαρμοστικής ροής βίντεο, όπου το βίντεο προσαρμόζεται αυτόματα ανάλογα με την ποιότητα της σύνδεσης δικτύου του χρήστη. Επιπλέον, υπάρχουν μελέτες που αναλύουν τη μοντελοποίηση και την αξιολόγηση της QoE, τόσο με υποκειμενικές μεθόδους (όπως η εμπειρία χρήστη) όσο και με αντικειμενικές μεθόδους (όπως η μέτρηση της ποιότητας του δικτύου). Αυτές οι μελέτες εξετάζουν τη διαχείριση της QoE στη μετάδοση βίντεο μέσω διαφόρων δικτύων, όπως σταθερά και κινητά δίκτυα (Seufert et al. 2015).

Ωστόσο, οι υπάρχουσες μελέτες (Zhang, Cheng & Boutaba, 2010) δεν αναλύουν πώς η χρήση των νέων τεχνολογιών όπως η Δικτύωση Οριζόμενη από Λογισμικό (SDN) και η Εικονικοποίηση Λειτουργιών Δικτύου μπορούν να βοηθήσουν στη βελτίωση ή τη βελτιστοποίηση της QoE. Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν δυνατότητες αυτοματοποίησης, προγραμματισμού, ευελιξίας, κλιμακωσιμότητας και ελέγχου του δικτύου, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους παρόχους δικτύων και υπηρεσιών

για να προσαρμόσουν το δίκτυο στις ανάγκες των χρηστών σε πραγματικό χρόνο (Jarschel, Wamser, Hohn, Zinner & Tran-Gia, 2013).

Έτσι, ενώ οι παραδοσιακές μέθοδοι διαχείρισης της QoE επικεντρώνονται σε συγκεκριμένες παραμέτρους του δικτύου, οι SDN και NFV επιτρέπουν στους παρόχους να διαχειρίζονται το δίκτυο με πιο ευέλικτους και αποδοτικούς τρόπους, εξασφαλίζοντας υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών για τους χρήστες (Mijumbi, Serrat, Gorricho, Bouten, De Turck & Boutaba, 2016).

Διάφορες μελέτες έχουν προσπαθήσει να καλύψουν τα υπάρχοντα κενά στη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) για πολυμεσικές υπηρεσίες, εξετάζοντας τις δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες Δικτύωσης Οριζόμενης από Λογισμικό (SDN) και Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (Feamster, Rexford & Zegura, 2014). Αυτές οι μελέτες αναλύουν διαφορετικές προσεγγίσεις, αρχιτεκτονικές και περιπτώσεις χρήσης, αναδεικνύοντας τα τεράστια πλεονεκτήματα των SDN και NFV στη βελτιστοποίηση της QoE τόσο στα σημερινά όσο και στα μελλοντικά δίκτυα.

Η μελέτη (Latre, Simoens, De Turck, Van Dijk & Dhoedt, 2011) παρουσίασε ανασκόπηση της σύγχρονης κατάστασης της QoE, εξετάζοντας μεθόδους αξιολόγησης, μοντέλα QoE και τρόπους ελέγχου αυτής της ποιότητας σε δίκτυα που βασίζονται στις τεχνολογίες SDN και NFV. Παρουσιάστηκαν επίσης περιπτώσεις χρήσης όπου η προσαρμογή βίντεο γίνεται με βάση την QoE και την ενεργειακή αποδοτικότητα, όπως προβλέπεται από το ερευνητικό έργο SELFNET.

Επιπλέον, οι ερευνητές Li & Loguinov (2013), συζήτησαν πώς μπορεί να διαχειριστεί η QoE σε υπηρεσίες κινητής άκρης, αξιοποιώντας SDN και NFV, για να παρέχουν καλύτερη ποιότητα υπηρεσιών σε χρήστες που συνδέονται μέσω κινητών δικτύων. Υπάρχουν, επίσης, εργασίες που εξετάζουν τη διαχείριση της QoE με βάση το πλαίσιο (context-aware management) από την οπτική γωνία του ελέγχου SDN σε μελλοντικά δίκτυα (Seufert, Egger, Slanina, Zinner, Hobfeld & Tran-Gia, 2015). Τέλος, διάφορα έργα παρουσιάζουν αυτοματοποιημένες προσεγγίσεις για τη διαχείριση δικτύων βασισμένων σε SDN/NFV, προσφέροντας τρόπους για πιο ευέλικτο και αυτόνομο έλεγχο της QoE, προσαρμοσμένο στις ανάγκες των δικτύων επόμενης γενιάς (Boutaba, Salahuddin, Limam, Ayoubi, Shahriar, Estrada-Solano & Caicedo, 2018). Παρά τις πρόσφατες προσπάθειες που εξετάζουν τη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE)

μέσω των τεχνολογιών SDN (Δικτύωση Οριζόμενη από Λογισμικό) και NFV , υπάρχουν ακόμα ορισμένοι περιορισμοί σε αυτές τις έρευνες.

Πρώτον, πολλές μελέτες δεν παρέχουν αναλυτική κάλυψη για τις εξελίξεις στη δημιουργία τυποποιημένων προτύπων που σχετίζονται με την SDN και την NFV. Η τυποποίηση είναι κρίσιμη για τη δημιουργία μιας κοινής βάσης που θα επιτρέψει την καθολική εφαρμογή και την υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών στα δίκτυα. Αυτό το κενό αφήνει περιθώριο για περαιτέρω έρευνα και βελτίωση στον τομέα της τυποποίησης (Kreutz, Ramos, Verissimo, Rothenberg, Azodolmolky & Uhlig, 2015)

Δεύτερον, υπάρχει έλλειψη πληροφοριών σχετικά με τις τρέχουσες ερευνητικές προσπάθειες, τα έργα και τις προκλήσεις που συνδέονται με τη χρήση SDN και NFV για τη διαχείριση της QoE. Οι μελέτες δεν αναλύουν επαρκώς τις αναδυόμενες πολυμεσικές υπηρεσίες και εφαρμογές, όπως οι εφαρμογές εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας (VR/AR), οι οποίες παρουσιάζουν σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά τις απαιτήσεις ποιότητας. Επιπλέον, οι υφιστάμενες μελέτες περιορίζονται στο να προσφέρουν περιορισμένες αρχιτεκτονικές λύσεις και στρατηγικές για την υλοποίηση και ανάπτυξη της διαχείρισης QoE με τη χρήση των τεχνολογιών SDN και NFV. Αυτό δημιουργεί ένα κενό στην παροχή ξεκάθαρων οδηγιών στους παρόχους για το πώς μπορούν να αξιοποιήσουν αυτές τις τεχνολογίες με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

## Κεφάλαιο 2. Διαχείριση QoE για υπηρεσίες ροής πολυμέσων

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τις πτυχές της ποιότητας εμπειρίας (QoE), τη μοντελοποίηση και την αξιολόγηση της QoE, καθώς και ορισμένες μετρικές και βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs) που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της διαχείρισης της QoE. Επίσης, παρέχεται μια επισκόπηση της παρακολούθησης και της μέτρησης της QoE, καθώς και της βελτιστοποίησης και του ελέγχου της QoE χρησιμοποιώντας την αλυσίδα παράδοσης πολυμεσικών υπηρεσιών από άκρο σε άκρο.

### 2.1 Ποιότητα Εμπειρίας: Ορισμός

Ο όρος Quality of Experience (QoE), δηλαδή η Ποιότητα Εμπειρίας, αποτελεί μια πιο σύγχρονη προσέγγιση για την αξιολόγηση της ικανοποίησης των χρηστών με τις πολυμεσικές υπηρεσίες, συγκριτικά με την παραδοσιακή χρήση των μετρικών Quality of Service (QoS). Η διαφορά ανάμεσα στις δύο έννοιες είναι ότι η QoS εστιάζει κυρίως στις τεχνικές παραμέτρους του δικτύου, όπως η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων. Αυτές οι μετρικές αποτυπώνουν την απόδοση του δικτύου, αλλά δεν λαμβάνουν υπόψη την πραγματική εμπειρία του χρήστη από την υπηρεσία (Varela & Skorin-Karou, 2017).

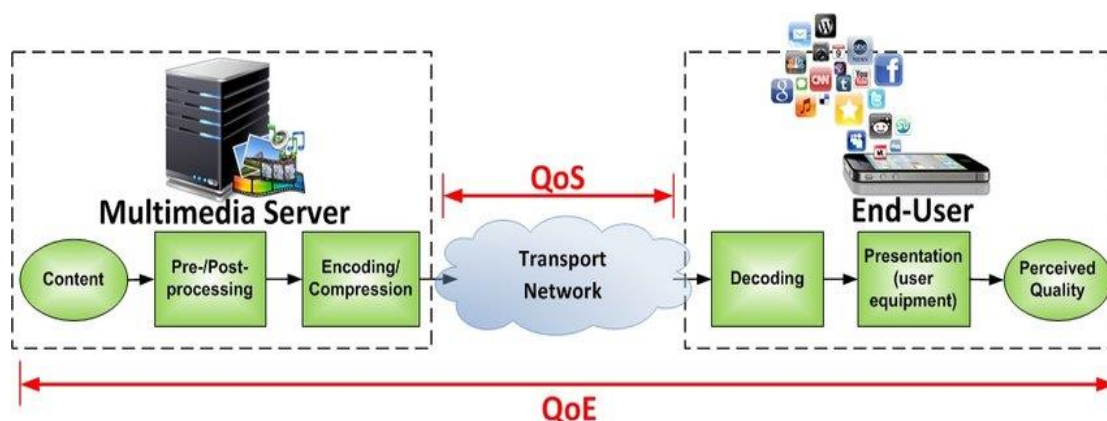
Η QoE, από την άλλη πλευρά, εστιάζει στην υποκειμενική εμπειρία του χρήστη, δηλαδή στο πώς ο χρήστης αντιλαμβάνεται την ποιότητα μιας υπηρεσίας ή εφαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι η QoE εξετάζει πώς η συγκεκριμένη υπηρεσία ανταποκρίνεται στις προσδοκίες του χρήστη, λαμβάνοντας υπόψη τις προσωπικές του ανάγκες, επιθυμίες και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Για παράδειγμα, ένας χρήστης μπορεί να θεωρήσει ότι μια υπηρεσία βίντεο χαμηλής ανάλυσης είναι αποδεκτή αν δεν υπάρχει καθυστέρηση ή διακοπή, αλλά κάποιος άλλος χρήστης μπορεί να είναι δυσαρεστημένος από τη χαμηλή ποιότητα εικόνας, ανεξαρτήτως της ομαλής ροής (Li, Begen & Girod, 2011).

Σύμφωνα με τον ορισμό της QoE, η ποιότητα που αντιλαμβάνεται ο χρήστης εξαρτάται από τη συνολική ικανοποίηση που λαμβάνει από την υπηρεσία ή την εφαρμογή, και αυτή η ικανοποίηση μπορεί να επηρεάζεται τόσο από αντικειμενικούς παράγοντες, όπως η απόδοση του δικτύου, όσο και από υποκειμενικούς, όπως οι προσωπικές προσδοκίες ή η διάθεση του χρήστη εκείνη τη στιγμή. Έτσι, η QoE μπορεί να οριστεί ως «ο βαθμός ευχαρίστησης ή ενόχλησης που αισθάνεται ένας χρήστης κατά τη χρήση μιας εφαρμογής

ή υπηρεσίας, ο οποίος καθορίζεται από την ικανοποίηση ή μη των προσδοκιών του αναφορικά με τη χρησιμότητα ή την απόλαυση που προσφέρει η εφαρμογή/υπηρεσία» (Søgaard, Krasulja & Pedersen, 2018). Αυτός ο ορισμός της QoE τονίζει ότι η εμπειρία του χρήστη είναι μια πολυπαραγοντική έννοια, όπου παίζουν ρόλο οι αντικειμενικές επιδόσεις του συστήματος και οι υποκειμενικές αντιλήψεις του χρήστη. Επομένως, για να βελτιωθεί η εμπειρία χρήσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη όχι μόνο τα τεχνικά χαρακτηριστικά της υπηρεσίας αλλά και ο τρόπος με τον οποίο τα αντιλαμβάνονται οι τελικοί χρήστες.

Η εικόνα 1 δείχνει τη σχέση μεταξύ Quality of Service (QoS) και Quality of Experience, διαχωρίζοντας τις διαδικασίες που γίνονται από τον διακομιστή πολυμέσων (multimedia server) και την τελική εμπειρία του χρήστη (end-user). Απεικονίζει πώς η ποιότητα υπηρεσίας (QoS) επηρεάζει την απόδοση του δικτύου, ενώ η ποιότητα εμπειρίας (QoE) εστιάζει στην αντίληψη του χρήστη για την ποιότητα του περιεχομένου.

**Εικόνα 1. Σύγκριση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS) και της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE)**



Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/QoS-vs-QoE-in-Multimedia-Content-Delivery\\_fig2\\_322257972](https://www.researchgate.net/figure/QoS-vs-QoE-in-Multimedia-Content-Delivery_fig2_322257972)

## 2.2 Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση QoE: Μετρικές και Μοντέλα

Η μοντελοποίηση και αξιολόγηση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) αποτελεί κρίσιμο πεδίο της έρευνας για τη διαχείριση πολυμεσικών υπηρεσιών. Σύμφωνα με την ITU-T (International Telecommunication Union, Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών) Rec. P.10/G.100 Amendment 5, η αξιολόγηση της QoE περιγράφεται ως η διαδικασία που περιλαμβάνει τη μέτρηση ή εκτίμηση της ποιότητας της εμπειρίας για ένα σύνολο χρηστών μιας εφαρμογής ή υπηρεσίας. Αυτή η διαδικασία ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα και λαμβάνει υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν την QoE, οι οποίοι μπορεί να ελέγχονται, να μετρώνται ή απλά να συλλέγονται και να αναφέρονται (Li, Begen &

Girod, 2011). Σε αυτό το πλαίσιο, η αξιολόγηση της QoE είναι ένα κρίσιμο βήμα για τη σωστή παρακολούθηση και διαχείριση της ποιότητας της εμπειρίας, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως η SDN και η NFV.

Για τη μοντελοποίηση και αξιολόγηση της QoE, χρησιμοποιούνται διάφορες μετρικές και μοντέλα. Οι μετρικές QoE είναι εργαλεία που αναπτύσσονται για την αντικειμενική εκτίμηση της ποιότητας της εμπειρίας, βασισμένα στις ιδιότητες της εικόνας ή του βίντεο που μεταδίδονται. Αυτές οι μετρικές προγραμματίζονται έτσι ώστε να προβλέπουν την ποιότητα όπως θα την αντιλαμβανόταν ο ανθρώπινος χρήστης, αποφεύγοντας την απλή μέτρηση των παραμέτρων του δικτύου, όπως η απώλεια πακέτων ή η καθυστέρηση. Οι μετρικές QoE ταξινομούνται ανάλογα με την ποσότητα των πληροφοριών της πηγής που απαιτούνται για την αξιολόγησή τους, και διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες: Πλήρης Αναφορά (Full Reference - FR), Μειωμένη Αναφορά (Reduced Reference - RR) και Χωρίς Αναφορά (No-Reference - NR) (Søgaard, Krasulja & Pedersen, 2018).

Οι μετρικές Πλήρης Αναφορά (FR) απαιτούν πλήρη πρόσβαση στις πληροφορίες της πηγής, δηλαδή στα δεδομένα της αρχικής εικόνας ή του βίντεο. Αυτές οι μετρικές προσφέρουν συνήθως τις πιο ακριβείς εκτιμήσεις της ποιότητας, καθώς συγκρίνουν την παραδιδόμενη εικόνα ή το βίντεο με την πρωτότυπη εικόνα ή βίντεο αναφοράς. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιβάλλοντα όπου η πλήρης πρόσβαση στην αρχική πηγή είναι εφικτή, επιτρέποντας λεπτομερή ανάλυση των διακυμάνσεων στην ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη. Αντίθετα, οι μετρικές Μειωμένη Αναφορά (RR) απαιτούν μόνο μερικές πληροφορίες της πηγής, χωρίς την ανάγκη πλήρους πρόσβασης. Αν και οι μετρικές RR δεν είναι τόσο ακριβείς όσο οι FR, προσφέρουν μια ικανοποιητική εκτίμηση της ποιότητας, χρησιμοποιώντας λιγότερες και περιορισμένες πληροφορίες. Οι μετρικές RR είναι χρήσιμες σε καταστάσεις όπου η πλήρης πρόσβαση στην αρχική πηγή δεν είναι εφικτή, παρέχοντας μια ενδεικτική εκτίμηση της ποιότητας με λιγότερη ανάλυση (Varela & Skorin-Karpon, 2017).

Τέλος, οι μετρικές Χωρίς Αναφορά (NR) δεν απαιτούν καμία πληροφορία της πηγής και αξιολογούν την ποιότητα βασισμένες αποκλειστικά στις ιδιότητες της παραδιδόμενης εικόνας ή του βίντεο. Αυτές οι μετρικές είναι χρήσιμες σε περιβάλλοντα όπου η πρόσβαση στην αρχική πηγή δεν είναι δυνατή. Παρόλο που δεν προσφέρουν την ίδια ακριβή εκτίμηση της ποιότητας όπως οι FR και RR, οι μετρικές NR είναι σημαντικές



για την αξιολόγηση της ποιότητας της εμπειρίας όταν μόνο τα δεδομένα μετά την παράδοση είναι διαθέσιμα.

Η ανάπτυξη μοντέλων για την QoE έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο τα τελευταία χρόνια. Ερευνητές έχουν δημιουργήσει προγνωστικά μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα σχετικά με δείκτες ποιότητας που σχετίζονται με την QoE. Αυτά τα μοντέλα προσπαθούν να προβλέψουν την ποιότητα της εμπειρίας με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται κατά τη διαδικασία μέτρησης. Για παράδειγμα, η αξιολόγηση QoE σε εφαρμογές HTTP Adaptive Streaming (HAS) έχει εξεταστεί εκτενώς, με ανασκοπήσεις όπως εκείνες των Seufert, Egger, Slanina, Zinner, Hobfeld, & Tran-Gia (2014) οι οποίες έχουν αναπτύξει ειδικές μετρικές και μοντέλα για αυτές τις δυναμικές συνθήκες. Παρόμοια, η ανασκόπηση των μετρικών QoE και των μεθοδολογιών αξιολόγησης από τους Chen, Wu, Chang & Lei (2009) παρέχει μια συνολική εικόνα των προσεγγίσεων μέτρησης της QoE. Αυτή η ανασκόπηση καλύπτει διάφορες μεθοδολογίες και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και βελτίωση της ποιότητας της εμπειρίας, τονίζοντας τη σημασία της κατανόησης και ανάλυσης των δεδομένων ποιότητας. Αυτές οι μετρικές και μοντέλα είναι θεμελιώδεις για την κατανόηση και διαχείριση της ποιότητας της εμπειρίας των τελικών χρηστών και για την αποτελεσματική παρακολούθηση και βελτίωση των πολυμεσικών υπηρεσιών (Seshadrinathan & Bovik, 2011).



## Κεφάλαιο 3. Μοντελοποίηση και Αξιολόγηση QoE

### 3.1 Παρακολούθηση και Μέτρηση της QoE

Για την αποτελεσματική διαχείριση και βελτιστοποίηση της QoE των τελικών χρηστών, είναι κρίσιμο να κατανοήσουμε τις αιτίες που οδηγούν σε υποβάθμιση της ποιότητας ή σε μη ικανοποιητικά επίπεδα εμπειρίας. Η διαδικασία αυτή απαιτεί μια περιεκτική παρακολούθηση και ανάλυση διαφόρων παραμέτρων που σχετίζονται με τη λειτουργία της υπηρεσίας, καθώς και με την κατάσταση του δικτύου και του τερματικού.

Πρώτον, είναι απαραίτητο να συλλέγονται πληροφορίες για τις δυνατότητες του τερματικού. Αυτές περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά όπως το μέγεθος της οθόνης, η απόδοση απεικόνισης και η ικανότητα επεξεργασίας. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο οι συσκευές των χρηστών επηρεάζουν την QoE. Η παρακολούθηση των χαρακτηριστικών των τερματικών μπορεί να αποκαλύψει εάν τα προβλήματα της ποιότητας προέρχονται από περιορισμούς της συσκευής ή από άλλες πηγές (Le Callet, Möller & Perkis, 2013).

Δεύτερον, οι παράμετροι της υπηρεσίας ή της εφαρμογής πρέπει επίσης να παρακολουθούνται προσεκτικά. Αυτό περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση της απόδοσης της υπηρεσίας, όπως η ανταπόκριση της εφαρμογής, η σταθερότητα της υπηρεσίας και η εμπειρία χρήστη. Η κατανόηση της λειτουργίας της εφαρμογής σε συνδυασμό με την κατάσταση του δικτύου βοηθάει στην αναγνώριση αν τα προβλήματα προέρχονται από την εφαρμογή ή αν σχετίζονται με τα δεδομένα που μεταφέρονται μέσω του δικτύου (Le Callet, Möller & Perkis, 2013)..

Επιπλέον, η παρακολούθηση και συλλογή δεδομένων για τις παραμέτρους του δικτύου είναι απαραίτητη. Αυτό περιλαμβάνει δείκτες όπως ο ρυθμός μετάδοσης (throughput), η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση (latency), και άλλες σχετικές μετρήσεις που επηρεάζουν την ποιότητα της εμπειρίας. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να συλλέγονται από συσκευές πελατών ή στοιχεία δικτύου χρησιμοποιώντας μηχανισμούς παρακολούθησης. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, ειδικά σε τομείς όπως η εικονικοποίηση και η διαχείριση δεδομένων, οι εικονικοί ανιχνευτές (virtual probes) έχουν εξελιχθεί σε κρίσιμα εργαλεία για την παρακολούθηση της Quality of Experience σε σύγχρονα δίκτυα που βασίζονται σε λογισμικό. Αυτοί οι ανιχνευτές προσφέρουν τη δυνατότητα συλλογής λεπτομερών και δυναμικών πληροφοριών σχετικά με την ποιότητα της εμπειρίας σε πραγματικό χρόνο. Η ικανότητα τους να παρέχουν ακριβή

και συνεχή δεδομένα επιτρέπει την αναλυτική εξέταση της QoE και την εφαρμογή στοχευμένων βελτιώσεων για την ενίσχυση της εμπειρίας των χρηστών (Søgaard, Kozamernik, Ibarrola & Staelens, 2014).

Συγκεκριμένα, οι εικονικοί ανιχνευτές συλλέγουν διάφορους Δείκτες Βασικής Απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs), όπως ο ρυθμός μετάδοσης, η απώλεια πακέτων και η καθυστέρηση. Ο ρυθμός μετάδοσης αναφέρεται στην ποσότητα δεδομένων που μεταφέρονται μέσω του δικτύου σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Αυτή η μέτρηση είναι κρίσιμη για την κατανόηση της συνολικής ταχύτητας και αποτελεσματικότητας του δικτύου. Η απώλεια πακέτων, η οποία συμβαίνει όταν κάποια δεδομένα δεν φτάνουν στον προορισμό τους, μπορεί να οδηγήσει σε διακοπές ή στην υποβάθμιση της ποιότητας των υπηρεσιών, όπως η διακοπή της ροής βίντεο ή η καθυστέρηση σε επικοινωνίες. Η καθυστέρηση, ή ο χρόνος που απαιτείται για την αποστολή και παραλαβή των δεδομένων, επηρεάζει άμεσα την απόδοση εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο, όπως οι βιντεοκλήσεις και τα παιχνίδια (Raake & Egger, 2014).

Παράλληλα, οι Δείκτες Κύριας Ποιότητας (Key Quality Indicators - KQIs) αξιολογούν την ποιότητα της εμπειρίας από την οπτική γωνία του χρήστη. Αυτοί οι δείκτες περιλαμβάνουν στοιχεία όπως ο ρυθμός καρέ (frame rate), η ανάλυση βίντεο και η γενική χρηστικότητα της υπηρεσίας. Ο ρυθμός καρέ επηρεάζει την ομαλότητα της αναπαραγωγής βίντεο, ενώ η ανάλυση βίντεο επηρεάζει την ευκρίνεια και την ποιότητα της εικόνας. Η χρηστικότητα της υπηρεσίας αναφέρεται στη γενική ικανοποίηση του χρήστη από τη λειτουργικότητα και την απόδοση της εφαρμογής ή της υπηρεσίας. Οι συλλεγμένοι δείκτες και μετρήσεις εισάγονται σε μοντέλα εκτίμησης QoE, τα οποία αναλύουν τα δεδομένα για να παρέχουν εκτιμήσεις και προβλέψεις σχετικά με την ποιότητα της εμπειρίας. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν στατιστικά και μαθηματικά αλγόριθμους για να συνδυάσουν τις τεχνικές παραμέτρους με τις εμπειρίες των χρηστών, αναγνωρίζοντας τυχόν προβλήματα και προτείνοντας διορθωτικά μέτρα (Brunnström, Beker, De Moor, Dooms, Egger, Garcia & Raake, 2013).

Για παράδειγμα, αν ένα μοντέλο εντοπίσει αυξημένη καθυστέρηση που επηρεάζει τη συνολική ποιότητα της υπηρεσίας, μπορεί να συστήσει βελτιώσεις στη ρύθμιση του δικτύου ή να εντοπίσει σημεία συμφόρησης. Η συνεχής παρακολούθηση και ανάλυση των παραμέτρων QoE είναι ουσιώδης για τη διασφάλιση της υψηλής ποιότητας υπηρεσίας και την ικανοποίηση των χρηστών. Μέσω της κατανόησης των αιτίων που επηρεάζουν την ποιότητα της εμπειρίας, οι διαχειριστές των υπηρεσιών μπορούν να

εντοπίσουν και να διορθώσουν προβλήματα που μειώνουν την ικανοποίηση των χρηστών. Αυτή η διαδικασία βοηθά στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των υπηρεσιών και στη διατήρηση ενός θετικού επιπέδου εμπειρίας για τους τελικούς χρήστες.

Παρακάτω το διάγραμμα 1 αναδεικνύει τη ροή της διαδικασίας που εμπλέκεται στη βελτιστοποίηση της ποιότητας υπηρεσίας σε ένα δίκτυο. Ξεκινά με την παρακολούθηση της δικτυακής κίνησης, συνεχίζει με την εφαρμογή αλγορίθμων QoS για την ταξινόμηση της κίνησης και την κατανομή των πόρων, και καταλήγει στην επιβολή των πολιτικών QoS. Είναι ιδανικό για την απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο το σύστημα διασφαλίζει ότι οι πόροι του δικτύου κατανέμονται με βάση τις απαιτήσεις ποιότητας.



**Διάγραμμα 1. Διάγραμμα Προσαρμογής Δικτυακών Πόρων μέσω Διαχείρισης QoS**

### **3.2 Βελτιστοποίηση και Έλεγχος QoE στις Πολυμεσικές Υπηρεσίες: Προκλήσεις και Λύσεις**

Η διαχείριση της QoE στις πολυμεσικές υπηρεσίες είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τη διασφάλιση της ποιότητας της εμπειρίας των χρηστών. Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας έγκειται στο γεγονός ότι η βελτίωση της QoE δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα του ίδιου του περιεχομένου, αλλά και από τους μηχανισμούς που εμπλέκονται σε κάθε στάδιο της αλυσίδας παροχής, από τη δημιουργία του περιεχομένου μέχρι την τελική κατανάλωσή του από τον χρήστη. Η συνεχής παρακολούθηση αυτής της αλυσίδας απαιτεί την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών βελτιστοποίησης και ελέγχου (Fiedler, Hossfeld & Tran-Gia, 2010).

Ένας από τους βασικούς στόχους της διαχείρισης QoE είναι η μεγιστοποίηση της εμπειρίας του τελικού χρήστη μέσω της βέλτιστης αξιοποίησης των πόρων του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να υπάρχει αποδοτική κατανομή των πόρων, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη ποιότητα υπηρεσίας (QoS) που θα οδηγήσει σε υψηλότερο επίπεδο QoE. Παρ' όλα αυτά, η βελτιστοποίηση της QoE δεν είναι απλή υπόθεση. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθιστούν τη διαδικασία πολύπλοκη είναι η ετερογένεια των συσκευών των τελικών χρηστών.

Οι σύγχρονοι χρήστες καταναλώνουν πολυμέσα μέσω μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών, από smartphones και tablets έως υπολογιστές και smart TVs. Αυτή η πολυμορφία δημιουργεί προκλήσεις για την ομαλή παράδοση του περιεχομένου, καθώς κάθε συσκευή έχει διαφορετικές δυνατότητες σε ό,τι αφορά την ανάλυση οθόνης, την επεξεργαστική ισχύ, την υποστήριξη κωδικοποιητών και τη δυνατότητα απόκρισης δικτύου. Για να μπορέσει να βελτιστοποιηθεί η QoE σε όλα αυτά τα περιβάλλοντα, απαιτείται η υιοθέτηση ευέλικτων μηχανισμών προσαρμογής. Παράλληλα, η QoE επηρεάζεται από ποικίλους άλλους παράγοντες, όπως η ποιότητα του δικτύου, η απόκριση της εφαρμογής, η ταχύτητα φόρτωσης του περιεχομένου, η ομαλότητα της ροής βίντεο και η διαθεσιμότητα των υπηρεσιών. Επομένως, ο έλεγχος και η βελτιστοποίηση της QoE δεν μπορεί να γίνεται μόνο σε ένα επίπεδο, αλλά απαιτείται μια πολυεπίπεδη προσέγγιση που να περιλαμβάνει τον έλεγχο σε επίπεδο τερματικών συσκευών, δικτύου και υπηρεσιών (Reiter, Brunnström, De Moor, Larabi, Pereira, Pinheiro & You, 2014). Ακόμη, η δυναμική φύση της κατανάλωσης πολυμεσικού περιεχομένου προσθέτει επιπλέον προκλήσεις στη βελτιστοποίηση της QoE. Οι απαιτήσεις των χρηστών και οι συνθήκες του δικτύου μεταβάλλονται συνεχώς, γεγονός που απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και προσαρμογή των παραμέτρων της υπηρεσίας σε πραγματικό χρόνο. Οι προκλήσεις που αφορούν τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο της QoE μπορούν να αναλυθούν με βάση τέσσερις βασικές ερωτήσεις που επικεντρώνονται στις κρίσιμες πτυχές της διαδικασίας αυτής. Κάθε μία από αυτές τις ερωτήσεις αγγίζει διαφορετικούς τομείς, από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη, μέχρι τον ιδανικό χρόνο και τόπο εφαρμογής των διαδικασιών ελέγχου και βελτιστοποίησης (Reiter et al. 2014):

*1. Ποιοι είναι οι κύριοι παράμετροι ποιότητας που πρέπει να βελτιστοποιηθούν και να ελεγχθούν;*

Οι κύριοι παράμετροι που επηρεάζουν την εμπειρία του χρήστη περιλαμβάνουν τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως ο ρυθμός μετάδοσης (throughput), η καθυστέρηση (latency), η απώλεια πακέτων και η μεταβλητότητα της καθυστέρησης (jitter). Αυτοί οι δείκτες βασικής απόδοσης (KPIs) είναι κρίσιμοι για τη διασφάλιση της ποιότητας της υπηρεσίας, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα του περιεχομένου που παραδίδεται στους χρήστες. Εκτός από αυτούς, υπάρχουν και δείκτες κύριας ποιότητας (KQIs), όπως η ανάλυση βίντεο, ο ρυθμός καρέ (frame rate) και η συνολική σταθερότητα της εφαρμογής. Επίσης οι ρυθμίσεις υπηρεσίας, όπως ο

ρυθμός καρέ και ο τύπος κωδικοποιητή, είναι σημαντικοί για τη μεγιστοποίηση της QoE, με στόχο τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη μέσω προσαρμογής ρυθμού και κατανομής πόρων δικτύου (Fiedler, Hossfeld & Tran-Gia, 2010).

*2. Πού πρέπει να γίνει ο έλεγχος (π.χ. στην πλευρά του πελάτη, του διακομιστή ή του δικτύου);*

Ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί στην πλευρά του πελάτη, του διακομιστή ή του δικτύου, ανάλογα με τις απαιτήσεις της υπηρεσίας. Στην πλευρά του πελάτη, οι συσκευές έχουν άμεση επαφή με το περιεχόμενο, κάτι που επιτρέπει την παρακολούθηση της πραγματικής εμπειρίας χρήστη, όπως γίνεται με το εργαλείο YoMoApp, το οποίο παρακολουθεί την απόδοση των εφαρμογών απευθείας στις τελικές συσκευές. Ωστόσο, στην πλευρά του διακομιστή ή του δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί καλύτερη διαχείριση των πόρων και προσαρμογή της ποιότητας περιεχομένου για να βελτιωθεί η απόδοση του δικτύου και η εμπειρία του χρήστη. Επιπλέον η παρακολούθηση της QoE γίνεται τόσο στην πλευρά του πελάτη όσο και στο δίκτυο (Fiedler, Hossfeld & Tran-Gia, 2010). Η αρχιτεκτονική IMS του 3GPP είναι ένα παράδειγμα όπου η παρακολούθηση πραγματοποιείται στο δίκτυο, αλλά υπάρχει αλληλεπίδραση και από την πλευρά του πελάτη για την εκτίμηση της QoE.

*3. Πότε πρέπει να γίνει η βελτιστοποίηση και ο έλεγχος της QoE;*

Η βελτιστοποίηση της QoE μπορεί να γίνει είτε σε πραγματικό χρόνο (on-line) είτε μετά την ολοκλήρωση της υπηρεσίας (off-line). Ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητος για την άμεση προσαρμογή σε αλλαγές του δικτύου, ιδιαίτερα σε υπηρεσίες όπως streaming βίντεο ή διαδραστικές εφαρμογές, όπου η συνεχής ροή δεδομένων πρέπει να διατηρείται ομαλή (Fiedler, Hossfeld & Tran-Gia, 2010). Ο off-line έλεγχος επιτρέπει την αναλυτική αξιολόγηση των δεδομένων μετά την ολοκλήρωση της υπηρεσίας, βοηθώντας στη βελτίωση μακροπρόθεσμων προτύπων. Επίσης η χρήση πραγματικού χρόνου βελτιστοποίησης μέσω μηχανισμών όπως ο Aquarema, ο οποίος βελτιστοποιεί τη QoE των τελικών χρηστών ενώ η υπηρεσία βρίσκεται σε εξέλιξη.

*4. Πόσο συχνά πρέπει να γίνεται έλεγχος και βελτιστοποίηση της QoE;*

Η συχνότητα ελέγχου και βελτιστοποίησης εξαρτάται από τις ανάγκες της υπηρεσίας. Για απαιτητικές εφαρμογές όπως live streaming, ο συνεχής έλεγχος είναι αναγκαίος για να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία, ενώ για άλλες υπηρεσίες μπορεί να είναι

επαρκής λιγότερο συχνή παρακολούθηση. Η ισορροπία ανάμεσα στη συχνότητα ελέγχου και το κόστος (υπολογιστικοί πόροι, δικτυακός φόρτος) είναι σημαντική για την αποφυγή υπερφόρτωσης του συστήματος (Fiedler, Hossfeld & Tran-Gia, 2010). Ακόμη η συνεχής παρακολούθηση δεικτών απόδοσης μέσω εργαλείων, όπως το YoMoApp, και η προσαρμογή των εργαλείων διαχείρισης πόρων όταν παρουσιάζεται υποβάθμιση της QoE, κάτι που δείχνει την ανάγκη για συχνή ή συνεχή παρακολούθηση και βελτιστοποίηση.

Συνολικά, οι παραπάνω ερωτήσεις αναδεικνύουν τις πολυπλοκότητες που συνοδεύουν την προσπάθεια βελτιστοποίησης και ελέγχου της QoE, οι οποίες απαιτούν πολυεπίπεδη προσέγγιση, λεπτομερή ανάλυση των δεδομένων και εξειδικευμένες στρατηγικές.

## Κεφάλαιο 4. Υπηρεσίες Ροής Πολυμέσων μέσω Διαδικτύου

Η αύξηση της κίνησης βίντεο στο Διαδίκτυο καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση διαφόρων παραγόντων για την καλύτερη παράδοση των βίντεο στους τελικούς χρήστες. Αυτό πρέπει να γίνει με τρόπο που να βελτιστοποιεί την ποιότητα της εμπειρίας τους (QoE). Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζεται μια ανάλυση των λύσεων προσαρμοστικής ροής βίντεο μέσω HTTP, οι οποίες είναι η κύρια μέθοδος για τη ροή βίντεο στο Διαδίκτυο. Εξετάζονται δύο βασικά σημεία: η βελτιστοποίηση από την πλευρά του διακομιστή (server) και από την πλευρά του πελάτη (client), που αφορούν τόσο το σύστημα **DASH** (Δυναμική Προσαρμοστική Ροή μέσω HTTP) όσο και το **SAND** (DASH με Υποστήριξη από Διακομιστή και Δίκτυο). Το DASH επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της ποιότητας του βίντεο ανάλογα με την ταχύτητα και τις συνθήκες του δικτύου του χρήστη, ενώ το SAND βελτιώνει αυτή τη διαδικασία με τη βοήθεια του δικτύου και των διακομιστών (Network Encyclopedia)

Επιπλέον, συζητούνται και άλλα ζητήματα που αφορούν την αλυσίδα παράδοσης πολυμέσων, η οποία περιλαμβάνει διάφορους φορείς, όπως οι οργανισμοί που προσφέρουν υπηρεσίες πολυμέσων (OTTP), οι πάροχοι υπηρεσιών Διαδικτύου (ISPs), τα δίκτυα παράδοσης περιεχομένου (CDNs), οι πάροχοι διαμετακόμισης και οι κόμβοι ανταλλαγής δεδομένων στο Διαδίκτυο (IXPs). Αυτοί οι φορείς συνεργάζονται για τη διανομή του βίντεο και τη διαχείριση των υπηρεσιών με στόχο την παροχή της καλύτερης δυνατής ποιότητας στους χρήστες.

### 4.1 Λύσεις Προσαρμοστικής Ροής μέσω HTTP (HAS)

Το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης βίντεο στο Διαδίκτυο σήμερα βασίζεται στην τεχνολογία HTTP Adaptive Streaming (HAS), η οποία επιτρέπει την προσαρμοστική ροή περιεχομένου βίντεο ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας είναι η αξιόπιστη μετάδοση. Το HAS χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο TCP (Transmission Control Protocol, Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης), το οποίο εξασφαλίζει ότι τα δεδομένα φτάνουν στους χρήστες χωρίς απώλειες. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη ροή βίντεο, καθώς αποτρέπει διακοπές και μειώνει την πιθανότητα κακής ποιότητας αναπαραγωγής λόγω σφαλμάτων μετάδοσης. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του HAS είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της υποδομής προσωρινής αποθήκευσης (cache). Οι ενδιάμεσοι διακομιστές που αποθηκεύουν προσωρινά τα δεδομένα βίντεο μπορούν να



επαναχρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της ροής. Με αυτόν τον τρόπο, αν πολλοί χρήστες ζητούν το ίδιο βίντεο, δεν χρειάζεται να φορτώνεται από την αρχή κάθε φορά από τον κεντρικό διακομιστή, αλλά μπορεί να ανακτηθεί από την προσωρινή αποθήκευση, μειώνοντας την καθυστέρηση και το φορτίο στους διακομιστές (Stockhammer, 2011). Επιπλέον, το HAS προσφέρει τη δυνατότητα παράκαμψης των firewalls, διευκολύνοντας την παροχή περιεχομένου βίντεο ακόμα και σε δίκτυα με αυστηρούς περιορισμούς. Καθώς το HAS χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο HTTP, το οποίο είναι αποδεκτό από τα περισσότερα firewalls, τα βίντεο μπορούν να μεταδοθούν πιο εύκολα και χωρίς προβλήματα πρόσβασης, βελτιώνοντας έτσι την εμπειρία του χρήστη. Αυτά τα πλεονεκτήματα έχουν οδηγήσει στην ευρεία υιοθέτηση του HAS από μεγάλες εταιρείες όπως η Microsoft, η Adobe, το Netflix και η Apple για την παροχή υπηρεσιών ροής πολυμέσων. Το HAS έχει γίνει το de-facto πρότυπο για τις υπηρεσίες ροής βίντεο σε πλατφόρμες όπως το Netflix και το YouTube, που στηρίζονται σε αυτή την τεχνολογία για να παρέχουν ποιοτικό περιεχόμενο στους χρήστες τους, προσαρμόζοντας δυναμικά την ποιότητα της ροής ανάλογα με το διαθέσιμο εύρος ζώνης και άλλες συνθήκες του δικτύου (Stockhammer, 2011).

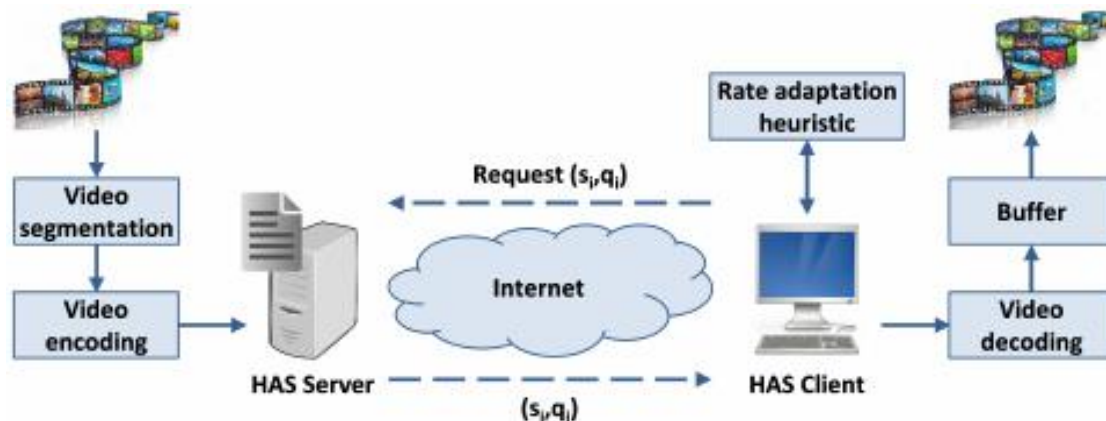
Παρά τη βασική ομοιότητα στη λογική λειτουργίας, υπάρχουν ορισμένες διαφορές στις εφαρμογές του HAS από εταιρεία σε εταιρεία. Για παράδειγμα, τα αρχεία manifest, τα οποία περιέχουν πληροφορίες για το βίντεο όπως το μέγεθος των τμημάτων και τα επίπεδα αναπαράστασης, μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον πάροχο. Αυτές οι μικρές διαφορές δεν αλλάζουν την κύρια αρχή της προσαρμοστικής ροής, αλλά προσαρμόζονται στις ανάγκες και τις δυνατότητες της κάθε πλατφόρμας. Οι λύσεις HTTP Adaptive Streaming (HAS) χρησιμοποιούν αξιόπιστους μηχανισμούς παράδοσης, όπως το πρωτόκολλο TCP, το οποίο εγγυάται ότι τα δεδομένα θα φτάσουν στους χρήστες χωρίς απώλειες. Πρόσφατα, έχει εισαχθεί και το QUIC (Quick UDP Internet Connections), το οποίο αποτελεί μια πιο γρήγορη εναλλακτική του TCP και προσφέρει βελτιωμένη απόδοση σε συνθήκες αστάθειας δικτύου, όπως οι διακοπές και η απώλεια πακέτων. Ωστόσο, λόγω των διαφοροποιήσεων και των ιδιαιτεροτήτων των διαφορετικών λύσεων HAS που χρησιμοποιούν διάφορες πλατφόρμες (π.χ. Netflix, YouTube) καθώς και των διαφόρων φορμά πολυμέσων, δημιουργήθηκε η ανάγκη για την ανάπτυξη ενός πιο ενιαίου προτύπου. Αυτό οδήγησε το 3GPP (οργανισμός τηλεπικοινωνιακών προτύπων) σε συνεργασία με το MPEG (Moving Picture Experts Group) να αναπτύξουν το πρότυπο DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP).



Το DASH είναι σχεδιασμένο για να παρέχει ένα σταθερό και αξιόπιστο πλαίσιο για προσαρμοστική ροή βίντεο μέσω HTTP (Stockhammer, 2011). Στο DASH, ο πελάτης (client) έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει δυναμικά την ποιότητα του βίντεο με βάση την κατάσταση του δικτύου. Για παράδειγμα, όταν το δίκτυο έχει υψηλή ταχύτητα και σταθερότητα, ο πελάτης μπορεί να επιλέξει μια έκδοση του βίντεο με υψηλότερο bitrate και καλύτερη ποιότητα. Αντίθετα, σε συνθήκες χαμηλότερου εύρους ζώνης, ο πελάτης θα προσαρμόσει την ποιότητα προς τα κάτω, αποφεύγοντας διακοπές και εξασφαλίζοντας μια ομαλή εμπειρία ροής για τον τελικό χρήστη. Το βίντεο στο DASH κωδικοποιείται σε διαφορετικά επίπεδα αναπαράστασης, τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορες αναλύσεις, ρυθμούς δεδομένων (bitrate), ή/και ποιότητες εικόνας. Αυτά τα επίπεδα αναπαράστασης χωρίζονται σε τμήματα ίσης διάρκειας (segments), που αποθηκεύονται στον διακομιστή και είναι διαθέσιμα για τον πελάτη (Sodagar, 2011). Όταν ο πελάτης κάνει την πρώτη του αίτηση για το βίντεο, ο διακομιστής στέλνει ένα αρχείο manifest. Το manifest περιέχει όλες τις σημαντικές πληροφορίες για το βίντεο, όπως τη διάρκεια, το μέγεθος των τμημάτων, τα διάφορα επίπεδα αναπαράστασης, καθώς και τον τύπο κωδικοποίησης που χρησιμοποιείται. Βάσει αυτών των πληροφοριών, ο πελάτης μπορεί να αξιολογήσει την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου και να αιτηθεί το επόμενο τμήμα του βίντεο με το πιο κατάλληλο bitrate. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει ότι ο χρήστης λαμβάνει το καλύτερο δυνατό βίντεο, ανάλογα με την απόδοση του δικτύου, χωρίς διακοπές ή χαμηλή ποιότητα.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα του HTTP Adaptive Streaming (HAS), υπάρχουν ορισμένα ζητήματα που επηρεάζουν αρνητικά την εμπειρία του τελικού χρήστη και τη συνολική απόδοση του δικτύου. Ένα από τα βασικά προβλήματα είναι η αστάθεια του βίντεο που προκύπτει από τις συχνές αλλαγές στο bitrate. Αυτό συμβαίνει όταν οι συνθήκες του δικτύου αλλάζουν γρήγορα, προκαλώντας διαρκείς αλλαγές στην ποιότητα του βίντεο. Το αποτέλεσμα μπορεί να είναι η απότομη εναλλαγή μεταξύ υψηλής και χαμηλής ποιότητας, κάτι που δημιουργεί μια μη ομαλή και απογοητευτική εμπειρία για τον θεατή (Sodagar, 2011). Ένα άλλο πρόβλημα είναι η υποχρησιμοποίηση των πόρων του δικτύου. Σε περιπτώσεις όπου πολλοί πελάτες χρησιμοποιούν ταυτόχρονα το ίδιο δίκτυο, ενδέχεται να μην αξιοποιούνται πλήρως οι διαθέσιμες πόροι του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι η απόδοση του δικτύου δεν βελτιστοποιείται στο έπακρο, με αποτέλεσμα να μην εξυπηρετείται η μέγιστη δυνατή ποιότητα βίντεο για όλους τους χρήστες.

Τέλος, υπάρχει το ζήτημα της αδικίας ως προς την QoE, δηλαδή της ποιότητας εμπειρίας των πελατών. Σε περιβάλλοντα με πολλούς χρήστες που ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους του δικτύου, κάποιοι χρήστες ενδέχεται να λαμβάνουν πολύ καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας από άλλους, ακόμα κι αν οι ανάγκες τους είναι παρόμοιες. Αυτό δημιουργεί μια ανισότητα στην εμπειρία των χρηστών, όπου μερικοί μπορεί να απολαμβάνουν υψηλή ποιότητα βίντεο, ενώ άλλοι αντιμετωπίζουν χαμηλότερη ποιότητα ή διακοπές στην αναπαραγωγή (Stockhammer, 2011). Αυτά τα προβλήματα επιδεινώνονται σε ετερογενή περιβάλλοντα, όπου οι χρήστες μπορεί να συνδέονται μέσω διαφορετικών τύπων δικτύου, όπως κινητά δίκτυα ή Wi-Fi, με διαφορετικές ταχύτητες και ποιότητες σύνδεσης. Η διαχείριση αυτών των προκλήσεων απαιτεί περαιτέρω βελτιώσεις στα πρότυπα ροής βίντεο και στη συνεργασία μεταξύ των παρόχων υπηρεσιών δικτύου και των εφαρμογών.



Εικόνα 2. Αρχιτεκτονική Προσαρμοστικής Ροής Βίντεο μέσω HTTP (HAS)

Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-HTTP-Adaptive-Streaming-HAS-was-introduced-As-shown-in-Figure-1-video\\_fig1\\_283073448](https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-HTTP-Adaptive-Streaming-HAS-was-introduced-As-shown-in-Figure-1-video_fig1_283073448)

Η εικόνα 2 παρουσιάζει τη διαδικασία της ροής βίντεο μέσω HTTP Adaptive Streaming (HAS). Δείχνει τον κύκλο της προσαρμοστικής ροής, από την πλευρά του διακομιστή (HAS server) έως τον πελάτη (HAS client). Οι κύριες διαδικασίες περιλαμβάνουν:

- Διαμερισμό και κωδικοποίηση βίντεο (video segmentation και encoding) στον διακομιστή.
- Την αποστολή αιτημάτων από τον πελάτη για συγκεκριμένα τμήματα του βίντεο με προσαρμογή ποιότητας (rate adaptation heuristic).
- Την αποθήκευση του βίντεο σε buffer και την αποκωδικοποίηση του για αναπαραγωγή από τον πελάτη.

## 4.2 DASH με Υποστήριξη από Διακομιστή και Δίκτυο (SAND)

Η DASH με Υποστήριξη από Διακομιστή και Δίκτυο (SAND) αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη του προτύπου MPEG-DASH, που στοχεύει στη βελτίωση της παράδοσης περιεχομένου DASH. Η βασική αρχή πίσω από το SAND είναι η εισαγωγή ενός μηχανισμού ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του δικτύου και των πελατών που κάνουν streaming μέσω DASH. Η προδιαγραφή SAND περιλαμβάνει τη χρήση μηνυμάτων που μεταφέρονται ανάμεσα στους πελάτες DASH και σε συγκεκριμένα στοιχεία του δικτύου, όπως διακομιστές, proxies, caches, καθώς και μεταξύ των στοιχείων δικτύου που συνεργάζονται για τη βελτίωση της ροής. Αυτά τα μηνύματα περιέχουν πληροφορίες που βοηθούν στη βελτιστοποίηση της μετάδοσης βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, μπορεί να παρέχουν δεδομένα σχετικά με την απόδοση του δικτύου, τη διαθεσιμότητα πόρων, και την απόδοση του ίδιου του πελάτη DASH (Stockhammer, 2011). Με τη βοήθεια των SAND μηνυμάτων, το δίκτυο και οι διακομιστές μπορούν να αντιλαμβάνονται καλύτερα την κατάσταση της σύνδεσης του χρήστη ή την κατάσταση των caches, και να προσαρμόζουν την παράδοση περιεχομένου κατάλληλα. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι η ροή περιεχομένου είναι πιο σταθερή και προσαρμοσμένη στις συνθήκες του εκάστοτε χρήστη, βελτιώνοντας την εμπειρία χρήστη (QoE) και αξιοποιώντας καλύτερα τους διαθέσιμους πόρους του δικτύου (Thomas & Stockhammer, 2016).

Η αρχιτεκτονική SAND έχει σχεδιαστεί για να βελτιστοποιεί τη μετάδοση πολυμέσων μέσω του προτύπου DASH, εισάγοντας τρεις κατηγορίες στοιχείων. Πρώτα, υπάρχουν οι πελάτες DASH, οι οποίοι είναι οι τελικοί χρήστες ή οι συσκευές που καταναλώνουν το περιεχόμενο βίντεο μέσω ροής. Οι πελάτες DASH μπορούν να προσαρμόζουν την ποιότητα του βίντεο που ζητούν, με βάση τις πληροφορίες που λαμβάνουν σχετικά με την κατάσταση του δικτύου, όπως η διαθέσιμη χωρητικότητα και η καθυστέρηση στη μετάδοση. Στη συνέχεια, τα Στοιχεία Δικτύου Ενήμερα για το DASH (DANE) είναι κόμβοι που έχουν κάποια "νοημοσύνη" σχετικά με τη λειτουργία του DASH. Αυτοί οι κόμβοι γνωρίζουν τα χαρακτηριστικά των αντικειμένων DASH, όπως τα τμήματα βίντεο και τα αρχεία manifest, και μπορούν να αλληλεπιδρούν με τους πελάτες DASH μέσω ειδικών μηνυμάτων. Οι κόμβοι DANE μπορούν να στείλουν πληροφορίες στους πελάτες, όπως τη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου ή τα ήδη αποθηκευμένα τμήματα βίντεο, ώστε οι πελάτες να προσαρμόζουν την ποιότητα του βίντεο που ζητούν. Έτσι,

διασφαλίζεται μια καλύτερη εμπειρία για τον χρήστη, με λιγότερες διακοπές και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου (Stockhammer, 2011).

Τέλος, υπάρχουν τα κανονικά στοιχεία δικτύου που δεν γνωρίζουν το DASH. Αυτά τα στοιχεία βρίσκονται στη διαδρομή μεταξύ του διακομιστή και του πελάτη, αλλά δεν έχουν γνώση για τα αντικείμενα DASH. Παρόλο που δεν μπορούν να αλληλεπιδρούν άμεσα με τους πελάτες DASH, εξακολουθούν να υποστηρίζουν τη συνολική παράδοση του περιεχομένου, συμβάλλοντας στην ομαλή μετάδοση των δεδομένων (Thomas & Stockhammer, 2016). Οι κόμβοι DANE, με τη χρήση μιας σειράς μηνυμάτων, ανταλλάσσουν πληροφορίες με τους πελάτες DASH, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της ροής του βίντεο. Για παράδειγμα, οι κόμβοι DANE μπορούν να ενημερώσουν τους πελάτες σχετικά με τη διαθέσιμη χωρητικότητα του δικτύου, επιτρέποντάς τους να προσαρμόσουν ανάλογα το bitrate του βίντεο που ζητούν. Αυτή η διαδικασία βελτιώνει την εμπειρία του χρήστη, μειώνοντας τις διακοπές και μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα της χρήσης των πόρων του δικτύου.

### **4.3 Αλυσίδα Παράδοσης Πολυμέσων-Θέματα Διαχείρισης Υπηρεσιών**

Η αλυσίδα παράδοσης υπηρεσιών πολυμέσων αποτελείται από πολλούς φορείς, καθένας από τους οποίους παίζει σημαντικό ρόλο στην παράδοση του περιεχομένου στους τελικούς χρήστες. Οι βασικοί φορείς περιλαμβάνουν τους Οργανισμούς Παροχής Υπηρεσιών Πολυμέσων (OTTP), όπως το Netflix και το YouTube, τους Παρόχους Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISPs), τα Δίκτυα Παράδοσης Περιεχομένου (CDNs), τους Παρόχους Διαμετακόμισης και τους Κόμβους Ανταλλαγής Διαδικτύου (IXPs) (Stock & Watson, 2018). Κάθε φορέας στην αλυσίδα έχει διαφορετικό ρόλο, ανάλογα με τις εμπορικές συμφωνίες και τις τεχνολογικές δυνατότητες που προσφέρει. Οι OTTP είναι υπεύθυνοι για τη δημιουργία και την αρχική παράδοση του περιεχομένου βίντεο, ενώ οι ISPs διαχειρίζονται τα δίκτυα που χρησιμοποιούν οι τελικοί χρήστες για να συνδεθούν στο διαδίκτυο. Τα CDNs χρησιμοποιούνται για τη διανομή του περιεχομένου πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την ποιότητα της υπηρεσίας (Stock & Watson, 2018). Υπάρχουν συνεργασίες μεταξύ των OTTP και των ISPs, οι οποίες βασίζονται σε συμφωνίες διασύνδεσης. Μέσω αυτών των συμφωνιών, οι ISPs μπορεί να φιλοξενούν διακομιστές των OTTP στα δίκτυά τους, μειώνοντας την απόσταση που πρέπει να διανύσουν τα δεδομένα και βελτιώνοντας την ταχύτητα και την ποιότητα της ροής βίντεο. Παραδείγματα αυτών των συνεργασιών

περιλαμβάνουν το Google Global Cache (GGC) και το Netflix Open Connect, προγράμματα που επιτρέπουν την άμεση διασύνδεση των διακομιστών OTTP με τους ISPs για τη βελτιστοποίηση της παράδοσης περιεχομένου.

#### **4.3.1 Ενορχήστρωση και Διαχείριση NFV (NFV Management and Orchestration, NFV-MANO)**

Το NFV είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στους παρόχους δικτύων να αντικαθιστούν φυσικό εξοπλισμό με λογισμικές λύσεις που εκτελούνται σε εικονικά περιβάλλοντα. Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων ETSI (European Telecommunications Standards Institute) ήταν ο πρώτος οργανισμός που διερεύνησε αυτή την τεχνολογία, προσπαθώντας να κάνει τις υπηρεσίες πιο ευέλικτες και εύκολα διαχειρίσιμες. Ο ETSI πρότεινε την αρχιτεκτονική του NFV, η οποία στη συνέχεια εφαρμόστηκε μέσω δοκιμών Proof of Concept (PoC). Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει διάφορα βασικά στοιχεία, που συνεργάζονται για την ευέλικτη και αποδοτική διαχείριση των δικτυακών λειτουργιών (De Leenheer & Papadimitriou, 2017).

Η Υποδομή NFV (NFVI) αποτελείται από φυσικούς και εικονικούς πόρους, όπως υπολογιστικά συστήματα, αποθηκευτικούς πόρους και δικτυακούς πόρους. Οι φυσικοί πόροι περιλαμβάνουν το υλικό υποδομής, ενώ οι εικονικοί πόροι είναι οι εικονικές αναπαραστάσεις αυτών των πόρων μέσω ενός στρώματος εικονικοποίησης. Ο Ορχηστρωτής NFV (NFVO) έχει την ευθύνη της ορχήστρωσης και της διαχείρισης του κύκλου ζωής των φυσικών και εικονικών πόρων στο δίκτυο. Αυτό περιλαμβάνει τη διαχείριση των πόρων, την ανάπτυξη και διαμόρφωση των υπηρεσιών, καθώς και την παρακολούθηση της απόδοσής τους. Το Σύστημα Διαχείρισης Δικτύου (NMS) παίζει σημαντικό ρόλο στη συνολική διαχείριση του δικτύου, διασφαλίζοντας ότι λειτουργίες όπως η διαχείριση σφαλμάτων, η ασφάλεια και η απόδοση εκτελούνται σωστά. Αυτό βοηθά στη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών που λαμβάνουν οι τελικοί χρήστες. Τέλος, οι Εικονικές Δικτυακές Λειτουργίες (VNFs, Virtualized Network Function, Εικονικοποιημένη Δικτυακή Λειτουργία) είναι οι λειτουργίες του δικτύου που μετατρέπονται σε λογισμικό και εκτελούνται σε εικονικά περιβάλλοντα. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την εξάρτηση από ειδικό υλικό, επιτρέποντας μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα στις υπηρεσίες δικτύου. Συνολικά, όλα αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται για την παροχή αποδοτικών και οικονομικά βιώσιμων υπηρεσιών

δικτύου, βελτιώνοντας την ευελιξία και μειώνοντας τα κόστη (De Leenheer & Papadimitriou, 2017).

Η Υποδομή NFV (NFVI) είναι το περιβάλλον που περιλαμβάνει τόσο φυσικούς όσο και εικονικούς πόρους. Οι φυσικοί πόροι περιλαμβάνουν υπολογιστικά συστήματα, αποθηκευτικούς χώρους και δικτυακούς πόρους. Από την άλλη, οι εικονικοί πόροι είναι οι ψηφιακές εκδοχές αυτών των φυσικών πόρων, οι οποίες δημιουργούνται μέσω εικονικοποίησης. Η εικονικοποίηση πραγματοποιείται συνήθως με τη χρήση hypervisor, μια τεχνολογία που επιτρέπει τη διαίρεση των φυσικών πόρων σε εικονικούς, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποδοτικότερα για την ανάπτυξη VNFs.

Το Σύστημα Διαχείρισης Δικτύου (NMS) παίζει κεντρικό ρόλο στη διαχείριση τόσο των VNFs όσο και των φυσικών πόρων. Το NMS αναλαμβάνει την παρακολούθηση και τη διαχείριση διαφόρων λειτουργιών δικτύου, όπως η διαχείριση σφαλμάτων, η ασφάλεια, η διαμόρφωση και η απόδοση. Η διαχείριση σφαλμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς εντοπίζει και επιλύει τα προβλήματα πριν αυτά επηρεάσουν τους τελικούς χρήστες, εξασφαλίζοντας έτσι υψηλή ποιότητα εμπειρίας (QoE) για τους χρήστες (Pentikousis, Wang, & Hu, 2020). Ο Ορχηστρωτής NFV (NFVO) είναι υπεύθυνος για την ορχήστρωση και τη συνολική διαχείριση του κύκλου ζωής τόσο των φυσικών όσο και των εικονικών πόρων της υποδομής. Αυτό περιλαμβάνει την κατανομή των διαθέσιμων πόρων, την ενεργοποίηση νέων δικτυακών υπηρεσιών, και την επικύρωση αιτημάτων για τη χρήση πόρων NFVI. Ο NFVO εξασφαλίζει ότι οι πόροι χρησιμοποιούνται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για να υποστηρίξουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Ο Διαχειριστής Εικονικών Δικτυακών Λειτουργιών (VNFM, Virtualized Network Function Manager) έχει την ευθύνη για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των VNFs. Αυτό σημαίνει ότι διαχειρίζεται την εγκατάσταση, τη διαμόρφωση και τη συντήρηση των VNFs, καθώς και τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ της υποδομής NFVI και των VNFs. Ο VNFM μπορεί να διαχειρίζεται πολλές VNFs ταυτόχρονα, είτε του ίδιου τύπου είτε διαφορετικών, και να διασφαλίζει ότι λειτουργούν αποδοτικά (Pentikousis, Wang, & Hu, 2020).

Η Μονάδα Εικονικής Διαχείρισης (VIM) είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο και τη διαχείριση των φυσικών και εικονικών πόρων NFVI, όπως τους πόρους υπολογισμού (vCompute), αποθήκευσης (vStorage) και δικτύου (vNetwork), εντός του τομέα της υποδομής ενός παρόχου. Αυτή η μονάδα εξασφαλίζει την αποδοτική χρήση όλων των πόρων και την ισορροπημένη κατανομή τους. Το πλαίσιο NFV MANO (Management



and Orchestration, Διαχείριση και Ορχήστρωση) διαθέτει μια κεντρική βάση δεδομένων που αποθηκεύει πληροφορίες για τους διαθέσιμους VNFs, τις ενεργές VNFs, τους πόρους NFVI και τις δικτυακές υπηρεσίες. Αυτή η βάση δεδομένων λειτουργεί ως αποθετήριο, παρέχοντας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την οργάνωση και τη σωστή διαχείριση της υποδομής NFV.

#### **4.3.2 Περιπτώσεις Χρήσης και Υλοποιήσεις της Τεχνολογίας NFV**

Καθώς η τεχνολογία NFV έγινε πιο σημαντική, σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν πολλές περιπτώσεις χρήσης και σενάρια εφαρμογής τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από τη βιομηχανία. Οι περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις χρήσης βασίζονται στις οδηγίες που ορίστηκαν από τον ETSI. Στην ακαδημαϊκή κοινότητα, μερικές από τις περιπτώσεις χρήσης περιλαμβάνουν την δρομολόγηση πολλαπλών διαδρομών με βάση την QoE, την υλοποίηση εικονικών λειτουργιών για ευρυζωνικούς απομακρυσμένους διακομιστές πρόσβασης (broadband remote access server), καθώς και την βαθιά επιθεώρηση πακέτων (deep packet inspection). Επιπλέον, έχουν εφαρμοστεί λύσεις για το δίκτυο ραδιοπρόσβασης (RAN), τον εξοπλισμό πελατειακών εγκαταστάσεων (CPE), το εξελιγμένο πακέτο πυρήνα (EPC), καθώς και την παρακολούθηση QoE μέσω εικονικοποιημένων ανιχνευτών (Medhat, Taleb, Elmangoush, Carella, Covaci & Magedanz, 2017). Από την πλευρά της βιομηχανίας, υπάρχουν σημαντικές υλοποιήσεις και προϊόντα NFV που περιλαμβάνουν το CloudNFV, το Huawei NFV Open Lab, το HP OpenNFV, την Intel Open Network Platform (Intel ONP), τη Cisco Open Network Strategy, την Alcatel-Lucent CloudBand, το Broadcom Open NFV και τις F5 Software Defined Application Services (F5 DAS). Αξιοσημείωτο είναι ότι όλες οι υφιστάμενες υλοποιήσεις και πλατφόρμες NFV επικεντρώνονται σε λύσεις ανοιχτού κώδικα και στην ορχήστρωση των υπηρεσιών των παρόχων μέσω της υποδομής NFVI, υποστηριζόμενες από τεχνολογίες SDN και cloud (Medhat et al. 2017).

#### **4.3.3 Δραστηριότητες Τυποποίησης του NFV**

Οι τρέχουσες δραστηριότητες τυποποίησης του NFV (Virtualization Network Functions) περιλαμβάνουν πολλές οργανώσεις και ομάδες που εργάζονται για την ανάπτυξη και βελτίωση των προτύπων που σχετίζονται με αυτήν την τεχνολογία. Η Ομάδα Έρευνας για το NFV (NFVRG) της Ομάδας Εργασίας για την Έρευνα στο Διαδίκτυο (IRTF) είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη νέων αρχιτεκτονικών που βασίζονται στην εικονικοποίηση και που υποστηρίζουν τις Εικονικές Λειτουργίες

Δικτύου (NFs). Αυτή η ομάδα εστιάζει στο σχεδιασμό και την προώθηση νέων λύσεων που μπορούν να υποστηρίξουν τις λειτουργίες δικτύου μέσω εικονικοποίησης (Hawilo, Jammal, Shami & Asal, 2019).

Η Ομάδα Εργασίας του IETF για την Αλυσίδα Υπηρεσιών Δικτύου (IETF SFC WG) επικεντρώνεται στην ανάπτυξη των δομικών στοιχείων της αρχιτεκτονικής SFC (Service Function Chaining). Εργάζεται για τη δημιουργία μηχανισμών που επιτρέπουν την αυτόματη προδιαγραφή και υλοποίηση των εικονικών λειτουργιών δικτύου (NFV) και τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας δεδομένων μέσω διαφόρων λειτουργιών υπηρεσίας. Η Ομάδα Τυποποίησης της Βιομηχανίας για το NFV του ETSI (ETSI NFV ISG) παρέχει έναν πλήρη οδηγό για τις απαιτήσεις του NFV, περιλαμβάνοντας περιπτώσεις χρήσης, αρχιτεκτονικά πλαίσια, διεπαφές και αφαιρέσεις για το NFV Infrastructure (NFVI), καθώς και ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια του NFV, τις επιδόσεις και την ανθεκτικότητα. Αυτή η ομάδα δημιουργεί τα πρότυπα και τις κατευθυντήριες γραμμές που χρειάζονται για την υλοποίηση και την αποτελεσματική λειτουργία του NFV στα δίκτυα (Hawilo et al. 2019).

Συνολικά, αυτές οι δραστηριότητες στοχεύουν στη διασφάλιση ότι οι τεχνολογίες NFV εξελίσσονται με έναν συντονισμένο και αποτελεσματικό τρόπο, παρέχοντας τα κατάλληλα πρότυπα και εργαλεία για την υλοποίηση και βελτίωση των εικονικών λειτουργιών δικτύου. Το ATIS NFV Forum εστιάζει στην αναγνώριση, τον καθορισμό και την προτεραιοποίηση περιπτώσεων χρήσης του NFV για τη συνεργασία μεταξύ παρόχων υπηρεσιών. Ο στόχος είναι να αναδειχθούν οι περιοχές όπου οι δυνατότητες του NFV μπορούν να δημιουργήσουν νέα αξία για τους παρόχους και τους χρήστες. Σε συνεργασία με το ETSI, το Broadband Forum έχει αναλάβει την εισαγωγή του NFV στο Δίκτυο Πολλαπλών Υπηρεσιών Ευρυζωνικότητας (MSBN).

Στο πλαίσιο αυτό, έχει δημιουργηθεί μια εικονικοποιημένη πλατφόρμα που υποστηρίζει εικονικές πύλες επιχειρηματικών υπηρεσιών και ευέλικτες αλυσίδες υπηρεσιών. Αυτή η πλατφόρμα διευκολύνει την ανάπτυξη και την παροχή πολυάριθμων υπηρεσιών δικτύου με μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα (Hawilo et al. 2019). Επιπλέον, άλλοι οργανισμοί, όπως το Open Virtualization Format (OVF) και η ITU-T SG13, εργάζονται για τον καθορισμό των λειτουργικών απαιτήσεων και της αρχιτεκτονικής της δικτυακής εικονικοποίησης για τα Δίκτυα Νέας Γενιάς (NGN). Ειδικότερα, αναπτύσσουν πρότυπα που αφορούν τη φορητότητα και την ανάπτυξη εικονικών και



φυσικών μηχανών σε διάφορες πλατφόρμες, επιδιώκοντας τη διαλειτουργικότητα και την ευελιξία στην υλοποίηση αυτών των τεχνολογιών.

Παράλληλα με αυτές τις δραστηριότητες, διάφορα συνεργατικά έργα προωθούν τις υλοποιήσεις NFV. Αυτά περιλαμβάνουν την Open Platform for NFV (OPNFV), το Zero-time Orchestration, Operations and Management (ZOOM), το OpenMANO, και το Unifying Compute and Network Virtualization (UNIFY). Αυτά τα έργα επικεντρώνονται στην ανάπτυξη και την προώθηση ανοιχτών πλατφορμών και εργαλείων για την υποστήριξη των NFV, διευκολύνοντας την υλοποίηση και την ενσωμάτωσή τους σε υπάρχοντα δίκτυα (Hawilo et al. 2019).

Συνολικά οι δραστηριότητες τυποποίησης έχουν επικεντρωθεί στο πώς οι δικτυακές υπηρεσίες και οι σχετικοί πόροι που υλοποιούνται με βάση την αρχιτεκτονική SDN μπορούν να ενσωματωθούν στο πλαίσιο αρχιτεκτονικής του NFV. Αξιοσημείωτο είναι ότι τόσο το SDN όσο και το NFV επιδιώκουν τη δημιουργία μιας μελλοντικής λύσης δικτύωσης βασισμένης σε λογισμικό που προσφέρει ευέλικτη και αυτοματοποιημένη δικτυακή σύνδεση και παροχή ποιότητας εμπειρίας (QoE) προς τους τελικούς χρήστες (Hawilo et al. 2019). Για παράδειγμα, ενώ το SDN αποσυνδέει το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο προώθησης δεδομένων/πακέτων, το NFV αποσυνδέει τις δικτυακές λειτουργίες (NFs) από τις εξειδικευμένες συσκευές υλικού. Παρά το γεγονός ότι το SDN και το NFV έχουν πολλές ομοιότητες, η κύρια διαφορά τους είναι ότι το SDN απαιτεί μια νέα δικτυακή πλατφόρμα όπου τα επίπεδα ελέγχου και προώθησης δεδομένων είναι αποσυνδεδεμένα. Αντίθετα, το NFV μπορεί να λειτουργεί σε υπάρχοντα δίκτυα (legacy networks), καθώς οι δικτυακές λειτουργίες μπορούν να εγκατασταθούν σε συμβατικούς διακομιστές.

## Κεφάλαιο 5. Διαχείριση Ποιότητας Εμπειρίας (QoE)

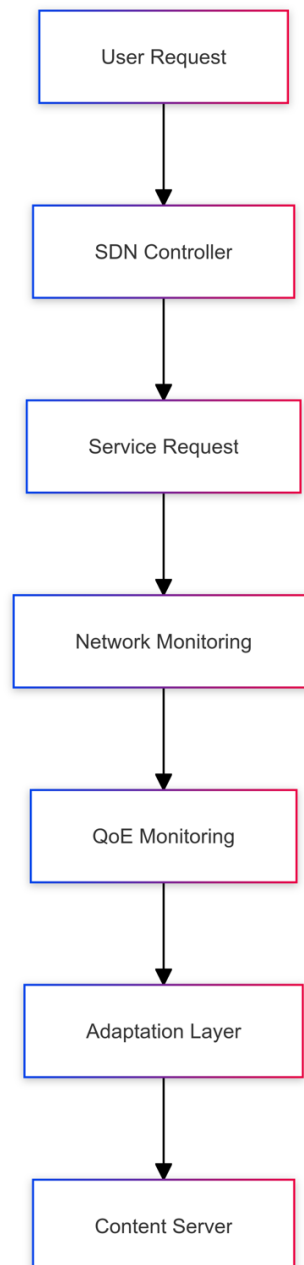
### Χρησιμοποιώντας SDN και NFV

Από την καθιέρωση του προτύπου MPEG-DASH, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες από την ακαδημαϊκή κοινότητα και τη βιομηχανία για τη βελτίωση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) των τελικών χρηστών. Το MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) είναι ένα πρότυπο για τη ροή βίντεο μέσω διαδικτύου, που προσαρμόζει την ποιότητα του βίντεο δυναμικά, ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου και την ικανότητα του τερματικού (Seufert, Egger, Slanina, Zinner, Hobfeld & Tran-Gia, 2013). Αρκετές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη βελτίωση της QoE μέσω της βελτιστοποίησης των αλγορίθμων που προσαρμόζουν την ποιότητα του βίντεο, είτε από την πλευρά του πελάτη (δηλαδή της συσκευής που παρακολουθεί το βίντεο) είτε από την πλευρά του διακομιστή (δηλαδή της πηγή του βίντεο). Στόχος αυτών των προσπαθειών είναι η καλύτερη προσαρμογή της ποιότητας του βίντεο στις συνθήκες δικτύου και στις απαιτήσεις του χρήστη, με σκοπό την ενίσχυση της συνολικής εμπειρίας παρακολούθησης.

Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει στραφεί στη δημιουργία προσεγγίσεων που βελτιστοποιούν πλήρως την ποιότητα του βίντεο και μεγιστοποιούν την QoE, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα δίκαιη κατανομή των πόρων μεταξύ των χρηστών. Αυτές οι νέες προσεγγίσεις προσπαθούν να επιτύχουν μια καλύτερη εμπειρία παρακολούθησης για όλους τους χρήστες, ανεξάρτητα από την ποιότητα της σύνδεσής τους ή άλλους παράγοντες (Clayman, Toffetti, Galis, Chapman & Sköldström, 2014). Επιπλέον, πολλές λύσεις βασισμένες σε SDN και NFV έχουν προταθεί, υλοποιηθεί και δοκιμαστεί πρόσφατα για να εκτιμηθούν τα οφέλη αυτών των τεχνολογιών για τη βελτίωση της QoE.

Οι πιο πρόσφατες προσπάθειες περιλαμβάνουν τη δημιουργία ενός μεσολαβητή εύρους ζώνης που είναι ευαισθητοποιημένος για την QoE και μια εφαρμογή SDN-APP που καθοδηγείται από τον ρυθμό και είναι επίσης ευαισθητοποιημένη για την QoE. Αυτές οι λύσεις στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας της ροής βίντεο και στην προσφορά μιας καλύτερης εμπειρίας στους χρήστες, εκμεταλλευόμενες τις δυνατότητες των σύγχρονων τεχνολογιών δικτύου (Clayman et al. 2014) (Seufert et al. 2013). Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την ενότητα, εξετάζουμε διάφορους τομείς έρευνας που σχετίζονται με τη βελτίωση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) χρησιμοποιώντας τεχνολογίες SDN και NFV.

Το διάγραμμα 2 δείχνει πώς ένα αίτημα χρήστη για υπηρεσίες πολυμέσων ή περιεχόμενο περνά από διάφορα επίπεδα ελέγχου και παρακολούθησης, με κεντρικό στοιχείο το SDN controller. Ο ρόλος του είναι η παρακολούθηση του δικτύου και της QoE για να εξασφαλίσει ότι η εμπειρία του χρήστη είναι βέλτιστη, ενώ το επίπεδο προσαρμογής (adaptation layer) βελτιώνει τη μετάδοση περιεχομένου με βάση την παρακολούθηση της QoE.



**Διάγραμμα 2. Διάγραμμα Διαχείρισης Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) μέσω SDN**

## 5.1 Βελτιστοποίηση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) σε Ροές Βίντεο μέσω SDN: Προσεγγίσεις και Εφαρμογές

Το πρωτόκολλο SAND (Server and Network Assisted DASH) επιτρέπει την ανταλλαγή τυποποιημένων μηνυμάτων μεταξύ των πελατών DASH και των στοιχείων δικτύου, ώστε να βελτιωθεί η αποδοτικότητα της χρήσης του εύρους ζώνης. Αυτό βοηθά τους παρόχους υπηρεσιών να προσφέρουν μια καλύτερη εμπειρία ροής βίντεο στους τελικούς χρήστες και εξασφαλίζει δίκαιη κατανομή του εύρους ζώνης μεταξύ των χρηστών. Οι παραμέτρους που συλλέγονται τόσο από το δίκτυο όσο και από τους πελάτες βίντεο (όπως τύπος συσκευής, ανάλυση βίντεο και πληρότητα του buffer) συνδυάζονται σε έναν κεντρικό κόμβο ελέγχου που χρησιμοποιεί τεχνολογία SDN (Software Defined Networking). Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα έχει πλήρη εικόνα των διαθέσιμων πόρων και μπορεί να επιλέξει τον καλύτερο ρυθμό μετάδοσης βίντεο για κάθε χρήστη, βελτιώνοντας την ποιότητα εμπειρίας (QoE) (Begen, Akgul & Baugher, 2011).

Η λειτουργία αυτή περιλαμβάνει δύο κύκλους ελέγχου. Ο εσωτερικός βρόχος επιλέγει τον ρυθμό ροής βίντεο με βάση τις ανατροφοδοτήσεις των πελατών και τις εκτιμήσεις του εύρους ζώνης, ενώ ο εξωτερικός βρόχος, που εκτελείται στο δίκτυο, ρυθμίζει την κατανομή του εύρους ζώνης. Στη συνέχεια, ο βέλτιστος ρυθμός ροής επικοινωνείται στον πελάτη, ο οποίος κατεβάζει τα αντίστοιχα τμήματα του βίντεο. Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση, προτείνεται ένας μηχανισμός διασφάλισης ποιότητας υπηρεσίας (QoS) σε επίπεδο δικτύου για την εφαρμογή δίκαιης κατανομής πόρων, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα εμπειρίας (QoE) των ανταγωνιζόμενων χρηστών. Με τη χρήση ενός μοντέλου QoE που βασίζεται στο μέγεθος και την ανάλυση της οθόνης, ο ελεγκτής δικτύου επιλέγει τον κατάλληλο ρυθμό ροής βίντεο για κάθε πελάτη, μεγιστοποιώντας την QoE (Begen, Akgul & Baugher, 2011).

Ένας μηχανισμός Video Home Shaper αναπτύσσεται για να παρακολουθεί τις εξερχόμενες αιτήσεις HTTP και να καταγράφει εκείνες που σχετίζονται με συνεδρίες streaming από Netflix και YouTube, που ξεκινούν από συσκευές συνδεδεμένες στον δρομολογητή. Ο διαχειριστής συνεδριών υπολογίζει και καταγράφει το δίκαιο εύρος ζώνης QoE για όλες τις ενεργές συνεδρίες streaming. Στη συνέχεια, ο διαχειριστής εύρους ζώνης εξασφαλίζει την ελάχιστη εγγυημένη κατανομή εύρους ζώνης για κάθε ροή βίντεο και εφαρμόζει τις δίκαιες κατανομές που υπολογίζονται από τον διαχειριστή συνεδριών, διασφαλίζοντας μια ισορροπημένη εμπειρία χρήσης.

Το Adaptive Bitrate Streaming (SABR) που υποστηρίζεται από SDN είναι μια προσέγγιση που στοχεύει στη βελτιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) των πελατών κατά τη ροή βίντεο. Το SABR χρησιμοποιεί πληροφορίες όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης ανά σύνδεση και τα περιεχόμενα της cache του δικτύου για να καθοδηγήσει τις ρυθμίσεις που μεγιστοποιούν την QoE. Αυτές οι πληροφορίες μεταφέρονται στους πελάτες μέσω ενός REST API (Application Programming Interface, Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών), παρέχοντάς τους τις απαραίτητες εκτιμήσεις και δεδομένα για το εύρος ζώνης και την κατάσταση της cache. Με τη χρήση δυναμικής δρομολόγησης SDN, το SABR επιτρέπει στους πελάτες να συνδέονται με την κατάλληλη cache, η οποία έχει τα δεδομένα που χρειάζονται, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα της ροής βίντεο. Επιπλέον, η λύση αυτή μειώνει το φορτίο του διακομιστή, καθώς η χρήση της cache γίνεται πιο αποδοτική, ενώ αυξάνεται η συνολική αποδοτικότητα του δικτύου (Seufert, Burger & Tran-Gia, 2015).

Η προσέγγιση QoE-SDN APP, είναι μια λύση που βελτιώνει την εμπειρία χρήστη (QoE) κατά τη ροή βίντεο, λαμβάνοντας υπόψη τις κινήσεις των χρηστών και τις συνθήκες του δικτύου. Οι Πάροχοι Υπηρεσιών Βίντεο (VSPs) μπορούν να ενισχύσουν την QoE μέσω αυτής της μεθόδου, η οποία βασίζεται σε επιλογή τμημάτων βίντεο που προσαρμόζεται στις συνθήκες του δικτύου, αποδοτικούς ρυθμούς κωδικοποίησης και caching που μειώνει τις διακοπές.

Ο πυρήνας της λύσης είναι η μονάδα αξιολόγησης QoE, που αναλαμβάνει δύο βασικά καθήκοντα (Seufert et al. 2015):

1. Προτείνει στους VSPs τον καλύτερο ρυθμό κωδικοποίησης και στρατηγική caching με βάση το μελλοντικό φορτίο δικτύου και την κινητικότητα των χρηστών.
2. Αξιολογεί την QoE κάθε εφαρμογής χρησιμοποιώντας Δείκτες Απόδοσης (KPIs) όπως οι διακοπές κατά τη ροή.

Η λύση αυτή επιτρέπει στους VSPs να συνεργάζονται με τους Παρόχους Κινητών Δικτύων (MNOs) και να βελτιώνουν τη διανομή και κωδικοποίηση βίντεο, χρησιμοποιώντας πληροφορίες και ανατροφοδότηση από το δίκτυο των MNOs.

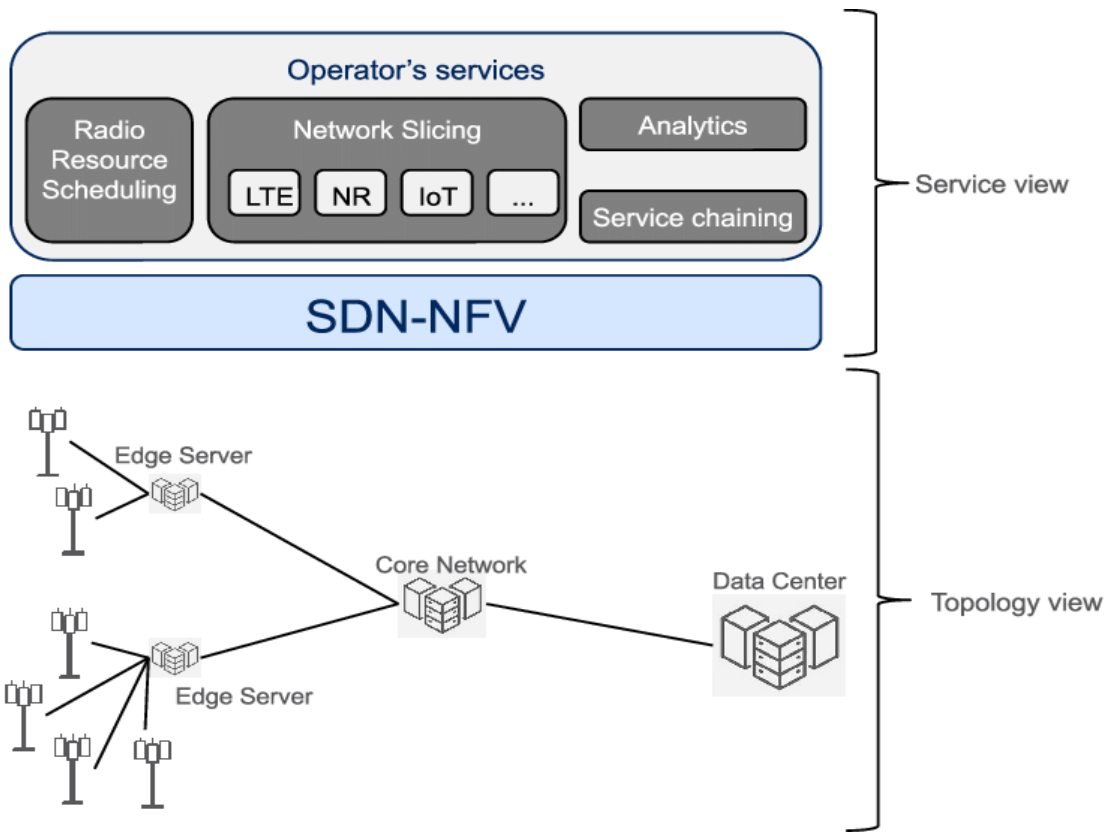
Η προτεινόμενη λύση για τη διαχείριση εύρους ζώνης ευαισθητοποιημένης για την QoE (BMS) σε δίκτυα Hybrid Fiber Coax (HFC) που υποστηρίζονται από SDN αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) των τελικών χρηστών σε συνθήκες

ανταγωνισμού μεταξύ ετερογενών συσκευών. Αυτές οι συσκευές περιλαμβάνουν smartphones, tablets και τηλεοράσεις, οι οποίες έχουν διαφορετικές ικανότητες, όπως ανάλυση οθόνης, επεξεργαστική ισχύ και μνήμη. Η BMS επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της κατανομής του εύρους ζώνης για να διασφαλίσει ότι όλοι οι χρήστες έχουν μια ικανοποιητική εμπειρία ροής βίντεο. Στη βάση της λύσης βρίσκεται ο Βελτιστοποιητής QoE Θεατή (VQO), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη βελτιστοποίηση της εμπειρίας του θεατή μέσω τριών βασικών βημάτων. Πρώτον, ο VQO καθορίζει την κλίμακα της βελτιστοποίησης, επιλέγοντας αν θα εστιάσει σε μεμονωμένες συνεδρίες (όπως unicast VoD ή υπηρεσίες OTT) ή σε ομάδες συνεδριών (όπως broadcast ή multicast).

Δεύτερον, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση μεγιστοποίησης δικτύου (NUM), ο VQO διαμορφώνει αποφάσεις για την κατανομή εύρους ζώνης και την παρουσίαση του βίντεο, έτσι ώστε να μεγιστοποιήσει την QoE του θεατή. Αυτό εξασφαλίζει ότι όλοι οι χρήστες λαμβάνουν τη βέλτιστη ποιότητα βίντεο σύμφωνα με τις συνθήκες του δικτύου και τις δυνατότητες της συσκευής τους (Seufert et al. 2015). Τέλος, ο VQO χρησιμοποιεί διάφορες προηγμένες τεχνικές, όπως το γρήγορο Μοντέλο Προβλεπτικού Ελέγχου (fastMPC), η γλώσσα βελτιστοποίησης SDN (SOL) και η βέλτιστη διαδικτυακή αποσύνθεση, για να επιλύσει αποτελεσματικά το πρόβλημα της βελτιστοποίησης QoE. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν την αποτελεσματική διαχείριση και βελτίωση της ποιότητας της ροής βίντεο για κάθε χρήστη, διασφαλίζοντας μια ανώτερη εμπειρία θέασης.

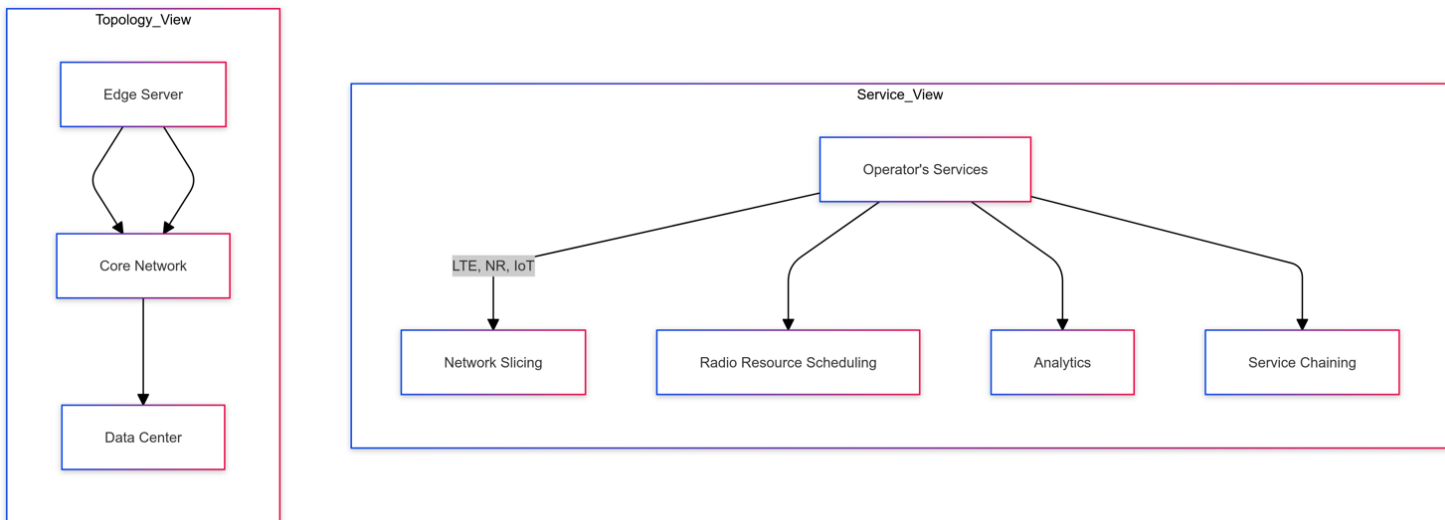
Παρακάτω η εικόνα 3. παρουσιάζει την αρχιτεκτονική SDN/NFV, διαχωρισμένη σε δύο επίπεδα: το Service view (επίπεδο υπηρεσιών) και το Topology view (επίπεδο τοπολογίας). Στο Service view, περιλαμβάνονται λειτουργίες όπως το network slicing, η ανάλυση δεδομένων, το service chaining, καθώς και άλλες υπηρεσίες όπως LTE, NR, IoT (Internet of Things, Διαδίκτυο των Πραγμάτων). Στο Topology view, φαίνεται η δικτυακή υποδομή, με edge servers, το core network και το data center, δίνοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της αρχιτεκτονικής.

Επίσης, το διάγραμμα 3 απεικονίζει τη διάρθρωση της αρχιτεκτονικής SDN/NFV, δίνοντας έμφαση στη διαχωρισμένη λειτουργία μεταξύ της τοπολογίας του δικτύου και των υπηρεσιών του παρόχου. Δείχνει με σαφήνεια πώς οι διαφορετικές λειτουργίες (π.χ. Network Slicing, Radio Resource Scheduling) αλληλεπιδρούν με το υπόβαθρο του δικτύου.



Εικόνα 3. Αρχιτεκτονική SDN/NFV

Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-SDN-NFV-architecture-views\\_fig1\\_332110686](https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-SDN-NFV-architecture-views_fig1_332110686)



Διάγραμμα 3. Διάγραμμα Δικτύωσης SDN για Υπηρεσίες Πολυμέσων

## Κεφάλαιο 6. QoE-Fairness και εξατομικευμένος QoE-Centric έλεγχος στο SDN

Οι προσεγγίσεις που εξετάζονται σε αυτή την ενότητα επικεντρώνονται στη χρήση του ελεγκτή SDN για τη διαχείριση και παρακολούθηση συστημάτων ροής βίντεο προσαρμοσμένης στον χρήστη (HAS). Ο ελεγκτής SDN αναλαμβάνει την ευθύνη για την παρακολούθηση όλων των παικτών HAS, των καταστάσεών τους, των χαρακτηριστικών των συσκευών τους, των περιεχομένων που ζητούν, των τύπων συνδρομών τους, της ποιότητας εμπειρίας (QoE) και των επιπέδων buffer. Αυτό επιτρέπει στον ελεγκτή να εντοπίζει εύκολα γεγονότα που αφορούν κάθε παίκτη, όπως η είσοδος ή η έξοδος από το δίκτυο και η έναρξη ή η διακοπή της αναπαραγωγής βίντεο. Ορισμένες από τις προσεγγίσεις χρησιμοποιούν συνάρτησεις βελτιστοποίησης σε συνεργασία με τον ελεγκτή για να επιτύχουν δικαιοσύνη QoE μεταξύ πολλών ανταγωνιζόμενων χρηστών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη δυναμική προσαρμογή του ρυθμού ροής του βίντεο για κάθε χρήστη στο δίκτυο, ώστε να βελτιστοποιηθεί η QoE για όλους τους χρήστες. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι κάποιες προσεγγίσεις χρησιμοποιούν την αρχιτεκτονική SAND (SDN-Assisted Network Delivery) για τη διαχείριση της δικαιοσύνης QoE, η οποία διαφέρει από τις μεθόδους που συζητούνται σε αυτή την ενότητα. Στις προσεγγίσεις της παρούσας ενότητας, η διαχείριση και ο έλεγχος των απαιτήσεων QoE των χρηστών πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω του ελεγκτή SDN, χωρίς την εμπλοκή άλλων αρχιτεκτονικών όπως το SAND.

Η λύση **Client-Driven Video Delivery (cDVD)** βασίζεται στις αρχές του SDN και της Συμμετοχικής Δικτύωσης (PANE). Το cDVD προσφέρει ένα API σε επίπεδο πελάτη που επιτρέπει την αλληλεπίδραση των πελατών με το δίκτυο για τη βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας (QoE). Το cDVD στοχεύει στη διασφάλιση σταθερής ποιότητας βίντεο διατηρώντας χαμηλά τα περιστατικά επαναφόρτωσης (rebuffering) σε ένα κρυπτογραφημένο περιβάλλον που υποστηρίζεται από SDN (Jarschel, Wamser, Seufert, Hoffeld, Tran-Gia & Pries, 2013). Ο λόγος επαναφόρτωσης είναι η αναλογία μεταξύ του χρόνου επαναφόρτωσης και του συνολικού χρόνου παρακολούθησης του βίντεο. Το cDVD επιτρέπει σε έναν ή περισσότερους πελάτες DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP) να αλληλεπιδρούν με το δίκτυο (π.χ., με τον ελεγκτή SDN) για να επιτύχουν δικαιοσύνη QoE σε επίπεδο συνεδρίας. Κάθε συνεδρία μπορεί να περιλαμβάνει πολλαπλές ροές βίντεο, και ο ελεγκτής SDN χρησιμοποιεί μηχανισμούς



όπως το OpenFlow ή τη διαμόρφωση ουρών για να ελέγξει το εύρος ζώνης στους δρομολογητές. Ο ελεγκτής εφαρμόζει περιορισμούς στον ρυθμό κάθε ροής βίντεο και κατανέμει το εύρος ζώνης έτσι ώστε να εξισωθεί η QoE μεταξύ των συνεδριών. Αυτό γίνεται μέσω ενός module που αξιολογεί την QoE για να διασφαλίσει τη δικαιοσύνη μεταξύ των ροών βίντεο.

Το **OpenFlow-Assisted QoE Fairness Framework (QFF)** είναι ένα πλαίσιο που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο OpenFlow για να διαχειριστεί τη δικαιοσύνη QoE σε δίκτυα πολυμέσων. Το QFF είναι σχεδιασμένο για να κατανεμηθεί πόρους δικτύου με σκοπό τη μεγιστοποίηση του αριθμού των χρηστών που επιτυγχάνουν το επιθυμητό επίπεδο QoE σε ένα ετερογενές περιβάλλον (Egilmez, Dane, Bagci & Tekalp, 2013).

Το QFF επιτρέπει την ανεξάρτητη από προμηθευτές διαχείριση του δικτύου και τη δυναμική κατανομή πόρων μέσω του πρωτοκόλλου OpenFlow. Παρακολουθεί τη κατάσταση του δικτύου και τις συνεδρίες ροής βίντεο DASH χρησιμοποιώντας modules όπως ο Network Inspector και ο MPD Parser. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, το QFF κατανέμει δυναμικά τους πόρους δικτύου σε κάθε πελάτη για να μεγιστοποιήσει τη QoE ισότιμα μεταξύ όλων των χρηστών. Η δικτύωση του QFF υποστηρίζεται από δύο βασικές συνιστώσες (Li, Zhu & Gahm, 2014):

- **Συνάρτηση Χρησιμότητας (UF):** Αντιστοιχεί τον ρυθμό ροής ενός βίντεο στην QoE που παρέχεται στη συσκευή ενός συγκεκριμένου πελάτη.
- **Συνάρτηση Βελτιστοποίησης (OF):** Υπεύθυνη για την εύρεση του κατάλληλου συνόλου ρυθμών ροής που θα διασφαλίσουν μια δίκαιη QoE για όλους τους πελάτες DASH.

Αυτά τα δύο εργαλεία συνεργάζονται για να εξασφαλίσουν ότι όλοι οι χρήστες έχουν μια ισότιμη και ικανοποιητική εμπειρία παρακολούθησης βίντεο, προσαρμόζοντας δυναμικά τους πόρους δικτύου με βάση τις ανάγκες και τις συνθήκες της κάθε συνεδρίας.

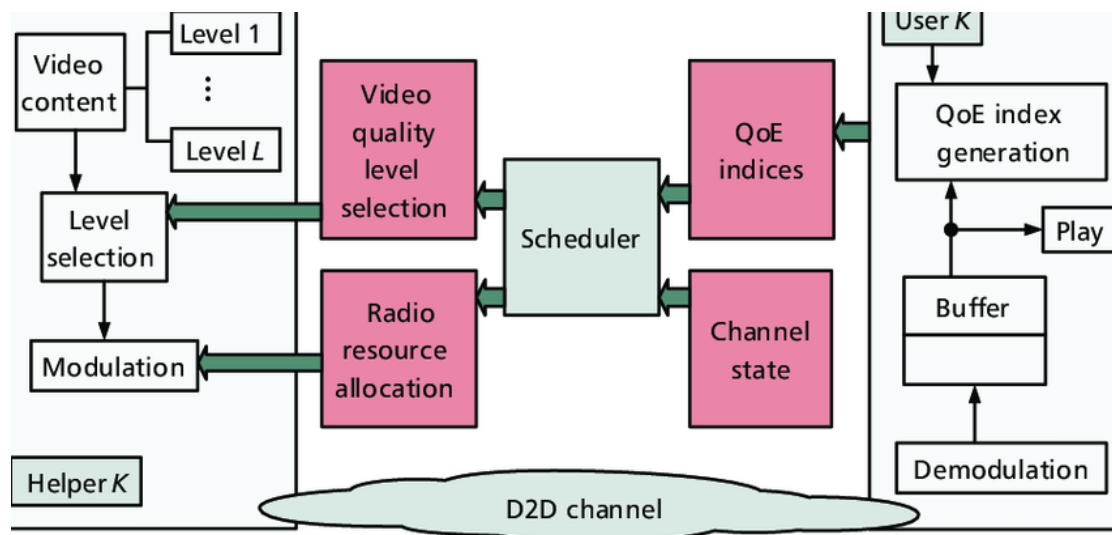
Το **SDNDASH** είναι μια αρχιτεκτονική που επικεντρώνεται στη δυναμική κατανομή και διαχείριση πόρων δικτύου για συστήματα ροής βίντεο προσαρμοσμένης στον χρήστη (HAS). Στόχος του SDNDASH είναι να αποφύγει προβλήματα όπως η αστάθεια ποιότητας, η άδικη κατανομή του εύρους ζώνης και η υποχρησιμοποίηση των δικτυακών πόρων που συμβαίνουν όταν πολλοί πελάτες DASH μοιράζονται το ίδιο σημείο συμφόρησης στο δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η βελτιστοποίηση

της ποιότητας εμπειρίας (QoE) για κάθε πελάτη και διασφαλίζεται η μέγιστη δικαιοσύνη QoE μεταξύ των χρηστών (Medhat, Taleb, Elmangoush, Carella, Covaci & Magedanz, 2015).

Ως επέκταση του SDNDASH, προτάθηκε το SDNHAS, μια λύση ροής βασισμένη σε SDN που βελτιώνει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων προσαρμογής QoE για τους παίκτες HAS. Το SDNHAS μπορεί να εφαρμόσει αποτελεσματικά πολιτικές QoE για ομάδες χρηστών και να κατανεμηθεί αποδοτικά τους πόρους δικτύου, ανταγωνιζόμενο με τις βραχυπρόθεσμες και μακροχρόνιες αλλαγές στο δίκτυο (Bhamare, Jain, Samaka & Erbad, 2016). Ένα σημαντικό στοιχείο του SDNHAS είναι ο βελτιστοποιητής, ο οποίος δημιουργεί μια λογική τοπολογία δικτύου και ομαδοποιεί τους παίκτες HAS σε εικονικές συστάδες. Για κάθε σύσταση (cluster), κατασκευάζεται μια πολιτική QoE, η οποία ανανεώνεται κατά τη διάρκεια της λήψης τμήματος βίντεο. Κάθε παίκτης διαθέτει τη δική του πολιτική QoE που περιλαμβάνει τιμές QoE και μετρικά στοιχεία. Όταν οι πολιτικές QoE των παικτών ανήκουν στην ίδια σύσταση, συνδυάζονται σε μια ενιαία πολιτική QoE ανά σύσταση μέσω μιας απλής μεθόδου συνδυασμού. Το SDNHAS προσφέρει προσαρμοσμένη παράδοση ροής QoE και έξυπνη διαχείριση δικτύου, με στόχο τη μέγιστη ικανοποίηση των χρηστών, ακόμη και σε περιβάλλοντα με ποικιλία τύπων παικτών HAS.

Ακολουθώντας την ίδια φιλοσοφία δικαιοσύνης QoE και προσωποποιημένου ελέγχου QoE, προτάθηκε μια αρχιτεκτονική διαχείρισης εύρους ζώνης πολλών πελατών βασισμένη σε SDN για ροές HTTP προσαρμοσμένων στον χρήστη. Αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηρίξει έως και το 75% των χρηστών με το ίδιο επίπεδο QoE (Medhat et al. 2015). Επιπλέον, προτάθηκε μια στρατηγική κατανομής εύρους ζώνης βασισμένη σε Q-learning, η οποία αποσκοπεί στην επίτευξη δικαιοσύνης QoE. Το μοντέλο UFair συντονίζει την κατανομή πόρων δικτύου μεταξύ των ροών HAS για να μειώσει τις διακυμάνσεις QoE και να βελτιώσει τη συνολική δικαιοσύνη QoE. Το UFair χρησιμοποιεί μετρικές ποιότητας βίντεο, τις επιπτώσεις της εναλλαγής ποιότητας (switching impact) και την αποδοτικότητα κόστους για να μετρήσει τη δικαιοσύνη QoE των χρηστών. Καθώς τα δίκτυα εξελίσσονται προς την κατεύθυνση των 5G, αναμένονται νέες εξελίξεις και προκλήσεις σχετικά με το πώς τα μετρικά δικαιοσύνης QoE μπορούν να ενσωματωθούν ως η βάση για τη διαχείριση και βελτιστοποίηση QoE σε μελλοντικά δίκτυα. Παρακάτω η εικόνα 2 απεικονίζει τη διαδικασία προσαρμοστικής ροής βίντεο μέσω ενός καναλιού συσκευής προς συσκευή (D2D channel), και εστιάζει

στη βελτίωση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) του τελικού χρήστη. Συγκεκριμένα, περιγράφει πώς η επιλογή του επιπέδου ποιότητας του βίντεο, η κατανομή ραδιοφωνικών πόρων και η διαχείριση των συνθηκών του καναλιού επηρεάζουν την τελική εμπειρία του χρήστη, μέσα από την αναπαραγωγή και την αποθήκευση (buffering) του βίντεο. Η εικόνα δείχνει τη διαδικασία ροής βίντεο από τη στιγμή της επιλογής του επιπέδου ποιότητας και της κατανομής πόρων, μέχρι την αναπαραγωγή από τον τελικό χρήστη. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η απεικόνιση της επίδρασης των δεικτών QoE (QoE indices) στην απόφαση για την ποιότητα του βίντεο και τη συνολική εμπειρία του χρήστη. Το σύστημα αυτό ελέγχει και βελτιστοποιεί τις συνθήκες αναπαραγωγής σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 4. QoE για προσαρμοστική ροή

Πηγή: [https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-process-of-QoE-aware-adaptive-D2D-video-streaming\\_fig1\\_281841582](https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-process-of-QoE-aware-adaptive-D2D-video-streaming_fig1_281841582)

## Κεφάλαιο 7. Μηχανισμοί Δρομολόγησης εστιασμένοι στην QoE χρησιμοποιώντας SDN/NFV

Η αποτελεσματική παράδοση ροών βίντεο με βελτιωμένη ποιότητα εμπειρίας (QoE) μπορεί να επιτευχθεί σε δίκτυα SDN χρησιμοποιώντας συντομότερες διαδρομές, πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές ή διαδικασίες IP multicast. Ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης είναι η Οικονομική Διαχείριση Κυκλοφορίας (ETM), η οποία χρησιμοποιεί μοντέλα εκτίμησης QoE για τη μεγιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας των χρηστών κατά την παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών. Η μέτρηση και συλλογή των δεικτών απόδοσης QoE (QoE IFs) σε ένα δίκτυο SDN πραγματοποιείται μέσω συνεργασίας μεταξύ διαφόρων στοιχείων, όπως οι πελάτες, οι διακομιστές πολυμέσων και οι ελεγκτές SDN. Οι πελάτες και ο διακομιστής περιεχομένου αναφέρουν τις τιμές QoE στις εφαρμογές SDN, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούν αυτές τις τιμές για να προετοιμάσουν τα δεδομένα που απαιτούνται για τον ελεγκτή SDN. Με βάση τις απαιτήσεις κυκλοφορίας και τους περιορισμούς του δικτύου, ο ελεγκτής επιλέγει μια διαδρομή που θα μεγιστοποιήσει την QoE για τους πελάτες που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο DASH (Wamser, Seufert, Casas, Tran-Gia & Hossfeld, 2016).

Το μοντέλο Q-POINT είναι ένα σύστημα βελτιστοποίησης δρομολόγησης με βάση την ποιότητα εμπειρίας (QoE), το οποίο στοχεύει στη μεγιστοποίηση της QoE των τελικών χρηστών υπολογίζοντας τις βέλτιστες διαδρομές για κάθε ροή πολυμέσων. Για να διαπραγματευτεί σημαντικές παραμέτρους κατά τη δημιουργία συνεδριών ροής βίντεο, το Q-POINT χρησιμοποιεί το Πρωτόκολλο Εκκίνησης Συνεδρίας (SIP), το οποίο υποστηρίζεται από έναν διακομιστή εφαρμογών που εκτελεί αντιστοίχιση των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και ποιότητας εμπειρίας (QoE). Επίσης, το SIP συνεργάζεται με τη Συνάρτηση Βελτιστοποίησης (QMOF), η οποία υπολογίζει τις απαραίτητες ρυθμίσεις όπως οι κωδικοποιητές πολυμέσων, τα bitrates βίντεο και τις προτιμήσεις των χρηστών. Βάσει αυτών των ρυθμίσεων, ο ελεγκτής SDN καθορίζει ποιες ροές πολυμέσων θα δρομολογηθούν μέσω συγκεκριμένων διαδρομών ώστε να βελτιστοποιηθεί η συνολική ποιότητα εμπειρίας (QoE). Η κύρια ιδέα της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να ενσωματώσει διάφορες λειτουργίες δικτύου σε επίπεδο εφαρμογής, οι οποίες συμμετέχουν στη διαπραγμάτευση και στη λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της QoE.

Μια από τις καινοτομίες που εισάγονται είναι η κλιμακώσιμη ροή πολυμέσων multicast (SDM2Cast), η οποία προσαρμόζει τον αριθμό των επιπέδων βίντεο, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Αυτό επιτρέπει στο SDN να αναγνωρίζει και να διαχειρίζεται τις ροές πολυμέσων μέσα στο δίκτυο, κάνοντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο για να βελτιώσει την QoE των χρηστών. Μια εφαρμογή multicast για ροή βίντεο, βασισμένη στο SDN, υπολογίζει διαδρομές και δέντρα multicast, ενώ ταυτόχρονα χαρτογραφεί τους πελάτες στους διακομιστές με τη μέγιστη QoE. Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσαρμοσμένος για μέσα βίντεο διαμορφώνει την κυκλοφορία ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου πρόσβασης (όπως η συμφόρηση ή η απόδοση των συνδέσεων). Παράλληλα, ένα πλαίσιο ροής βίντεο που βασίζεται σε SDN (Software Defined Networking) και είναι ευαισθητοποιημένο στην QoE επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή των διαδρομών δρομολόγησης χρησιμοποιώντας την τεχνολογία MPLS Traffic Engineering (TE). Αυτό διασφαλίζει ότι οι χρήστες έχουν αξιόπιστη εμπειρία παρακολούθησης βίντεο, ακόμα και αν οι συνθήκες δικτύου αλλάζουν (Wamser et al. 2016).

Σε αυτή την αρχιτεκτονική, η παρακολούθηση του δικτύου γίνεται κάθε 60 δευτερόλεπτα, μετρώντας παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας (QoS) όπως η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αυτές οι μετρήσεις είναι κρίσιμες για την πρόβλεψη της ποιότητας εμπειρίας (QoE) και της απόδοσης της ροής βίντεο, καθώς η απώλεια πακέτων και οι καθυστερήσεις έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν την ποιότητα του βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Το σχήμα SQAPE βασίζεται στη σχέση μεταξύ QoS και QoE για να υπολογίσει την εκτίμηση του MOS (Mean Opinion Score) ανά διαδρομή. Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο τις επιδόσεις του δικτύου όσο και τη χρήση των συνδέσμων, και καθορίζει ποια διαδρομή είναι η βέλτιστη για τη μεγιστοποίηση της QoE. Κάθε φορά που ένας πελάτης ζητάει ένα νέο τμήμα βίντεο, το σύστημα επαναυπολογίζει την καλύτερη διαδρομή για τη ροή του, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η ποιότητα της ροής βίντεο παραμένει υψηλή (Wamser et al. 2016).

Η αποτελεσματική παράδοση ροών βίντεο με βελτιωμένη ποιότητα εμπειρίας (QoE) μπορεί να επιτευχθεί σε δίκτυα SDN χρησιμοποιώντας συντομότερες διαδρομές, πολλαπλές ανεξάρτητες διαδρομές ή διαδικασίες IP multicast. Ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης είναι η Οικονομική Διαχείριση Κυκλοφορίας (ETM), η οποία χρησιμοποιεί μοντέλα εκτίμησης QoE για τη μεγιστοποίηση της ποιότητας εμπειρίας των χρηστών κατά την παροχή πολυμεσικών υπηρεσιών. Η μέτρηση και συλλογή των δεικτών απόδοσης QoE (QoE IFs) σε ένα δίκτυο SDN πραγματοποιείται μέσω

συνεργασίας μεταξύ διαφόρων στοιχείων, όπως οι πελάτες, οι διακομιστές πολυμέσων και οι ελεγκτές SDN. Οι πελάτες και ο διακομιστής περιεχομένου αναφέρουν τις τιμές QoE στις εφαρμογές SDN, οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιούν αυτές τις τιμές για να προετοιμάσουν τα δεδομένα που απαιτούνται για τον ελεγκτή SDN. Με βάση τις απαιτήσεις κυκλοφορίας και τους περιορισμούς του δικτύου, ο ελεγκτής επιλέγει μια διαδρομή που θα μεγιστοποιήσει την QoE για τους πελάτες που χρησιμοποιούν το πρωτόκολλο DASH (Amin & Sivaraajan, 2015).

Το μοντέλο Q-POINT είναι ένα σύστημα βελτιστοποίησης δρομολόγησης με βάση την ποιότητα εμπειρίας (QoE), το οποίο στοχεύει στη μεγιστοποίηση της QoE των τελικών χρηστών υπολογίζοντας τις βέλτιστες διαδρομές για κάθε ροή πολυμέσων. Για να διαπραγματευτεί σημαντικές παραμέτρους κατά τη δημιουργία συνεδριών ροής βίντεο, το Q-POINT χρησιμοποιεί το Πρωτόκολλο Εκκίνησης Συνεδρίας (SIP), το οποίο υποστηρίζεται από έναν διακομιστή εφαρμογών που εκτελεί αντιστοίχιση των παραμέτρων ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και ποιότητας εμπειρίας (QoE). Επίσης, το SIP συνεργάζεται με τη Συνάρτηση Βελτιστοποίησης (QMOF), η οποία υπολογίζει τις απαραίτητες ρυθμίσεις όπως οι κωδικοποιητές πολυμέσων, τα bitrates βίντεο και τις προτιμήσεις των χρηστών. Βάσει αυτών των ρυθμίσεων, ο ελεγκτής SDN καθορίζει ποιες ροές πολυμέσων θα δρομολογηθούν μέσω συγκεκριμένων διαδρομών ώστε να βελτιστοποιηθεί η συνολική ποιότητα εμπειρίας (QoE) (Ciullo, Martina, Garetto & Leonardí, 2016).

Η κύρια ιδέα της αρχιτεκτονικής αυτής είναι να ενσωματώσει διάφορες λειτουργίες δικτύου σε επίπεδο εφαρμογής, οι οποίες συμμετέχουν στη διαπραγμάτευση και στη λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση της QoE. Μια από τις καινοτομίες που εισάγονται είναι η κλιμακώσιμη ροή πολυμέσων multicast (SDM2Cast), η οποία προσαρμόζει τον αριθμό των επιπέδων βίντεο, ανάλογα με την κατάσταση του δικτύου. Αυτό επιτρέπει στο SDN να αναγνωρίζει και να διαχειρίζεται τις ροές πολυμέσων μέσα στο δίκτυο, κάνοντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο για να βελτιώσει την QoE των χρηστών. Μια εφαρμογή multicast για ροή βίντεο, βασισμένη στο SDN, υπολογίζει διαδρομές και δέντρα multicast, ενώ ταυτόχρονα χαρτογραφεί τους πελάτες στους διακομιστές με τη μέγιστη QoE.

Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσαρμοσμένος για μέσα βίντεο διαμορφώνει την κυκλοφορία ανάλογα με τις συνθήκες του δικτύου πρόσβασης (όπως η συμφόρηση ή η απόδοση των συνδέσεων). Παράλληλα, ένα πλαίσιο ροής βίντεο που βασίζεται σε SDN

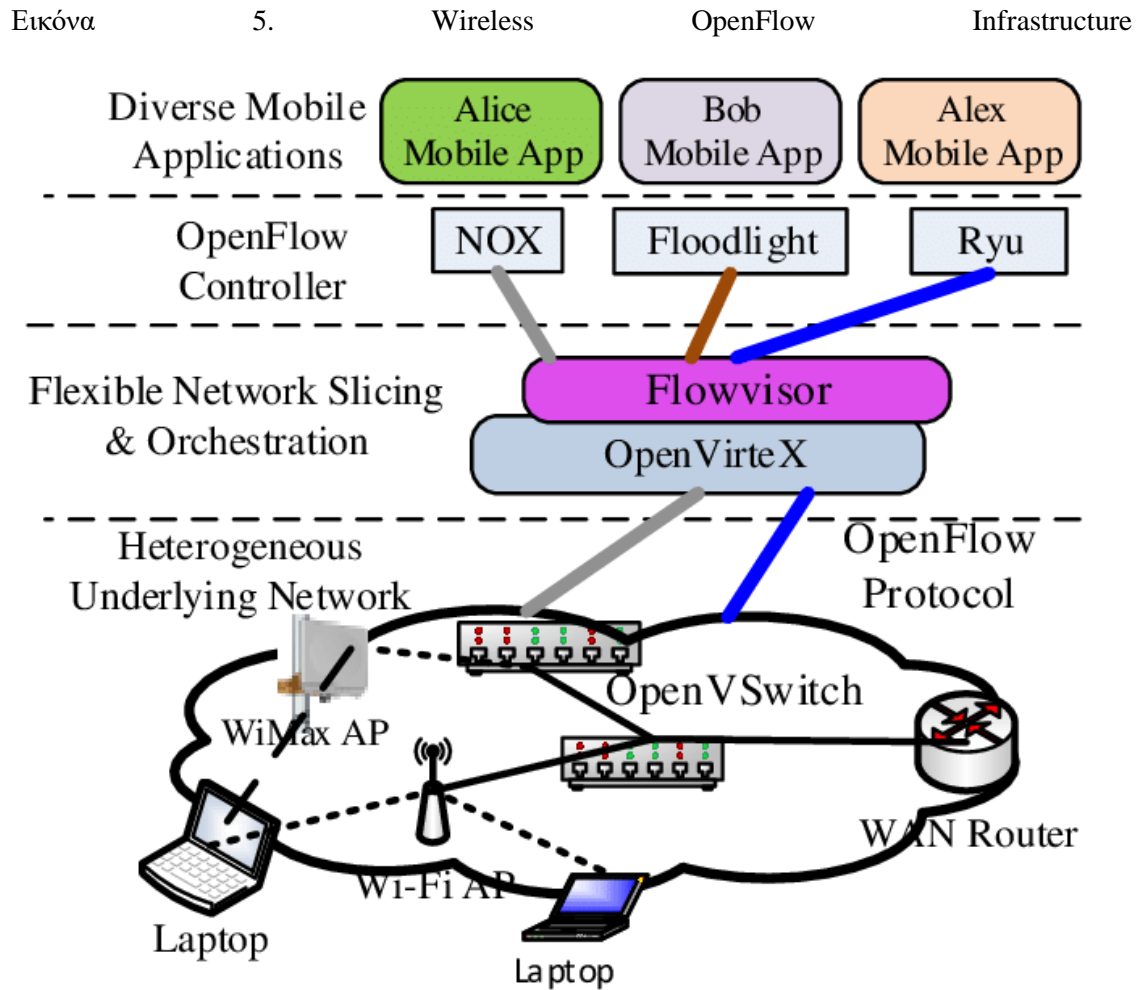
(Software Defined Networking) και είναι ευαισθητοποιημένο στην QoE επιτρέπει τη δυναμική αλλαγή των διαδρομών δρομολόγησης χρησιμοποιώντας την τεχνολογία MPLS Traffic Engineering (TE). Αυτό διασφαλίζει ότι οι χρήστες έχουν αξιόπιστη εμπειρία παρακολούθησης βίντεο, ακόμα και αν οι συνθήκες δικτύου αλλάζουν (Seufert, Burger, Schwartz & Tran-Gia, 2014). Σε αυτή την αρχιτεκτονική, η παρακολούθηση του δικτύου γίνεται κάθε 60 δευτερόλεπτα, μετρώντας παραμέτρους ποιότητας υπηρεσίας (QoS) όπως η απώλεια πακέτων, η καθυστέρηση και το διαθέσιμο εύρος ζώνης. Αυτές οι μετρήσεις είναι κρίσιμες για την πρόβλεψη της ποιότητας εμπειρίας (QoE) και της απόδοσης της ροής βίντεο, καθώς η απώλεια πακέτων και οι καθυστερήσεις έχουν βρεθεί ότι επηρεάζουν την ποιότητα του βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Το σχήμα SQAPE βασίζεται στη σχέση μεταξύ QoS και QoE για να υπολογίσει την εκτίμηση του MOS (Mean Opinion Score) ανά διαδρομή. Ο υπολογισμός αυτός λαμβάνει υπόψη τόσο τις επιδόσεις του δικτύου όσο και τη χρήση των συνδέσμων, και καθορίζει ποια διαδρομή είναι η βέλτιστη για τη μεγιστοποίηση της QoE. Κάθε φορά που ένας πελάτης ζητάει ένα νέο τμήμα βίντεο, το σύστημα επαναυπολογίζει την καλύτερη διαδρομή για τη ροή του, εξασφαλίζοντας έτσι ότι η ποιότητα της ροής βίντεο παραμένει υψηλή (Wamser, Seufert, Casas, Tran-Gia & Hossfeld, 2016).

## **7.1 Πρακτικές Εφαρμογές του Software-Defined Networking (SDN) στην Εξισορρόπηση Φορτίου και Εικονικοποίηση Δικτύων**

Στην παρούσα εργασία, το Software-Defined Networking (SDN) χρησιμοποιείται για να επιλύσει σύνθετα προβλήματα δικτύων και να βελτιώσει την απόδοσή τους μέσω της διασύνδεσης κέντρων δεδομένων (data center interconnect). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την εικονικοποίηση του δικτύου, την αυτοματοποίηση των διαδικασιών, και την εξισορρόπηση του φόρτου με τρόπο που παραδοσιακές μέθοδοι δεν θα μπορούσαν να επιτύχουν.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό του SDN είναι η κεντρική διαχείριση των δικτυακών πόρων μέσω ενός SDN controller, όπως ο OpenFlow controller. Αυτός ο controller έχει πλήρη και ενοποιημένη άποψη του δικτύου, επιτρέποντας τη δυναμική δρομολόγηση της κυκλοφορίας ανάμεσα σε εφαρμογές και υπηρεσίες που τρέχουν σε εικονικές μηχανές ή φυσικούς servers. Οι εφαρμογές αυτές χρησιμοποιούν RESTful APIs για να επικοινωνούν με το δίκτυο και να ζητούν υπηρεσίες, όπως η ανακάλυψη τοπολογίας, η διαχείριση ροών και η παροχή ποιότητας υπηρεσίας (QoS).

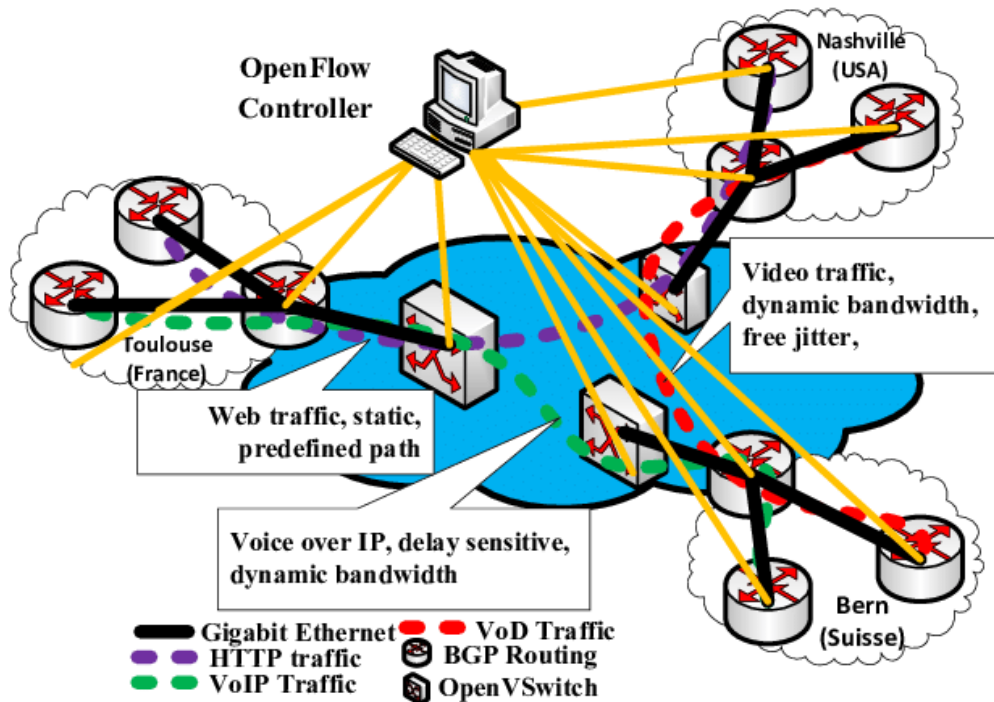




**Εικόνα 5. Wireless OpenFlow Infrastructure**

Για παράδειγμα, σε ένα μεγάλο data center, ο controller μπορεί να ανιχνεύσει τα σημεία συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο και να δρομολογήσει την κυκλοφορία προς εναλλακτικές διαδρομές, εξασφαλίζοντας ότι η συνολική απόδοση του δικτύου παραμένει υψηλή. Αυτό γίνεται χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση για κάθε αλλαγή, αφού το SDN αυτοματοποιεί αυτές τις διαδικασίες με βάση τους κανόνες που έχουν οριστεί.

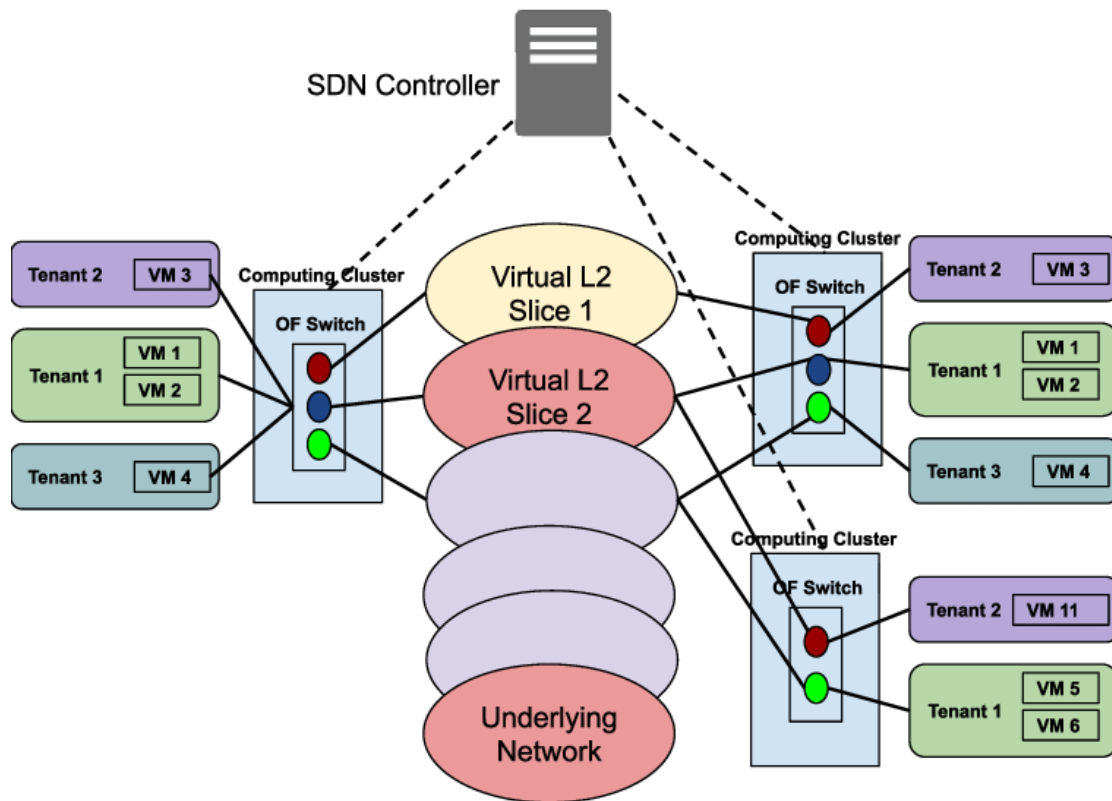




**Εικόνα 6. Traffic engineering with OpenFlow-based SDN**

Ένα ακόμα πρακτικό παράδειγμα χρήσης του SDN είναι η δυνατότητα γρήγορης και εύκολης ανάκαμψης από σφάλματα ή αποτυχίες συσκευών. Σε περίπτωση που αποτύχει ένας κόμβος ή μία σύνδεση, το δίκτυο μπορεί αυτόματα να ανακατανεύσει τη ροή της κυκλοφορίας, διασφαλίζοντας ότι οι εφαρμογές συνεχίζουν να λειτουργούν χωρίς διακοπές. Αυτή η δυνατότητα, σε συνδυασμό με την υποστήριξη τρίτων εργαλείων που συμμορφώνονται με τα πρότυπα SDN, επιτρέπει τη συνεχή βελτίωση και επεκτασιμότητα των δικτύων.

Επιπλέον, το SDN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία "φέτας δικτύου" (network slicing), δηλαδή τη διαίρεση του φυσικού δικτύου σε εικονικές υποδομές που λειτουργούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη. Αυτό επιτρέπει σε διαφορετικούς πελάτες ή υπηρεσίες να χρησιμοποιούν τα δικά τους εικονικά δίκτυα πάνω στην ίδια φυσική υποδομή, χωρίς να επηρεάζονται μεταξύ τους. (Akram Hakiri, April 2013)



Εικόνα 7. OpenFlow Network Slicing use case

## 7.2 Μηχανισμοί που βασίζονται σε QoE-Aware SDN/NFV με χρήση MPTCP και δρομολόγησης τμημάτων

Η συνεχής αύξηση των πολυμεσικών υπηρεσιών και εφαρμογών έχει οδηγήσει τους παρόχους υπηρεσιών (Service Providers - SPs) να υιοθετήσουν τεχνολογίες SDN και NFV για τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων τους. Με αυτές τις τεχνολογίες, οι πάροχοι μπορούν να εφαρμόσουν το Traffic Engineering (TE), το οποίο επιτρέπει τον αποτελεσματικό έλεγχο της κίνησης στο δίκτυο, ώστε να εξασφαλίζεται η βέλτιστη χρήση των πόρων του δικτύου, η υψηλή απόδοση των εφαρμογών και η βελτίωση της εμπειρίας ποιότητας (QoE) των τελικών χρηστών. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών είναι το B4 SDN/TE της Google και το SWAN της Microsoft, που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας δεδομένων. Η παροχή υψηλής QoE είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διανομή βίντεο, η οποία απαιτεί σταθερές και γρήγορες συνδέσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, το MPTCP (Multipath TCP) έχει αναδειχθεί ως ένα πρωτόκολλο μεταφοράς που μπορεί να δημιουργεί πολλαπλές

"υποροές" από μια σύνδεση TCP και να κατανέμει τα δεδομένα μέσω διαφορετικών διαδρομών στο δίκτυο. Έτσι, όλες οι διαδρομές του δικτύου φορτώνονται βέλτιστα, εξασφαλίζοντας καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του δικτύου (Ford, Raiciu, Handley, Bonaventure & Paasch, 2013). Ένας κεντρικός SDN ελεγκτής μπορεί να διαχειριστεί τις υποροές του MPTCP και να εξασφαλίσει ότι καθεμία ακολουθεί την πιο αποδοτική διαδρομή στο δίκτυο. Αυτό βελτιώνει τη χρήση του δικτύου, επιτρέποντας εξισορρόπηση φορτίου, καλύτερη αξιοπιστία, και τελικά υψηλότερη συνολική απόδοση, γεγονός που οδηγεί σε βελτιωμένη QoE για τους τελικούς χρήστες (Ford et al. 2013).

Ωστόσο, υπάρχει ένα σημαντικό πρόβλημα: η μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων, ειδικά πολυμέσων, χρησιμοποιώντας το MPTCP σε πλατφόρμες SDN/NFV, μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των κανόνων προώθησης που πρέπει να διαχειριστούν οι διακόπτες. Οι διακόπτες SDN δεν είναι σχεδιασμένοι για να διαχειρίζονται τεράστιο αριθμό κανόνων, καθώς αποθηκεύουν τους κανόνες προώθησης στη μνήμη TCAM (Ternary Content Addressable Memory), η οποία είναι ακριβή και έχει περιορισμένη χωρητικότητα (υποστηρίζει περίπου 2k–20k κανόνες) (Fossati, Giaccone & Bianco, 2017).

Για να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, προτάθηκε από την IETF η χρήση του Segment Routing (SR). Το SR απλοποιεί τη διαχείριση των κανόνων δρομολόγησης, καθώς οι διακόπτες SDN/NFV δεν χρειάζεται πλέον να διατηρούν συνεχώς ενημερωμένες πληροφορίες για τις διαδρομές του δικτύου. Αντί για κανόνες προώθησης, η διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει ένα πακέτο μπορεί να καθοριστεί με μια λίστα Segment Identifiers (SIDs). Το πακέτο μεταφέρεται μέσω του δικτύου ακολουθώντας την ακολουθία αυτών των SIDs, τα οποία αντιστοιχούν σε διακόπτες, δρομολογητές ή συνδέσμους. Τα SIDs μπορεί να είναι είτε παγκόσμια (γνωστά από όλους τους κόμβους του δικτύου) είτε τοπικά (γνωστά μόνο στον κόμβο όπου ανήκουν) (Fossati et al. 2017). Η μνήμη TCAM είναι ακριβή και καταναλώνει πολύ ενέργεια, γι' αυτό θεωρείται ένας πολύτιμος αλλά ακριβός πόρος. Μια λύση για να μειωθεί το κόστος είναι η συνδυαστική χρήση του MPTCP και του SR. Αυτός ο συνδυασμός θα πρόσφερε ευελιξία, αξιοπιστία και κλιμακωσιμότητα, ενώ ταυτόχρονα θα βελτιώνε την QoE των χρηστών στα δίκτυα SDN/NFV. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι μια σύνδεση MPTCP αποτελείται από 3 υποροές: sf1:1, sf1:2, sf1:3. Ο κεντρικός SDN ελεγκτής μπορεί να επιλέξει τις συντομότερες και πιο αποδοτικές διαδρομές για κάθε υποροή, ενώ παράλληλα

χρησιμοποιεί το Segment Routing για να δρομολογεί τα πακέτα βέλτιστα μέσα στο δίκτυο.

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν το MPTCP σε δίκτυα SDN για τη βελτίωση της απόδοσης και της QoE. Για παράδειγμα (Seferoglu, Kondareddy & Zhang, 2018):

- ADMIT (quAlity-Driven MultiPath TCP): Πρόκειται για μια προσέγγιση που επιτρέπει την παροχή υπηρεσιών ροής βίντεο υψηλής ποιότητας σε κινητές συσκευές μέσω MPTCP, χρησιμοποιώντας πολλαπλές ασύρματες συνδέσεις. Το ADMIT χρησιμοποιεί αλγόριθμους όπως η Forward Error Correction (FEC) για να βελτιώσει την ποιότητα του βίντεο, μειώνοντας την παραμόρφωση κατά τη ροή βίντεο.
- MP-DASH: Αυτή η στρατηγική πολλαπλών διαδρομών ενισχύει το MPTCP για να υποστηρίξει προσαρμοστική ροή βίντεο, επιτρέποντας στους χρήστες να επιλέγουν την προτιμώμενη διεπαφή. Το MP-DASH επιλέγει τις βέλτιστες διαδρομές για να μεταφέρει τα τμήματα βίντεο και να βελτιώσει την QoE.

Αυτές οι προσεγγίσεις βελτιώνουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου, μειώνοντας την κατανάλωση δεδομένων και ενέργειας, ενώ παράλληλα διασφαλίζουν υψηλή ποιότητα εμπειρίας για τους χρήστες.

### **7.3 Συνεργατική διαχείριση QoE Service από OTTP και ISP μέσω SDN και NFV**

Η συνεργατική διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) σε δίκτυα που χρησιμοποιούν τεχνολογίες SDN και NFV προσφέρει μια σημαντική ευκαιρία για τους Παρόχους Υπηρεσιών Διαδικτύου (ISP) και τους Παρόχους Περιεχομένου Υπερβατικής Χωρητικότητας (Over-The-Top Providers - OTTP) να συνεργαστούν, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών πολυμέσων για τους τελικούς χρήστες. Οι OTTP, που παρέχουν υπηρεσίες πολυμέσων (όπως streaming βίντεο), έχουν το πλεονέκτημα να παρακολουθούν την ποιότητα εμπειρίας (QoE) απευθείας μέσω των εφαρμογών τους που είναι εγκατεστημένες στους τερματικούς χρήστες. Αυτό τους επιτρέπει να συλλέγουν πολύτιμα δεδομένα, όπως ο χρόνος απόκρισης και η ποιότητα της εικόνας, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ακριβέστερη αξιολόγηση της εμπειρίας του χρήστη. Από την άλλη πλευρά, οι ISP, παρόλο που ελέγχουν τη διαχείριση της κυκλοφορίας στο δίκτυο και μπορούν να παρακολουθούν την ποιότητα

υπηρεσίας, συχνά δεν έχουν άμεση πρόσβαση στα δεδομένα QoE λόγω της κρυπτογράφησης των δεδομένων από άκρο σε άκρο (Tran, Hajisami & Pompili, 2017).

Η συνεργασία μεταξύ ISP και OTTP είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της QoE. Οι OTTP μπορούν να παρακολουθούν την QoE και να μοιράζονται δεδομένα με τους ISP, που με τη σειρά τους μπορούν να προσαρμόζουν τις λειτουργίες του δικτύου για να βελτιώσουν την απόδοση. Οι ISP, αξιοποιώντας τις τεχνολογίες SDN/NFV, έχουν τη δυνατότητα να εφαρμόζουν διάφορες στρατηγικές, όπως η επαναδρομολόγηση της κυκλοφορίας, η συγκέντρωση συνδέσεων και η προτεραιοποίηση συγκεκριμένων υπηρεσιών, με στόχο την καλύτερη απόδοση του δικτύου και τη βελτίωση της QoE. Η αρχιτεκτονική συνεργατικής διαχείρισης QoE βασίζεται σε διάφορα επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο είναι το επίπεδο δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει φυσικές ή εικονικές συσκευές προώθησης δεδομένων, όπως δρομολογητές, διακόπτες και Εικονικούς Διακομιστές Αντιπροσώπων (VSS). Αυτές οι συσκευές ελέγχονται από τον ελεγκτή SDN, ο οποίος ανήκει στο επίπεδο ελέγχου. Ο ελεγκτής SDN εφαρμόζει τις πολιτικές δικτύου που καθορίζονται από το επίπεδο διαχείρισης (Sun, Yin, Jiang & Liu, 2018). Το επίπεδο διαχείρισης δικτύου ISP είναι υπεύθυνο για τη συνολική διαχείριση του δικτύου. Περιλαμβάνει λειτουργίες όπως η παρακολούθηση της QoS για να διασφαλιστεί η σωστή λειτουργία του δικτύου, η διαχείριση πολιτικών που καθορίζει τους κανόνες λειτουργίας του δικτύου και οι ενέργειες ελέγχου που υλοποιούν αυτές τις πολιτικές μέσω του ελεγκτή SDN. Το επίπεδο διαχείρισης OTTP, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει τις υποδομές cloud των OTTP, οι οποίες συλλέγουν δεδομένα QoE και τα μοιράζονται με τον ISP. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη Εικονικών Διακομιστών Αντιπροσώπων (VSS) από τον ISP, με σκοπό τη μείωση των καθυστερήσεων κατά την ανάκτηση περιεχομένου πολυμέσων (Sun et al. 2018). Η συνεργατική αυτή προσέγγιση προσφέρει σημαντικά οφέλη, όπως την αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων του δικτύου, τη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη και τη μείωση των καθυστερήσεων στην παράδοση πολυμεσικού περιεχομένου. Συνδυάζοντας τις δυνατότητες των OTTP και των ISP, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του περιεχομένου και να εξασφαλίζει τη βέλτιστη ποιότητα εμπειρίας για τον τελικό χρήστη.

## 7.4 Προσεγγίσεις Ευαισθητοποιημένες/Καθοδηγούμενες από την QoE Χρησιμοποιώντας Πλήρη Υιοθέτηση του SDN και NFV

Η ενσωμάτωση του SDN και του NFV παρέχει νέες δυνατότητες για την παρακολούθηση και διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) σε δίκτυα. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και αποτελεσματικότητα σε σύγκριση με παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται αποκλειστικά σε μία από τις δύο (SDN ή NFV). Η ταυτόχρονη χρήση των δύο τεχνολογιών επιτρέπει καλύτερη διαχείριση της πολυμεσικής κίνησης (π.χ. βίντεο) και βελτιωμένη τοποθέτηση των σημείων μέτρησης QoE στο δίκτυο (Bari, Chowdhury, Ahmed, Boutaba & Bouten, 2013).

Ένα παράδειγμα χρήσης της ενσωμάτωσης SDN και NFV είναι η ανάπτυξη προηγμένων δικτύων κινητής τηλεφωνίας, όπως προτείνεται από διάφορες μελέτες, με ενδεικτικά παραδείγματα το SoftRAN και το CellSDN. Αυτές οι αρχιτεκτονικές χρησιμοποιούν και τις δύο τεχνολογίες για να βελτιώσουν τη διαχείριση της κυκλοφορίας και να προσφέρουν πιο αποδοτική διανομή υπηρεσιών. Η "QoE-softwarized" αρχιτεκτονική είναι ένα άλλο παράδειγμα που προτείνει πλήρη υιοθέτηση του SDN και του NFV για τη διαχείριση της QoE.

Καθώς οι τεχνολογίες SDN και NFV ωριμάζουν και υιοθετούνται στα μελλοντικά δίκτυα 5G, αναδύονται νέες δυνατότητες. Η αρχιτεκτονική NFV με έλεγχο μέσω λογισμικού μπορεί να προσφέρει ενεργή καθοδήγηση της κυκλοφορίας δεδομένων και βελτιστοποίηση των λειτουργιών του δικτύου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό συμβάλλει στην καλύτερη διαχείριση της QoE, προσφέροντας πιο ευέλικτη κατανομή εύρους ζώνης ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, όπως π.χ. οι εφαρμογές βίντεο στα οικιακά δίκτυα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προσέγγισης είναι το έργο SELFNET, που στοχεύει στην ανάπτυξη αισθητήρων και ενεργοποιητών στο δίκτυο. Αυτοί οι αισθητήρες παρακολουθούν την κατάσταση του δικτύου και ανιχνεύουν προβλήματα που ενδέχεται να επηρεάσουν την QoE των χρηστών. Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποιο πρόβλημα, λαμβάνονται διορθωτικές ή προληπτικές ενέργειες για την αποκατάσταση της ποιότητας υπηρεσίας (Li, Wang, Yang & Luo, 2017). Ένας από τους στόχους της χρήσης του SDN και του NFV είναι η αυτοματοποίηση της διαχείρισης του δικτύου. Χρησιμοποιώντας τεχνικές μηχανικής μάθησης, το δίκτυο μπορεί να προσαρμόζεται δυναμικά στις απαιτήσεις των χρηστών και να εξασφαλίζει την βέλτιστη ποιότητα εμπειρίας χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ένα

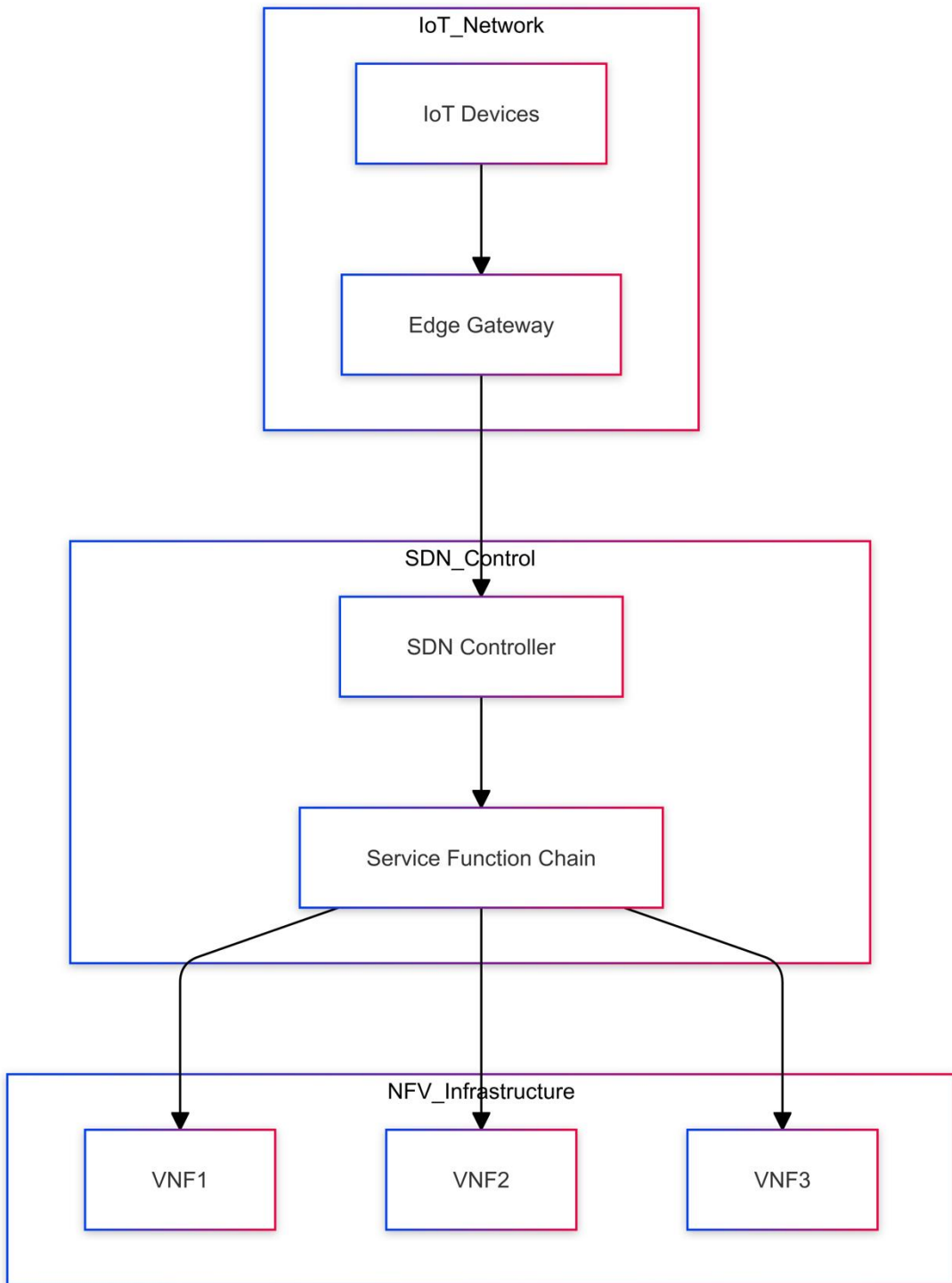
τέτοιο αυτόνομο σύστημα διαχείρισης μπορεί να βελτιστοποιεί τους πόρους του δικτύου και να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κίνησης, εξασφαλίζοντας την καλύτερη δυνατή απόδοση για τις εφαρμογές πολυμέσων Bari et al. 2013).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την υποστήριξη διαφορετικών υπηρεσιών με ποικίλες απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) και ποιότητας εμπειρίας (QoE). Για παράδειγμα, μια αρθρωτή αρχιτεκτονική που αναπτύσσεται με SDN και NFV μπορεί να προσαρμόζει τις λειτουργίες του δικτύου ανάλογα με τις ανάγκες του εκάστοτε χρήστη ή υπηρεσίας. Αυτό επιτρέπει στους παρόχους να μοιράζονται πόρους και να παρέχουν ευέλικτες λύσεις διασύνδεσης, βελτιστοποιώντας παράλληλα την απόδοση του δικτύου για τις διαφορετικές υπηρεσίες που υποστηρίζονται (Li et al. 2017).

Η συζήτηση αυτή δείχνει την αυξανόμενη σημασία των τεχνολογιών SDN και NFV για τη διαχείριση της QoE στα μελλοντικά δίκτυα. Η ικανότητά τους να βελτιώνουν την απόδοση του δικτύου και να προσφέρουν πιο αποδοτική παράδοση υπηρεσιών στους χρήστες θα είναι κρίσιμη για την επιτυχία των δικτύων 5G. Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί, η ενσωμάτωση των SDN και NFV στα μελλοντικά δίκτυα παραμένει ένα ενεργό πεδίο έρευνας, με πολλές δυνατότητες για περαιτέρω ανάπτυξη και βελτίωση.

Το διάγραμμα 4 παρουσιάζει τη δικτύωση IoT μέσω του SDN και NFV. Οργανώνεται σε τρία επίπεδα: το IoT Network, το SDN Control και το NFV Infrastructure. Δείχνει πώς οι συσκευές IoT (IoT Devices) συνδέονται με ένα Edge Gateway, το οποίο αλληλεπιδρά με τον SDN Controller. Ο SDN Controller διαχειρίζεται τις υπηρεσίες μέσω της Service Function Chain, η οποία συνδέεται με εικονικοποιημένες δικτυακές λειτουργίες (VNF) που βρίσκονται στην υποδομή NFV.





**Διάγραμμα 4. Διάγραμμα Δικτύωσης για IoT Υπηρεσίες μέσω SDN και NFV**



## Κεφάλαιο 8. Παραδείγματα προσαρμοστικών υπηρεσιών ροής πολυμέσων με χρήση αναδυόμενων τεχνολογιών δικτύωσης

Τα SDN και NFV αποτελούν σύγχρονες τεχνολογίες που βελτιώνουν τη διαχείριση και τον έλεγχο των δικτύων, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) για τους χρήστες. Το SDN αποσυνδέει τη λειτουργία του δικτύου από τη φυσική υποδομή, επιτρέποντας την κεντρική διαχείριση της δικτύωσης μέσω λογισμικού. Από την άλλη πλευρά, το NFV επιτρέπει την εικονικοποίηση δικτυακών λειτουργιών, οι οποίες συνήθως εκτελούνται σε εξειδικευμένο υλικό, σε γενικούς servers, ενισχύοντας την ευελιξία και την κλιμακωτότητα των δικτύων. Η εφαρμογή των τεχνολογιών SDN και NFV σε αναδυόμενες αρχιτεκτονικές, όπως το MEC, το fog/cloud computing, και το ICN, μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη για την ποιότητα της εμπειρίας βίντεο. Το MEC (Multi-Access Edge Computing) είναι μια αρχιτεκτονική που φέρνει υπολογιστικούς πόρους πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, δηλαδή στην άκρη του δικτύου. Αυτό επιτρέπει υψηλότερη ταχύτητα και χαμηλότερη καθυστέρηση, γεγονός που είναι κρίσιμο για εφαρμογές όπως η ροή βίντεο υψηλής ποιότητας (π.χ. 4K βίντεο) (Liang & Yu, 2015).

Μία σημαντική προσέγγιση στο MEC είναι η δημιουργία αρχιτεκτονικής που υποστηρίζεται από SDN και NFV για τη βελτίωση της QoE. Σε αυτό το πλαίσιο, προτείνεται μια λύση που περιλαμβάνει έναν μηχανισμό παρακολούθησης της QoE που λαμβάνει υπόψη τον τύπο της δικτυακής πρόσβασης (π.χ., 4G, 5G), την τοπολογία του δικτύου και την κατανομή των πόρων. Επίσης, προτείνεται μια προσέγγιση κινητής εικονικοποίησης που περιλαμβάνει προφόρτωση βίντεο με γνώση του περιεχομένου (MVP), για να διασφαλιστεί η υψηλή QoE κατά την παράδοση 4K βίντεο κατ' απαίτηση.

Η προσέγγιση MVP εκτελεί διάφορες λειτουργίες για την ενίσχυση της QoE. Πρώτον, πραγματοποιεί προσαρμοστική προφόρτωση βίντεο, όπου τα τμήματα βίντεο κατεβαίνουν εκ των προτέρων, ανάλογα με την πρόοδο του αιτήματος του χρήστη. Δεύτερον, παρακολουθεί και προβλέπει την κίνηση του δικτύου, προσαρμόζοντας τη ποιότητα του βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Τρίτον, προσαρμόζει τη ποιότητα του βίντεο με βάση τις πληροφορίες που συγκεντρώνονται σε πραγματικό χρόνο από το χρήστη και το δίκτυο (Medhat, Taleb, Elmagoush & Carella, 2016). Τέλος, οι πάροχοι περιεχομένου μπορούν να αναπτύξουν και να ενσωματώσουν πολιτικές αποθήκευσης και προφόρτωσης χρησιμοποιώντας εικονικοποιημένους πόρους στο MEC. Αυτοί οι

πόροι περιλαμβάνουν αποθήκευση και υπολογιστική ισχύ που είναι διαθέσιμη μέσω εικονικών λειτουργιών δικτύου, επιτρέποντας έτσι τη βελτιστοποίηση της παράδοσης του περιεχομένου και την ενίσχυση της ποιότητας εμπειρίας των χρηστών.

## **8.1 Προσαρμοστική Ροή με Επίγνωση της QoE μέσω Cloud/Fog Computing**

Το Fog computing και το cloud computing λειτουργούν σε ένα κατακευματισμένο υπολογιστικό περιβάλλον, επεκτείνοντας τις υπηρεσίες του cloud πιο κοντά στους τελικούς χρήστες, δηλαδή στο άκρο του δικτύου (edge). Αυτό επιτρέπει την επεξεργασία δεδομένων τοπικά, πιο κοντά στις συσκευές χρηστών ή σε συσκευές Internet of Things. Σε αντίθεση με το MEC (Mobile Edge Computing) και το cloudlet, που έχουν ανεξάρτητη λειτουργία στο άκρο του δικτύου, το fog computing εξαρτάται από τη σύνδεσή του με το cloud για τη λειτουργία του. Το Fog computing δεν είναι αυτοδύναμο και χρειάζεται το cloud για να επεξεργάζεται και να αποθηκεύει δεδομένα σε μεγαλύτερη κλίμακα (Hong, Lillethun, Ramachandran, Ottenwälder & Koldehofe, 2013). Σε σχέση με τη διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) των χρηστών, προτάθηκε η αρχιτεκτονική SDFog, η οποία είναι σχεδιασμένη για να διαχειρίζεται πόρους και ροές δεδομένων με γνώμονα την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) και την ποιότητα εμπειρίας (QoE). Το SDFog προσφέρει μια προσέγγιση που προσανατολίζεται στις υπηρεσίες για τη διαχείριση των πόρων σε ένα κατακευματισμένο περιβάλλον fog computing. Αυτό περιλαμβάνει δύο κύρια στοιχεία: το Service Oriented Middleware (SOM) και τη Distributed Service Orchestration Engine (DSOE). Το DSOE αναλαμβάνει τη διαχείριση των υπηρεσιών, ανακαλύπτοντας υπηρεσίες, δημιουργώντας ροές δεδομένων και κατανέμοντας τους πόρους δικτύου με βάση τις απαιτήσεις QoS και QoE των χρηστών.

Για τα δίκτυα 5G, οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται στο SDN και το NFV μπορούν να συντονίζουν πόρους πολλαπλών τεχνολογιών και τομέων, χρησιμοποιώντας cloud και fog computing. Μια ενιαία στρατηγική για την αλυσίδα υπηρεσιών δικτύου (Network Service Chain - NSC) επιτρέπει την ταχύτερη επεξεργασία υπηρεσιών σε ένα περιβάλλον cloud και fog. Αυτό σημαίνει ότι υπηρεσίες βίντεο μπορούν να μεταφερθούν από το cloud στους κόμβους fog, βελτιώνοντας την απόδοση του δικτύου και μειώνοντας την καθυστέρηση για τους χρήστες (Yi, Hao, Qin & Li, 2015).

Η αρχιτεκτονική fog computing που βασίζεται στο SDN και λειτουργεί σε πολλαπλά επίπεδα, επιτρέπει την άμεση συνεργασία μεταξύ fog και cloud για την παροχή υπηρεσιών βίντεο με υποστήριξη QoE. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μεταφορά της επεξεργασίας δεδομένων και υπηρεσιών βίντεο από το κεντρικό cloud σε τοπικούς κόμβους fog, μειώνοντας τη συμφόρηση στο βασικό δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο, οι κινητοί χρήστες μπορούν να απολαμβάνουν υπηρεσίες βίντεο με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή QoE χωρίς να υπερφορτώνεται το δίκτυο (Yi et al. 2015).

Μια από τις σημαντικότερες προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της QoE σε fog και cloud computing αφορά την ανάλυση παραμέτρων όπως η διαμεταγωγή (throughput), η καθυστέρηση (latency), και η ενεργειακή απόδοση ανά χρήστη για διάφορα φορτία δεδομένων. Η δικαιοσύνη στη συνεργασία μεταξύ των κόμβων fog είναι επίσης σημαντική, καθώς υπάρχει βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και της QoE, ενώ διασφαλίζεται δίκαιη κατανομή πόρων σε όλα τα επίπεδα του fog.

Μια προτεινόμενη στρατηγική για την καλύτερη διαχείριση των πόρων στο fog computing είναι η τοποθέτηση εφαρμογών με επίγνωση της QoE. Αυτό σημαίνει ότι λαμβάνεται υπόψη η τρέχουσα κατάσταση των κόμβων fog, και γίνεται προτεραιοποίηση των αιτημάτων των χρηστών ανάλογα με τις ανάγκες και τις προσδοκίες τους. Ένα παράδειγμα είναι το MeFoRE (MEdia FOg Resource Estimation), το οποίο εκτιμά τους πόρους στο fog και βελτιώνει την ποιότητα υπηρεσίας (QoS) σε περιβάλλοντα IoT (Hong et al. 2013).

Τέλος, μια ενδιαφέρουσα στρατηγική είναι η Fog-assisted Real-time QoE Prediction (FRQP), η οποία προβλέπει την ποιότητα εμπειρίας (QoE) σε ροές βίντεο DASH χρησιμοποιώντας κόμβους fog. Αυτή η στρατηγική παρακολουθεί δεδομένα από την κίνηση του δικτύου και αναλύει τις ροές δεδομένων βίντεο για να εκτιμήσει την ποιότητα που αντιλαμβάνονται οι χρήστες, με βάση χαρακτηριστικά όπως η καθυστέρηση και οι διακοπές στις ροές βίντεο. Το ICN (Information-Centric Networking) είναι μια νέα αρχιτεκτονική δικτύων που προτείνει τη μετάβαση από το παραδοσιακό μοντέλο δικτύωσης, το οποίο βασίζεται σε υπολογιστές, σε ένα μοντέλο που επικεντρώνεται στο περιεχόμενο. Στο ICN, το περιεχόμενο, όπως τα δεδομένα και οι πληροφορίες, είναι το κύριο αντικείμενο και γίνεται άμεσα διαθέσιμο στους χρήστες, χωρίς να χρειάζεται να συνδεθούν με συγκεκριμένους κεντρικούς υπολογιστές.

## 8.2 AR/VR, Cloud Gaming και Mulsemmedia (πολυαισθητηριακά μέσα)

Αυτή η ενότητα παρέχει μελέτες QoE σε αναδυόμενες εμπυθιστικές εφαρμογές, εστιάζοντας στην επαυξημένη πραγματικότητα (AR) και την εικονική πραγματικότητα (VR), τα πολυαισθητηριακά μέσα (MULSEMEDIA), το cloud gaming και τις εφαρμογές light field (πεδίου φωτός).

### 8.2.1 QoE σε Εφαρμογές Εμβύθισης AR/VR και Mulsemmedia

Η χρήση των βίντεο 360° και της εικονικής πραγματικότητας (VR) σημειώνει εκρηκτική άνοδο τα τελευταία χρόνια. Τα βίντεο 360° προσφέρουν μια πλήρως εμπυθιστική εμπειρία, επιτρέποντας στους χρήστες να εξερευνούν τον εικονικό κόσμο από κάθε γωνία. Ωστόσο, αυτά τα βίντεο είναι σημαντικά μεγαλύτερα σε μέγεθος σε σύγκριση με τα παραδοσιακά βίντεο 2D, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένες ανάγκες σε εύρος ζώνης για τη μετάδοσή τους μέσω διαδικτύου. Σύμφωνα με τις προβλέψεις, η παγκόσμια αγορά καμερών 360° αναμένεται να αυξηθεί με ετήσιο ρυθμό 35% μεταξύ 2016 και 2020, ενώ η αγορά συσκευών VR εκτιμάται ότι θα φτάσει τα 30 δισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2020. Η αύξηση αυτών των τεχνολογιών δημιουργεί νέες απαιτήσεις για το δίκτυο, καθώς οι πάροχοι υπηρεσιών καλούνται να ανταποκριθούν στους περιορισμούς του εύρους ζώνης, να μειώσουν την καθυστέρηση και να βελτιώσουν την συνολική Ποιότητα Εμπειρίας των χρηστών (La Viola, Kruijff, McMahan, Bowman & Rourygen, 2017).

Με την αύξηση της δημοτικότητας των AR και VR εφαρμογών, οι πάροχοι υπηρεσιών βρίσκονται αντιμέτωποι με σοβαρές προκλήσεις που σχετίζονται με την αύξηση της κυκλοφορίας στο διαδίκτυο και τις απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση. Οι εφαρμογές AR/VR είναι εξαιρετικά ευαίσθητες στην καθυστέρηση του δικτύου, καθώς οι χρήστες αναμένουν άμεσες αντιδράσεις σε ό,τι βλέπουν και κάνουν στο εικονικό περιβάλλον. Για να βελτιωθεί η εμπειρία τους, οι πάροχοι θα πρέπει να μειώσουν την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου, ώστε να υποστηρίξουν καλύτερα τις υπηρεσίες ροής πολυμέσων σε πραγματικό χρόνο.

Μία από τις τεχνολογικές λύσεις που έχουν προταθεί για τη μείωση των απαιτήσεων εύρους ζώνης στα βίντεο 360° είναι η ροή εξαρτώμενη από την οπτική γωνία. Σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας, οι χρήστες μπορούν να επιλέγουν δυναμικά την οπτική γωνία που προτιμούν. Αυτή η τεχνική λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε το μέρος του βίντεο που παρακολουθεί ενεργά ο χρήστης να προβάλλεται σε υψηλή ανάλυση,

ενώ οι περιοχές που βρίσκονται εκτός του οπτικού πεδίου εμφανίζονται σε χαμηλότερη ποιότητα. Αυτό μειώνει σημαντικά την κίνηση των δεδομένων στο δίκτυο χωρίς να επηρεάζει την ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη (La Viola et al. 2017).

Η Ποιότητα Εμπειρίας μετράται και αξιολογείται σε συστήματα AR και VR χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές, συμπεριλαμβανομένων και φυσιολογικών μετρήσεων. Έρευνες έχουν δείξει ότι αισθητήρες όπως το Ηλεκτροκαρδιογράφημα (ECG), ο αισθητήρας θερμοκρασίας δέρματος και η αγωγιμότητα του δέρματος (GSR) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση της εμπειρίας των χρηστών κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασής τους με εμβυθιστικά συστήματα. Αυτές οι μετρήσεις παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την απόκριση των χρηστών και τη βελτίωση της QoE (Dastjerdi & Buyya, 2016).

Τα πολυαισθητηριακά μέσα (MULSEMEDIA) είναι μια νέα προσέγγιση στα πολυμέσα, όπου συνδυάζονται πολλαπλές ανθρώπινες αισθήσεις στην αλληλεπίδραση χρήστη-υπολογιστή. Πέρα από τον ήχο και την εικόνα, τα μέσα αυτά μπορούν να περιλαμβάνουν οσμές, απτικά εφέ και αλλαγές θερμοκρασίας, προσφέροντας μια πιο πλούσια εμπειρία. Για παράδειγμα, ένα βίντεο 360° θα μπορούσε να περιλαμβάνει αισθητηριακά εφέ που επιτρέπουν στον χρήστη να νιώσει τον άνεμο ή να μυρίσει μια συγκεκριμένη οσμή κατά τη διάρκεια της παρακολούθησης. Αυτές οι νέες υπηρεσίες απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης και αυστηρότερο έλεγχο καθυστέρησης για να διασφαλιστεί η άμεση απόκριση των πολυαισθητηριακών εφέ (Dastjerdi & Buyya, 2016).

Οι ζωντανές εμπειρίες VR 360° επιτρέπουν στους χρήστες να συμμετέχουν σε διάφορες δραστηριότητες και εκδηλώσεις χωρίς να χρειάζεται να μετακινηθούν φυσικά. Αυτή η τεχνολογία υπόσχεται να φέρει μεγάλες αλλαγές στην ψυχαγωγία και τις κοινωνικές εμπειρίες. Ωστόσο, η παράδοση περιεχομένου VR είναι μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, καθώς απαιτεί πιο ακριβείς τεχνικές σε σχέση με τα παραδοσιακά βίντεο, όπως το 4K. Η QoE των χρηστών μπορεί να επηρεαστεί από διάφορες παραμέτρους, όπως καθυστερήσεις, παραμορφώσεις ή άλλες βλάβες κατά τη μετάδοση, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη νέων συστημάτων που μπορούν να εντοπίζουν και να επιλύουν αυτά τα προβλήματα σε πραγματικό χρόνο.

### **8.2.2 QoE σε Εφαρμογές Ροής Βίντεο για Cloud Gaming**

Η παρούσα ενότητα αναφέρεται σε δύο βασικές μορφές υπηρεσιών ροής βίντεο για gaming που γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς. Πιο συγκεκριμένα η παθητική ροή βίντεο

gaming αναφέρεται σε υπηρεσίες όπου οι παίκτες παίζουν παιχνίδια και το gameplay τους μεταδίδεται σε πραγματικό χρόνο μέσω πλατφορμών όπως το Twitch.tv, το YouTube-Gaming ή το Facebook Gaming. Οι θεατές μπορούν να παρακολουθούν το παιχνίδι, αλλά δεν συμμετέχουν ενεργά. Είναι ουσιαστικά μια εμπειρία παρακολούθησης, όπως η παρακολούθηση βίντεο ή ζωντανών ροών (live streams). Οι απαιτήσεις για το δίκτυο είναι παρόμοιες με εκείνες της παραδοσιακής ροής βίντεο, όπως το Netflix ή το YouTube, αλλά με την επιπλέον πρόκληση της ζωντανής μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο. Η ποιότητα της μετάδοσης εξαρτάται κυρίως από τη σταθερότητα της σύνδεσης, το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση της ροής (Claypool & Claypool, 2010). Στο cloud gaming, το παιχνίδι δεν "τρέχει" στον υπολογιστή του χρήστη, αλλά στους διακομιστές μιας εταιρείας (δηλαδή στο cloud). Το παιχνίδι αποδίδεται στους διακομιστές και στη συνέχεια η gameplay εμπειρία του χρήστη "ρέει" στον υπολογιστή ή τη συσκευή του ως βίντεο. Ένα παράδειγμα τέτοιας υπηρεσίας είναι το GeForceNow της Nvidia. Εδώ, η υπηρεσία cloud gaming λειτουργεί σαν μια εφαρμογή όπου ο χρήστης στέλνει εντολές (π.χ. κινήσεις του ποντικιού ή πληκτρολογίου) και λαμβάνει πίσω το βίντεο από το παιχνίδι που εκτελείται στο cloud. Αυτός ο τύπος υπηρεσίας είναι εξαιρετικά απαιτητικός από άποψης καθυστέρησης (latency), καθώς χρειάζεται γρήγορη απόκριση μεταξύ της εισόδου του χρήστη και της αντίδρασης του παιχνιδιού (Claypool & Claypool, 2010).

Και οι δύο αυτές υπηρεσίες έχουν διαφορετικές ανάγκες όσον αφορά το δίκτυο. Για την παθητική ροή βίντεο, το κύριο ζήτημα είναι η ποιότητα της εικόνας και το εύρος ζώνης που απαιτείται για τη μετάδοση. Στο cloud gaming, ωστόσο, η καθυστέρηση είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο, καθώς οποιαδήποτε καθυστέρηση στην απόκριση του παιχνιδιού μπορεί να μειώσει δραματικά την εμπειρία του χρήστη (QoE). Για να επιτευχθεί χαμηλή καθυστέρηση, απαιτείται μια πολύ πιο σύνθετη προσέγγιση στη διαχείριση δικτύου.

Το Software-Defined Networking είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει μεγαλύτερο έλεγχο και ευελιξία στη διαχείριση του δικτύου. Μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανομή της ροής δεδομένων, μειώνοντας την καθυστέρηση για εφαρμογές όπως το cloud gaming. Με το SDN, οι ερευνητές προτείνουν μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως ο τύπος του παιχνιδιού, το φορτίο του διακομιστή και η καθυστέρηση στη διαδρομή του δικτύου, ώστε να επιλέγονται οι βέλτιστες διαδρομές για τη ροή του παιχνιδιού. Για να απλοποιηθεί αυτή η διαδικασία, χρησιμοποιείται μια μέθοδος που ονομάζεται Lagrangian Relaxation, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί μέσω του OpenFlow,

ενός πρωτοκόλλου για την επικοινωνία του SDN ελεγκτή με τις συσκευές δικτύου. Αυτό μειώνει την πολυπλοκότητα και τη συνολική καθυστέρηση (Jarschel, Schlosser, Scheuring & Hofsfeld, 2013).

Για να διασφαλιστεί ότι αυτές οι υπηρεσίες προσφέρουν καλή εμπειρία στους χρήστες, υπάρχουν εργασίες τυποποίησης που στοχεύουν στη μέτρηση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE). Η ITU-T, ο διεθνής οργανισμός τηλεπικοινωνιών, έχει αναπτύξει προτάσεις που βοηθούν στη μέτρηση της QoE για τα παιχνίδια. Οι συστάσεις G.1032 και P.809 καθορίζουν πώς μπορούν να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα εμπειρίας του χρήστη και πώς να αξιολογηθεί αυτή υποκειμενικά (βάσει της αίσθησης των χρηστών) και αντικειμενικά (μετρήσεις βάσει δεδομένων).

Υπάρχουν επίσης προσπάθειες τυποποίησης που προσπαθούν να δημιουργήσουν μοντέλα πρόβλεψης της ποιότητας εμπειρίας (QoE) στο gaming. Το έργο G.OMG προσπαθεί να αναπτύξει ένα μοντέλο που θα μπορεί να προβλέπει την ποιότητα εμπειρίας με βάση παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά του δικτύου, το σύστημα και η αλληλεπίδραση του παίκτη. Παράλληλα, οι ερευνητές ασχολούνται με τη δημιουργία συνόλων δεδομένων που βοηθούν στην αξιολόγηση της ποιότητας των βίντεο gaming, αναπτύσσοντας νέες μεθόδους για την αξιολόγηση της εμπειρίας του χρήστη χωρίς την ανάγκη αναφοράς από τον ίδιο (Jarschel et al. 2013).

Συνοψίζοντας η ροή βίντεο για gaming περιλαμβάνει δύο κύριες μορφές: την παθητική ροή (όπου οι θεατές παρακολουθούν) και το cloud gaming (όπου οι χρήστες παίζουν μέσω του cloud). Και οι δύο μορφές απαιτούν διαφορετικά είδη διαχείρισης δικτύου, με το cloud gaming να είναι πιο απαιτητικό όσον αφορά την καθυστέρηση. Νέες τεχνολογίες, όπως το SDN, μπορούν να βελτιστοποιήσουν την κατανομή της ροής και να μειώσουν την καθυστέρηση. Επιπλέον, η τυποποίηση της QoE και η έρευνα σε αυτόν τον τομέα βοηθούν στη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών.



## Κεφάλαιο 9. Προκλήσεις διαχείρισης προσαρμοστικών υπηρεσιών ροής πολυμέσων και κατευθύνσεις έρευνας σε επόμενες γενιές δικτύων

Οι τεχνολογίες SDN, NFV, MEC και το cloud computing έχουν αρχίσει να ωριμάζουν, προσφέροντας νέες δυνατότητες και μετασχηματίζοντας το μέλλον της υποδομής δικτύων. Το SDN επιτρέπει την ευέλικτη διαχείριση του δικτύου μέσω λογισμικού, αποσυνδέοντας το επίπεδο ελέγχου από το επίπεδο δεδομένων, γεγονός που καθιστά πιο εύκολη και γρήγορη την προσαρμογή των λειτουργιών. Το NFV μεταφέρει βασικές λειτουργίες δικτύου σε εικονικά περιβάλλοντα, μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την αποδοτικότητα, ενώ το MEC φέρνει την υπολογιστική ισχύ πιο κοντά στους χρήστες, μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την ταχύτητα απόκρισης σε πραγματικό χρόνο. Το cloud computing, από την άλλη πλευρά, επιτρέπει την αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων σε απομακρυσμένους διακομιστές, χωρίς την ανάγκη φυσικής υποδομής, επιτρέποντας την κλιμάκωση και την ευελιξία (Mijumbi, Serrat, Gorricho, Bouten, De Turck & Boutaba, 2016).

Όλες αυτές οι τεχνολογίες υπόσχονται να προσφέρουν ευελιξία στην ανάπτυξη και τη λειτουργία των δικτύων, βελτιώνοντας τη διαχείριση και την κατανομή των πόρων, με στόχο την παροχή της βέλτιστης ποιότητας εμπειρίας (QoE) στους τελικούς χρήστες. Ωστόσο, παρά τα σημαντικά οφέλη, αναδύονται νέες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Καθώς αυτά τα δίκτυα γίνονται πιο σύνθετα, η διαχείριση της πολυπλοκότητας και ο συντονισμός των διαφόρων τεχνολογιών σε πραγματικό χρόνο αποτελούν σημαντικά ζητήματα. Η ανάπτυξη και η υλοποίηση λύσεων που θα επιτρέπουν την προσαρμοστική ροή δεδομένων με επίγνωση της ποιότητας εμπειρίας των χρηστών είναι μια κρίσιμη ερευνητική κατεύθυνση. Αυτό περιλαμβάνει την εύρεση τρόπων για να βελτιστοποιηθεί η κατανομή των πόρων, να μειωθούν οι καθυστερήσεις και να διασφαλιστεί η βέλτιστη εμπειρία χρήστη, ειδικά σε πολυμεσικές εφαρμογές που είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στην απόδοση δικτύου. Αυτή η ενότητα παρέχει μια συζήτηση για τις σημαντικές μελλοντικές προκλήσεις και τις νέες ερευνητικές ευκαιρίες που μπορούν να διερευνηθούν από όσους επικεντρώνονται στον τομέα της προσαρμοστικής ροής με επίγνωση QoE και στον μελλοντικό τομέα διαχείρισης δικτύου (Mijumbi et al. 2016).



Η μετακίνηση των παλαιού τύπου λειτουργιών δικτύου (NF) από μια υλικοκεντρική προσέγγιση σε μια λογισμικοκεντρική, μέσω της χρήσης τεχνολογιών όπως το SDN και το NFV, απαιτεί σημαντικές αλλαγές στον τρόπο ανάπτυξης, διαχείρισης και ενορχήστρωσης των πόρων δικτύου. Αυτή η μετάβαση αποσκοπεί στη βελτίωση της ευελιξίας και της αποδοτικότητας των δικτύων, διασφαλίζοντας ότι οι λειτουργίες δικτύου μπορούν να αναπτυχθούν και να προσαρμόζονται κατά παραγγελία, σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών και των υπηρεσιών. Ένα σημαντικό πλαίσιο που προτείνει λύσεις για τη διαχείριση αυτών των νέων δικτυακών λειτουργιών είναι το ETSI MANO, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης του κύκλου ζωής και της διαμόρφωσης των Εικονικών Δικτυακών Λειτουργιών. Παράλληλα με αυτό, έχουν εμφανιστεί και άλλες πλατφόρμες, όπως το Cloud4NFV και το NetFATE, οι οποίες εστιάζουν στην παροχή λύσεων για τη διαχείριση των VNFs, λαμβάνοντας υπόψη την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών (QoE) κατά την ενορχήστρωση των εικονικών λειτουργιών (Kreutz, Ramos, Verissimo, Rothenberg, Azodolmolky & Uhlig, 2015).

Βασιζόμενα στο πλαίσιο του ETSI NFV, προγράμματα όπως το ECOMP της AT&T, το Open Source MANO (OSM) και το ONAP έχουν αναπτύξει λειτουργίες Service Orchestrator (SO) που επιτρέπουν τη διαχείριση μεγάλων κλιμάκων υπηρεσιών και την ενορχήστρωση τόσο φυσικών όσο και εικονικών λειτουργιών δικτύου. Το ONAP, για παράδειγμα, παρέχει εργαλεία για το σχεδιασμό, την ανάλυση και τη διαχείριση του κύκλου ζωής των υπηρεσιών, ενώ το OPNFV προσφέρει μια πλατφόρμα αναφοράς για την επιτάχυνση της υιοθέτησης του NFV από τις επιχειρήσεις. Ωστόσο, το OSM από το ETSI NFV εργάζεται σε ένα πλαίσιο αναφοράς που ενσωματώνει πλατφόρμες ανοιχτού κώδικα (OpenMANO, RIFT.ware και JUJU) σε μια ενιαία πλατφόρμα για τη διαχείριση των VNFs. Ενώ αυτές οι πλατφόρμες επικεντρώνονται στη διαχείριση του NFV, υπάρχει ακόμα η ανάγκη για ολοκληρωμένες λύσεις που θα συνδυάζουν τόσο τη διαχείριση των πόρων του SDN όσο και του NFV, ειδικά στο πλαίσιο των δικτύων 5G, για τη βελτίωση της ποιότητας εμπειρίας (QoE) σε πολυμεσικές υπηρεσίες (Kreutz et al. 2015).

Παράλληλα, η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών όπως το SDN, το WNV (Wireless Network Virtualization) και το C-RAN (Cloud Radio Access Network) προσφέρει νέες δυνατότητες για τη διαχείριση μελλοντικών ετερογενών ασύρματων δικτύων. Η εικονικοποίηση των ασύρματων δικτύων (VWN) αποσκοπεί στην πιο αποτελεσματική χρήση των πόρων, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος για τους παρόχους υπηρεσιών, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει την εμπειρία των τελικών χρηστών. Σε αυτά τα δίκτυα, οι

ραδιοπόροι και οι φυσικές υποδομές ανήκουν στους παρόχους υποδομής (InP), ενώ οι εικονικοί πάροχοι δικτύου (MVNO) διαχειρίζονται τους πόρους εικονικών δικτύων και παρέχουν υπηρεσίες στους τελικούς χρήστες, χωρίς να έχουν άμεση πρόσβαση στη φυσική υποδομή. Η διαχείριση των πόρων σε αυτά τα περιβάλλοντα γίνεται με βάση τις ανάγκες των χρηστών και την ποιότητα υπηρεσίας (QoS), όπως είναι η κάλυψη, η κινητικότητα και ο ρυθμός μεταφοράς δεδομένων.

Παρά τις δυνατότητες που προσφέρουν αυτές οι τεχνολογίες, εξακολουθούν να υπάρχουν ερευνητικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση της ποιότητας εμπειρίας (QoE). Αυτές περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων, τη λήψη αποφάσεων για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των εικονικών λειτουργιών και την εξασφάλιση ασφάλειας και απομόνωσης των πόρων, με βάση την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη νέων εργαλείων και προσεγγίσεων που θα λαμβάνουν υπόψη την ποιότητα εμπειρίας, την προσαρμοστικότητα στις απαιτήσεις των χρηστών και τη διαχείριση των πόρων μέσω ενός πιο ευέλικτου και αποδοτικού συστήματος (Kreutz et al. 2015).

## **9.1 OTT-ISP Συνεργατική διαχείριση υπηρεσιών σε δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό**

Η συνεργατική διαχείριση υπηρεσιών από OTTPs και ISPs παρουσιάζει πολλές προκλήσεις, κυρίως επειδή η παρακολούθηση και διαχείριση της ποιότητας της υπηρεσίας πρέπει να γίνεται με βάση τον ρόλο που διαδραματίζει κάθε οντότητα (OTTP και ISP). Ο OTTP μπορεί να παρακολουθεί την ποιότητα εμπειρίας (QoE) των εφαρμογών του με τη βοήθεια παθητικών ανιχνευτών που βρίσκονται στις συσκευές των τελικών χρηστών. Αυτοί οι ανιχνευτές συλλέγουν δεδομένα σχετικά με τη χρήση της εφαρμογής και τη δικτυακή της απόδοση, επιτρέποντας την αξιολόγηση της ποιότητας της υπηρεσίας που βιώνουν οι χρήστες. Μια λύση που προτείνεται είναι η κοινή χρήση αυτών των δεδομένων με τον ISP, ο οποίος θα μπορεί έτσι να διαχειρίζεται καλύτερα τους πόρους του δικτύου για τη βελτιστοποίηση της εμπειρίας των χρηστών.

Ωστόσο, η συχνότητα παρακολούθησης μέσω αυτών των ανιχνευτών είναι ένα σημαντικό ζήτημα. Αν η παρακολούθηση γίνεται σε υψηλή συχνότητα, η ακρίβεια των προβλέψεων QoE θα βελτιωθεί, αλλά θα αυξηθεί επίσης η επιβάρυνση στη συσκευή του

χρήστη, επηρεάζοντας τη χρήση της CPU, της μνήμης RAM και την κατανάλωση της μπαταρίας (Seufert, Schwind, Hoßfeld, Tran-Gia & Kaschub, 2016).

Επομένως, η σωστή επιλογή της συχνότητας παρακολούθησης αποτελεί μια πρόκληση που χρειάζεται περαιτέρω έρευνα. Για την επιτυχημένη διαχείριση υπηρεσιών με βάση την QoE, απαιτείται συνεχής επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των OTTP και των ISPs. Αυτή η ανταλλαγή πληροφοριών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω υποδομών υπολογιστικού νέφους, οι οποίες επιτρέπουν την αποθήκευση και ανάκτηση δεδομένων από τις βάσεις δεδομένων, διευκολύνοντας έτσι τη συνεργατική διαχείριση των υπηρεσιών. Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις σχετικά με τη χρονική καθυστέρηση (end-to-end delay) που μπορεί να προκύψει κατά τη μεταφορά των δεδομένων από τις βάσεις νέφους, κάτι που μπορεί να επηρεάσει την ταχύτητα των ενεργειών ελέγχου που χρειάζονται για τη βελτίωση της ποιότητας της υπηρεσίας σε περίπτωση υποβάθμισης (Seufert et al. 2016). Στο πλαίσιο αυτό, απαιτούνται επιπλέον έρευνες για τη βελτίωση της συνεργασίας μεταξύ OTTP και ISP, καθώς η αύξηση της συχνότητας ανταλλαγής πληροφοριών μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα των υπηρεσιών αλλά και να αυξήσει τον φόρτο δικτύου. Ειδικά όσον αφορά τις τεχνολογίες SDN και NFV, υπάρχει ανάγκη για βελτιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων (OPEX) και των κεφαλαιακών εξόδων (CAPEX) των δικτύων. Μια ακόμα πρόκληση αφορά τη διαχείριση του περιεχομένου που παρέχουν οι OTTP και πώς αυτό διανέμεται στους διακομιστές του ISP, κάτι που απαιτεί βελτίωση στη διαδικασία ισορρόπησης φορτίου, στην ανάκτηση περιεχομένου και στη μείωση της καθυστέρησης κατά τη διανομή, ιδίως σε περιπτώσεις ξαφνικής αυξημένης ζήτησης (π.χ. όταν πολλοί χρήστες συνδέονται ταυτόχρονα).

Επιπλέον, η συνεργατική διαχείριση υπηρεσιών μεταξύ OTTP και ISP, με στόχο τη βελτίωση του QoE, μπορεί να απαιτεί ειδικές συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών (SLA, Service Level Agreement) ή επιχειρηματικές συμφωνίες για τη διαχείριση διαφορετικών κατηγοριών υπηρεσιών για διαφορετικούς χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι η ποιότητα της υπηρεσίας μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη ή τις συμφωνίες των παρόχων, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές εμπειρίες υπηρεσίας για διαφορετικούς χρήστες (Clayman, Galis, Mamatas & Rubio-Loyola, 2014).

Τέλος, για να βελτιωθεί η συνεργατική διαχείριση του QoE, χρειάζονται αλγόριθμοι και μοντέλα πρόβλεψης QoE που θα επιτρέπουν την ακριβή πρόβλεψη της ποιότητας των πολυμεσικών υπηρεσιών, ειδικά για μακροχρόνια περιεχόμενα, όπως τα βίντεο. Επίσης,

πρέπει να ληφθούν υπόψη τομείς όπως η δικαιοσύνη στη διανομή υπηρεσιών και τα επιχειρηματικά μοντέλα που βασίζονται στην ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών (Clayman et al. 2014).

## **9.2 Επιχειρηματικά μοντέλα προσανατολισμένα στο QoE σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό**

Οι αναδυόμενες εφαρμογές στα μελλοντικά δίκτυα που βασίζονται στο λογισμικό (softwarized networks) απαιτούν νέες επιχειρηματικές προσεγγίσεις επικεντρωμένες στην ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών (QoE). Αυτές οι προσεγγίσεις είναι απαραίτητες για τους παρόχους υπηρεσιών όταν συνάπτουν συμβάσεις με τους πελάτες τους. Οι τρέχουσες συμβάσεις, γνωστές ως SLA, εστιάζουν στην ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service - QoS), η οποία βασίζεται κυρίως σε τεχνικές παραμέτρους, όπως η καθυστέρηση δικτύου και η ταχύτητα μετάδοσης. Ωστόσο, δεν επαρκούν για να καλύψουν τις νέες ανάγκες που προκύπτουν από τη χρήση της QoE, που αφορά άμεσα την εμπειρία του τελικού χρήστη. Για τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών, οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει να υιοθετήσουν νέα μοντέλα συμβάσεων που εστιάζουν στην ποιότητα ζωής του χρήστη, γνωστά ως ELA. Τα ELA είναι μια προέκταση των παραδοσιακών SLA, αλλά εστιάζουν περισσότερο στην ικανοποίηση του χρήστη από την εμπειρία του με την υπηρεσία, παρά σε τεχνικές μετρήσεις. Αυτό σημαίνει ότι αντί να εγγυώνται μόνο την ταχύτητα ή τη διαθεσιμότητα της σύνδεσης, τα ELA θα εγγυώνται μια συνολικά καλή εμπειρία, όπως η ομαλή ροή βίντεο ή η γρήγορη φόρτωση ιστοσελίδων (Martens & Ammar, 2016).

Η μετάβαση από SLA που βασίζονται σε QoS σε ELA που βασίζονται σε QoE παρουσιάζει πολλές προκλήσεις. Η δημιουργία μοντέλων που θα προβλέπουν την εμπειρία του χρήστη και θα την ενσωματώνουν στις επιχειρηματικές συμβάσεις αποτελεί μια σημαντική έρευνα για το μέλλον. Για παράδειγμα, χρειάζεται να μελετηθεί η επίδραση της κακής εμπειρίας στην απώλεια χρηστών, δηλαδή πόσοι χρήστες θα εγκαταλείψουν μια υπηρεσία αν η εμπειρία τους είναι κακή. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω μαθηματικών μοντέλων που θα συνδέουν την ποιότητα εμπειρίας με την πιθανότητα απώλειας χρηστών.

Άλλη πρόκληση είναι η τιμολόγηση των υπηρεσιών. Η επίδραση της τιμής στην ικανοποίηση του χρήστη, την προθυμία του να πληρώσει και την αντιληπτή ποιότητα της υπηρεσίας χρειάζεται να διερευνηθεί περαιτέρω. Η τιμή μιας υπηρεσίας μπορεί να

επηρεάσει σημαντικά την εμπειρία του χρήστη, και η διαχείριση αυτής της σχέσης αποτελεί ανοιχτό ερώτημα για τους ερευνητές (Martens & Ammar, 2016).

Στα δίκτυα 5G, προτείνεται μια νέα προσέγγιση για τη διαχείριση των πόρων δικτύου που βασίζεται στην QoE, γνωστή ως "μηδενικός συντελεστής QoE" (Zero QoE factor). Αυτή η μέθοδος στοχεύει στη διαχείριση των δικτυακών πόρων με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιείται η εμπειρία όλων των χρηστών, δίνοντας προτεραιότητα σε αυτούς που αντιμετωπίζουν προβλήματα. Η προσέγγιση αυτή διαφέρει από την παραδοσιακή μέθοδο "μηδενικού συντελεστή δεδομένων" (zero-rating), η οποία εστιάζει κυρίως στο να μην επιβαρύνονται ορισμένες εφαρμογές με χρεώσεις δεδομένων (Liotta, Exarchakos & Garroppo, 2015).

Συνολικά, για τη διαχείριση υπηρεσιών στα μελλοντικά δίκτυα, οι πάροχοι υπηρεσιών πρέπει να επικεντρωθούν στην ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη (QoE) και να αναπτύξουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα (ELA) που να ανταποκρίνονται στις ανάγκες αυτές. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορέσουν να παρέχουν καλύτερες υπηρεσίες και να αυξήσουν την ικανοποίηση των χρηστών, προωθώντας παράλληλα καινοτόμες επιχειρηματικές πρακτικές (Liotta et al. 2015).

### **9.3 Έξυπνες στρατηγικές μεγάλων δεδομένων που βασίζονται σε QoE σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό**

Σήμερα, ο όγκος δεδομένων που παράγεται από διάφορες πηγές, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, οι ιστότοποι κοινωνικής δικτύωσης (Facebook, Twitter, Flickr), και άλλες πλατφόρμες, είναι τεράστιος και συνεχώς αυξάνεται. Με τον ρυθμό αυτό, οι παραδοσιακές μέθοδοι μέτρησης της απόδοσης δικτύου και εφαρμογών, οι οποίες βασίζονται σε στατικές μετρήσεις, δεν θα είναι πλέον επαρκείς για να αντεπεξέλθουν στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες των μελλοντικών δικτύων που βασίζονται σε λογισμικό (softwarized networks). Αυτή η πρόκληση δημιουργεί την ανάγκη για νέες μεθόδους ανάλυσης δεδομένων που θα είναι ικανές να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις αυτής της νέας εποχής (Li, Secci, Nguyen & Cheriet, 2017).

Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, η ανάπτυξη ενός δυναμικού μοντέλου που βασίζεται στην ποιότητα της εμπειρίας του χρήστη (QoE) για την ανάλυση των μεγάλων δεδομένων είναι κρίσιμη. Αυτό το μοντέλο θα χρειαστεί την υποστήριξη της Μηχανικής Μάθησης (ML, Machine Learning) και της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI, Artificial Intelligence). Η ML και η AI μπορούν να βοηθήσουν στην ανάλυση και την επεξεργασία

μεγάλων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας αυτοβελτιστοποίηση και αυτοθεραπεία για τα μελλοντικά δίκτυα. Αντί να βασίζονται σε στατικές, εργαστηριακές μετρήσεις, αυτά τα εργαλεία θα μπορούν να προσαρμόζονται δυναμικά στις συνθήκες του δικτύου και στις ανάγκες των χρηστών. Το SDN μπορεί να προσφέρει λύσεις σε πολλά ζητήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση μεγάλων δεδομένων.

Για παράδειγμα, το SDN μπορεί να βελτιώσει την απόκτηση, την επεξεργασία, τη μετάδοση και την παράδοση μεγάλων δεδομένων στα κέντρα δεδομένων νέφους (cloud data centers). Ωστόσο, καθώς τα μεγάλα δεδομένα επηρεάζουν βαθιά τη λειτουργία και το σχεδιασμό των μελλοντικών δικτύων που βασίζονται σε SDN, είναι σημαντικό να εξεταστούν νέες αρχιτεκτονικές και στρατηγικές (Zhang, Zhong, Li & Luo, 2018). Μια τέτοια στρατηγική είναι η αρθρωτή δομή πολλαπλών επιπέδων για εφαρμογές μεγάλων δεδομένων που βασίζονται σε SDN. Αυτή η δομή μελετά τη διαμόρφωση δικτύου σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της χρήσης του δικτύου και της απόδοσης των εφαρμογών. Ειδικότερα, εισάγονται αρχιτεκτονικά μοντέλα που ενσωματώνουν SDN για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων και στις υποδομές 5G που βασίζονται σε SDN/NFV.

Παρόλο που υπάρχουν πολλές δυνατότητες, υπάρχουν ακόμα κενά στη μελέτη της σχέσης μεταξύ SDN, NFV και μεγάλων δεδομένων. Η έρευνα μέχρι στιγμής δεν έχει καλύψει πλήρως την αλληλεπίδραση αυτών των τεχνολογιών, ιδιαίτερα στο πλαίσιο των μελλοντικών δικτύων. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν νέες στρατηγικές για την κατανομή και τη διαχείριση των πόρων, όπως αυτοί που βρίσκονται στα κέντρα δεδομένων νέφους, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις των SLA και των ELA για διάφορες εφαρμογές μεγάλων δεδομένων (Zhang et al. 2018).

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη και την εφαρμογή αυτών των στρατηγικών για την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων δικτύου, προκειμένου να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας και εμπειρίας χρήστη σε ένα συνεχώς εξελισσόμενο τεχνολογικό τοπίο.

#### **9.4 Κοινή χρήση δικτύου προσανατολισμένη στο QoE και τεμαχισμός σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό**

Η μετάβαση από πλατφόρμες που βασίζονται σε υλισμικό σε πλατφόρμες που βασίζονται σε λογισμικό προσφέρει την υπόσχεση της απλοποίησης της υποστήριξης πολλαπλών μισθώσεων. Σε τέτοιες πλατφόρμες, διαφορετικές υπηρεσίες ή εφαρμογές



από διάφορες περιπτώσεις χρήσης μπορούν να φιλοξενηθούν σε μια κοινή υποδομή που βασίζεται σε τεχνολογίες όπως το SDN και το NFV. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αποδοτικότερη χρήση των δικτυακών πόρων, καθώς διάφορα "slice" του δικτύου μπορούν να εξυπηρετούν διαφορετικούς χρήστες ή εφαρμογές μεμονωμένα.

Η κοινή χρήση των πόρων μεταξύ αυτών των "slice" μπορεί να βελτιώσει τη συνολική αποδοτικότητα της δικτυακής υποδομής (Foukas, Patounas, Elmokashfi & Marina, 2017). Ωστόσο, για την αποτελεσματική διαχείριση αυτής της κοινής χρήσης, απαιτούνται έξυπνοι αλγόριθμοι προγραμματισμού που θα αναθέτουν πόρους με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η υπερφόρτωση ή η έλλειψη πόρων σε συγκεκριμένα τμήματα του δικτύου. Η σωστή εκχώρηση πόρων είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της ποιότητας των υπηρεσιών και της εμπειρίας των χρηστών.

Η διαχείριση QoE εντός και μεταξύ των διαφορετικών "slice" είναι επίσης σημαντική. Κάθε "slice" πρέπει να διασφαλίσει ότι πληροί τις απαιτήσεις QoE των χρηστών του, ανεξαρτήτως της κατάστασης του δικτύου ή των επιδόσεων άλλων τμημάτων. Αυτό απαιτεί ενδεδειγμένη σχεδίαση και παρακολούθηση της απόδοσης των υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο (Liang & Yu, 2015). Επιπλέον, η απομόνωση μεταξύ των "slice" είναι απαραίτητη για την αποφυγή αρνητικών επιπτώσεων από επιθέσεις ή σφάλματα που συμβαίνουν σε ένα τμήμα του δικτύου. Απαιτείται η ανάπτυξη πολιτικών και μηχανισμών που θα διασφαλίσουν ότι τα προβλήματα σε ένα "slice" δεν επηρεάζουν τα υπόλοιπα. Η σωστή απομόνωση ενισχύει την ασφάλεια και την προστασία των δεδομένων. Η δημιουργία δυναμικών "slice" και η υποστήριξη κινητικότητας των χρηστών είναι επίσης κρίσιμες πτυχές. Η ικανότητα να δημιουργούνται και να τροποποιούνται δυναμικά τα "slice" για την κάλυψη των μεταβαλλόμενων αναγκών των χρηστών απαιτεί ευέλικτους μηχανισμούς διαχείρισης (Liang & Yu, 2015). Επίσης, η υποστήριξη της κινητικότητας, δηλαδή η μετακίνηση χρηστών ή εφαρμογών μεταξύ διαφορετικών "slice", πρέπει να γίνεται χωρίς να επηρεάζεται η ποιότητα της υπηρεσίας.

## **9.5 Επεκτασιμότητα, ανθεκτικότητα και βελτιστοποίηση σε μελλοντικά δίκτυα καθοριζόμενα από λογισμικό**

Η μετάβαση από υλισμικές (hardware-based) πλατφόρμες σε λογισμικές (software-based) πλατφόρμες δικτύου, όπως το SDN και το NFV, υπόσχεται σημαντικά πλεονεκτήματα για την υποστήριξη πολλαπλών μισθώσεων. Στο πλαίσιο αυτό, οι πόροι δικτύου μπορούν να μοιράζονται αποτελεσματικά μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών ή

εφαρμογών σε μια κοινή υποδομή, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το κόστος. Ωστόσο, αυτή η μετάβαση φέρνει μαζί της μια σειρά από προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για να διασφαλιστεί η επιτυχής εφαρμογή και λειτουργία των νέων τεχνολογιών (Kreutz, Ramos, Esteves Verissimo, Esteve Rothenberg, Azodolmolky & Uhlig, 2015).

Μια σημαντική πρόκληση σχετίζεται με την επεκτασιμότητα και την ανθεκτικότητα των ελεγκτών SDN. Ο κεντρικός ελεγκτής που διαχειρίζεται το δίκτυο ενδέχεται να αποτελέσει σημείο αποτυχίας (Single Point of Failure - SPOF). Αυτό σημαίνει ότι αν ο κεντρικός ελεγκτής αποτύχει ή αντιμετωπίσει προβλήματα, το σύνολο του δικτύου μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά, θέτοντας σε κίνδυνο την αξιοπιστία και την απόδοση του δικτύου, καθώς και την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών (QoE). Ειδικότερα, σε δίκτυα με μεγάλο αριθμό συσκευών, όπως τα δίκτυα IoT, ο κεντρικός σχεδιασμός του ελεγκτή μπορεί να μην επαρκεί για να καλύψει τις απαιτήσεις επεκτασιμότητας.

Για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα, προτείνεται η χρήση καταναμημένων ελεγκτών. Αυτοί οι ελεγκτές διατηρούν μια λογική κεντρική προβολή του δικτύου, αλλά είναι φυσικά καταναμημένοι σε διάφορες θέσεις. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να προσφέρει καλύτερη αξιοπιστία και επεκτασιμότητα, μειώνοντας την πιθανότητα ενός SPOF και επιτρέποντας στο δίκτυο να επεκταθεί πιο αποτελεσματικά. Ωστόσο, η τοποθέτηση και ο αριθμός των ελεγκτών πρέπει να σχεδιάζονται προσεκτικά για να επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση του δικτύου και να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση μεταξύ των μεταγωγέων και των ελεγκτών (Kreutz et al. 2015). Στο πεδίο του NFV, η τοποθέτηση των NFVO (Network Functions Virtualization Orchestrator, Ορχηστρωτής) και VNFM σε μεγάλης κλίμακας καταναμημένα συστήματα είναι επίσης μια πρόκληση. Η σωστή τοποθέτηση των κόμβων VNF είναι κρίσιμη για τη μείωση της καθυστέρησης και την βελτίωση της ποιότητας ζωής των χρηστών. Ειδικότερα, σε σενάρια με κινητές συσκευές ή χρήστες που ταξιδεύουν με υψηλές ταχύτητες, η αποτελεσματική τοποθέτηση VNF μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Το πρόβλημα τοποθέτησης VNF ή ενσωμάτωσης VNF αναφέρεται στην αναγνώριση της βέλτιστης τοποθεσίας για ένα ή περισσότερους τύπους VNF. Αυτό περιλαμβάνει την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων, του φορτίου δικτύου, και της κατανάλωσης ενέργειας, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι υπηρεσίες πληρούν τις απαιτήσεις QoS (Quality of Service) και QoE. Η σωστή τοποθέτηση των VNF είναι



κρίσιμη για την εξασφάλιση μιας υψηλής ποιότητας εμπειρίας για τους τελικούς χρήστες. Παρά την πρόοδο στις τρέχουσες λύσεις για την τοποθέτηση και βελτιστοποίηση, όπως η ανοιχτή αναζήτηση και οι μετρήσεις απόδοσης, δεν έχουν ακόμη ληφθεί υπόψη πλήρως τα προβλήματα κοινής τοποθέτησης των ελεγκτών SDN και των VNF/VNFM. Η ανοιχτή αναζήτηση επιτρέπει την τοποθέτηση των ελεγκτών SDN σε οποιοδήποτε σημείο της γεωγραφικής περιοχής των μεταγωγών, αλλά δεν εξετάζει τη συνδυασμένη τοποθέτηση με τα VNF/VNFM (Kreutz et al. 2015)..

Η ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που συνδυάζει την τοποθέτηση των ελεγκτών SDN με την τοποθέτηση των VNF και VNFM μπορεί να προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη λύση. Αυτό το μοντέλο θα μπορούσε να επιτρέψει την ταυτόχρονη βελτίωση της απόδοσης, της αξιοπιστίας και της ποιότητας του δικτύου, εξασφαλίζοντας έτσι μια καλύτερη ποιότητα ζωής για τους τελικούς χρήστες.

### **9.5.1 Επικοινωνίες πολυμέσων στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoTs)**

Η αναπτυσσόμενη τεχνολογία του Internet of Things φέρνει στο προσκήνιο πολλές προκλήσεις για τη διαχείριση δικτύων και την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών (QoE). Αυτές οι προκλήσεις σχετίζονται με τη διαχείριση της κλίμακας, της κινητικότητας, της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας, καθώς και με την αποτελεσματική διαχείριση πόρων για πολυμεσικές εφαρμογές IoT.

Η εισαγωγή του IoT, που περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό διασυνδεδεμένων συσκευών, δημιουργεί σημαντικά προβλήματα κλιμάκωσης. Όταν προστίθενται νέες συσκευές στο δίκτυο, η διαχείριση του όγκου των δεδομένων και η συντήρηση της απόδοσης του δικτύου γίνονται ολοένα και πιο δύσκολες. Επιπλέον, η κινητικότητα των συσκευών IoT, όπως κινητά τηλέφωνα ή φορητές συσκευές, απαιτεί δυναμική διαχείριση δικτύου για να διασφαλιστεί η συνεχής σύνδεση και απόδοση.

Η ασφάλεια και η ιδιωτικότητα είναι επίσης κρίσιμα ζητήματα, καθώς οι διασυνδεδεμένες συσκευές μπορούν να αποτελέσουν στόχο για επιθέσεις ή παραβιάσεις δεδομένων. Επιπλέον, η διαχείριση της ποιότητας της εμπειρίας (QoE) σε εφαρμογές πολυμέσων IoT είναι σημαντική για τη διασφάλιση της ικανοποίησης των χρηστών (Zanella, Bui, Castellani, Vangelista & Zorzi, 2014). Για την αξιολόγηση της QoE σε πολυμεσικές εφαρμογές IoT, προτείνεται η χρήση ενός πολυεπίπεδου μοντέλου QoE. Αυτό το μοντέλο περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της εμπειρίας, όπως η κωδικοποίηση, η ανθεκτικότητα σε σφάλματα μετάδοσης, ο

ρυθμός δεδομένων και η καθυστέρηση. Στο πλαίσιο του IoT, η κωδικοποίηση πρέπει να είναι χαμηλής πολυπλοκότητας και αποτελεσματική για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και την καθυστέρηση. Ένα προτεινόμενο πλαίσιο είναι η υπολογιστική αιχμής (edge computing), το οποίο επιτρέπει τη συνεργατική επεξεργασία δεδομένων σε φορητές συσκευές για εφαρμογές ευαίσθητες σε καθυστερήσεις, όπως οι εφαρμογές πολυμέσων του IoT. Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η μείωση της καθυστέρησης και η βελτίωση της απόδοσης, καθώς η επεξεργασία πραγματοποιείται κοντά στην πηγή των δεδομένων (Zanella et al. 2014).

Επιπλέον, προτείνεται μια νέα αρχιτεκτονική βασισμένη στην έννοια της ποιότητας των πραγμάτων (QoT). Αυτή η αρχιτεκτονική εστιάζει στη βελτίωση της ποιότητας των επικοινωνιών πολυμέσων στο IoT, αναγνωρίζοντας ότι η QoT είναι κρίσιμη για την επιτυχή λειτουργία των εφαρμογών IoT. Αναγνωρίζονται διάφορα ζητήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση της QoE σε δίκτυα IoT, όπως η ιεράρχηση της κυκλοφορίας βίντεο, η εικονικοποίηση στοιχείων δικτύου, η διαχείριση φορητότητας και η ασφάλεια. Αυτά τα ζητήματα απαιτούν προσεκτική εξέταση και ανάπτυξη νέων στρατηγικών και τεχνολογιών για την αντιμετώπισή τους (Gubbi, Buyya, Marusic & Palaniswami, 2013).

Με την τρέχουσα τάση της softwarization και της εικονικοποίησης στις υποδομές δικτύων, όπως τα δίκτυα 5G, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί πώς μπορεί να διαχειριστεί η QoE του IoT χρησιμοποιώντας SDN και NFV. Η ενσωμάτωσή τους μπορεί να προσφέρει λύσεις για τη βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης των δικτύων IoT, εξασφαλίζοντας την ικανοποίηση των χρηστών και την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων δικτύου (Gubbi et al. 2013).

## Συμπεράσματα

Η εκθετική αύξηση της κίνησης στο Διαδίκτυο λόγω της αυξανόμενης δημοτικότητας των υπηρεσιών πολυμέσων μέσω του Διαδικτύου έχει δημιουργήσει ανησυχία για τη διαχείριση των πόρων δικτύου για τους ISP και τους OTTP. Αυτό οφείλεται στην αναποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων δικτύου και στην τεράστια πίεση τόσο στους ISP όσο και στους OTTP να παρέχουν υπηρεσίες καλής ποιότητας στους τελικούς χρήστες. Η ακαδημαϊκή κοινότητα και η βιομηχανία αγκαλιάζουν το SDN και το NFV ως μελλοντικές τεχνολογίες για να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Το SDN και το NFV υπόσχονται να παρέχουν και να εφαρμόζουν νέες δυνατότητες και λύσεις που θα επιτρέπουν στον μελλοντικό έλεγχο δικτύων (π.χ. 5G) να είναι προσαρμόσιμος, προγραμματιζόμενος και οικονομικά αποδοτικός. Ωστόσο, λόγω των περιορισμένων πόρων δικτύου, αποτελεί πρόκληση για τους παρόχους υπηρεσιών να παρέχουν υψηλής ποιότητας υπηρεσίες πολυμέσων σε όλους τους πελάτες τους (Kreutz, Ramos, Verissimo, Rothenberg, Azodolmolky & Uhlig, 2015).

Για το σκοπό αυτό, η παρούσα εργασία αποτελεί μια ολοκληρωμένη έρευνα των λύσεων διαχείρισης QoE χρησιμοποιώντας SDN και NFV σε τρέχοντα και μελλοντικά δίκτυα 5G. Αρχικά αναλύεται το υπόβαθρο της μοντελοποίησης και αξιολόγησης QoE, ακολουθούμενο από μια συζήτηση σχετικά με την παρακολούθηση, τη μέτρηση, τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο του QoE. Για να εισαχθεί ο αναγνώστης στην τελευταία και ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία ροής, δόθηκε μια περιγραφή των υπηρεσιών ροής πολυμέσων μέσω του Διαδικτύου με έμφαση στις εφαρμογές που βασίζονται στο HAS και στο πρόσφατο πρότυπο SAND (Mijumbi, Serrat, Gorricho, Bouten, De Turck & Boutaba, 2016).

Παρουσιάζονται επίσης οι τελευταίες έρευνες στον τομέα του SDN και του NFV σχετικά με τις σχεδιαστικές εκτιμήσεις και τις υλοποιήσεις τους. Επιπλέον επισημαίνονται περαιτέρω τα τρέχοντα ερευνητικά έργα, οι δραστηριότητες τυποποίησης και οι περιπτώσεις χρήσης που σχετίζονται με το SDN και το NFV. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται στοιχεία για τη διαχείριση QoE των υπηρεσιών ροής πολυμέσων με βάση διαφορετικές ταξινομήσεις, όπως προσεγγίσεις βελτιστοποίησης διακομιστή και δικτύου, δρομολόγηση με επίκεντρο το QoE σε SDN / NFV. Η παρούσα εργασία διερεύνησε επίσης εκτενώς λύσεις προσαρμοστικής ροής με επίγνωση QoE

χρησιμοποιώντας αναδυόμενες αρχιτεκτονικές χρησιμοποιώντας MEC, Fog/Cloud και ICN (Kreutz et al. 2015). Με βάση την έρευνα σχετικά με την πτυχή διαχείρισης QoE των υπηρεσιών πολυμέσων, παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν οι μελλοντικές απαραίτητες ερευνητικές δραστηριότητες προς τις ακόλουθες κατευθύνσεις: κοινή χρήση και τεμαχισμός δικτύων προσανατολισμένη στην QoE, επιχειρηματικά μοντέλα QoE σε υποδομές δικτύων καθοριζόμενων από λογισμικό, έξυπνες στρατηγικές μεγάλων δεδομένων που βασίζονται σε QoE, επεκτασιμότητα, ανθεκτικότητα και βελτιστοποίηση σε SDN / NFV και νέα μοντέλα ασφάλειας, απορρήτου και εμπιστοσύνης που βασίζονται σε QoE σε δίκτυα 5G καθοριζόμενα από λογισμικό (Mijumbi et al. 2016).

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη διαχείριση της Ποιότητας Εμπειρίας (QoE) και την εφαρμογή τεχνολογιών Δικτύωσης Οριζόμενης από Λογισμικό (SDN) και Εικονικοποίησης Λειτουργιών Δικτύου (NFV) σε δίκτυα πολυμέσων επόμενης γενιάς. Παρόλο που οι τεχνολογίες αυτές έχουν ήδη αρχίσει να διαμορφώνουν το μέλλον των δικτύων, υπάρχουν ακόμη αρκετές προκλήσεις και πεδία έρευνας που μπορούν να αξιοποιηθούν για περαιτέρω βελτίωση των επιδόσεων και της εμπειρίας των τελικών χρηστών.

Μια σημαντική κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα αφορά τη βελτιστοποίηση της δυναμικής κατανομής πόρων σε δίκτυα SDN/NFV. Καθώς οι απαιτήσεις δικτύου ποικίλλουν ανάλογα με τις εφαρμογές, είναι κρίσιμο να αναπτυχθούν πιο εξελιγμένοι αλγόριθμοι που θα μπορούν να προσαρμόζουν δυναμικά την κατανομή των πόρων σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες του δικτύου και τις ανάγκες των χρηστών. Για παράδειγμα, οι προσαρμοστικοί αλγόριθμοι που συνδυάζουν τη μηχανική μάθηση με την παρακολούθηση των συνθηκών του δικτύου θα μπορούσαν να προσφέρουν ευφύστερες λύσεις στην κατανομή των πόρων, βελτιστοποιώντας ταυτόχρονα την απόδοση και την εμπειρία του χρήστη. Επιπλέον, υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την ενοποίηση των SDN/NFV τεχνολογιών με την ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Τα IoT δίκτυα αποτελούν πλέον ένα από τα ταχύτερα αναπτυσσόμενα τεχνολογικά πεδία, και η προσαρμογή των δικτύων SDN και NFV στις ιδιαιτερότητες των IoT συσκευών και εφαρμογών θα μπορούσε να προσφέρει τεράστια πλεονεκτήματα, όπως η βελτίωση της διαχείρισης των δεδομένων, η ασφάλεια και η επεκτασιμότητα. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη προσαρμοστικών μοντέλων που θα συνδυάζουν τις ανάγκες των IoT

συσκευών με τις δυναμικές υποδομές που παρέχουν οι SDN/NFV τεχνολογίες. Ένα ακόμα πεδίο που προσφέρει πολλές προοπτικές για περαιτέρω έρευνα είναι η βελτίωση της ασφάλειας σε δίκτυα SDN/NFV. Αν και οι τεχνολογίες αυτές προσφέρουν αυξημένη ευελιξία, δημιουργούν επίσης νέα σημεία ευπάθειας, ιδίως όσον αφορά τις επιθέσεις στο control plane ή την εκμετάλλευση εύαλωτων εικονικοποιημένων λειτουργιών δικτύου. Επομένως, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν νέες μέθοδοι ανίχνευσης και αντιμετώπισης επιθέσεων, καθώς και ενισχυμένες στρατηγικές ασφάλειας που θα διασφαλίζουν την ακεραιότητα και τη διαθεσιμότητα των δικτυακών πόρων. Επιπλέον, οι αρχιτεκτονικές 5G και 6G δικτύων θα επηρεάσουν άμεσα τις μελλοντικές εξελίξεις στις τεχνολογίες SDN/NFV. Με την εισαγωγή του 5G, οι απαιτήσεις για χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία αυξάνονται σημαντικά. Οι ερευνητές θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στην ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε 5G και 6G δίκτυα, προκειμένου να αντιμετωπίσουν τις αυξημένες απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών, όπως η επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα (AR/VR), τα αυτόνομα οχήματα και οι βιομηχανικές εφαρμογές IoT.

Τέλος, οι πολυμεσικές υπηρεσίες επόμενης γενιάς όπως η ροή βίντεο υψηλής ευκρίνειας και τα ζωντανά streams θα απαιτήσουν νέες στρατηγικές για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της QoE σε πραγματικό χρόνο. Η ανάπτυξη μοντέλων που θα μπορούν να προβλέπουν την ποιότητα εμπειρίας των χρηστών με βάση τις τρέχουσες συνθήκες του δικτύου και θα προσαρμόζουν την ποιότητα του περιεχομένου αναλόγως, αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για μελλοντική έρευνα.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Bari, F., Chowdhury, S. R., Ahmed, R., Boutaba, R., Duarte O. C. M. B. (2016). Orchestrating Virtualized Network Functions, in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 13, no. 4, pp. 725-739.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7469866>
- Biernacki, A., & Tutschku, K. (2014). Performance of HTTP video streaming under different network conditions. *Multimedia Tools and Applications*. vol. 72. pp. 1143-1166, <https://doi.org/10.1007/s11042-013-1424-x>
- Bonaventure, O., Ford, A., Handley, M., Paasch, C., Raiciu, C. (2013). TCP Extensions for Multipath Operation with Multiple Addresses. *Internet Engineering Task Force (IETF) RFC 6824*, <https://doi.org/10.17487/RFC6824>
- Bouraquia, K., Sabir, E., Sadik, M., Ladid, L. (2020). Quality of Experience for Streaming Services: Measurements, Challenges and Insights. *IEEE Access*. vol. 8, pp. 13341-13361, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2965099 <https://ieeexplore.ieee.org/document/8954623>
- Boutaba, R., Salahuddin, M. A., Limam, N., Ayoubi, S., Shahriar, N., Estrada-Solano, F., & Caicedo, O. M. (2018). A comprehensive survey on machine learning for networking: evolution, applications and research opportunities. *Journal of Internet Services and Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 1-99.  
<https://doi.org/10.1186/s13174-018-0087-2>
- Chalaby, J. K. (2024). The streaming industry and the platform economy: An analysis. *Media, Culture & Society*, vol. 46, no. 3, pp. 552-571.  
<https://doi.org/10.1177/01634437231210439>
- Chen, K. C., & Lien, S. Y. (2014). Machine-to-machine communications: Technologies and challenges. *Ad Hoc Networks*. vol. 18, pp. 3-23. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2013.03.007>
- Clayman, S., Maini, E., Galis, A., Manzalini, A., & Mazzocca, N. (2014). The dynamic placement of virtual network functions. In *2014 IEEE Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, Krakow, Poland, 2014, pp. 1-9, doi: 10.1109/NOMS.2014.6838412.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6838412>

Egilmez, H. E., Dane, S. T., Bagci, K. T., & Tekalp, A. M. (2012). OpenQoS: An OpenFlow controller design for multimedia delivery with end-to-end Quality of Service over Software-Defined Networks. *In Proceedings of the IEEE 2012 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference, Hollywood, CA, USA*, pp. 1-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6411795>

Elbamby, M. S., Perfecto, C., Bennis, M., & Doppler, K. (2018). Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality. *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 78-84. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8329628>

Farris, I., Taleb, T., Khettab, Y., & Song, J. (2018). A Survey on Emerging SDN and NFV Security Mechanisms for IoT Systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 812-837. doi: 10.1109/COMST.2018.2862350 <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2862350>

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

Hakiri, A., Gokhale, A., Berthou, P., Schmidt, D. C., & Gayraud, T. (2014). Software-defined networking: Challenges and research opportunities for future internet. *Computer Networks*, vol. 75, pp. 453-471. <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2014.10.015>

Hong, K., Lillethun, D., Ramachandran, U., Ottenwalder, B., & Koldehofe, B. (2013). Mobile Fog: A Programming Model for Large-Scale Applications on the Internet of Things. *In Proceedings of the second ACM SIGCOMM workshop on Mobile cloud computing*, pp. 15-20. <https://doi.org/10.1145/2491266.2491270>

Jarschel, M., Oechsner, S., Schlosser, D., Pries, R., Goll, S., & Tran-Gia, P. (2011). Modeling and performance evaluation of an OpenFlow architecture. *In Proceedings of the 2011 23rd International Teletraffic Congress (ITC), San Francisco, CA, USA*, pp. 1-7. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6038457>

Jiang M., Condoluci M. and Mahmoodi T., (2017), Network slicing in 5G: An auction-based model, *In 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Paris, France, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996490>



- Kasulaitis, B. V., Babbitt, C. W., Kahhat, R., Williams, E., & Ryen, E. G. (2015). Evolving materials, attributes, and functionality in consumer electronics: Case study of laptop computers, *Resources, Conservation & Recycling, Elsevier*, vol. 100, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.014>
- Kouvatsos, D. D. (2011). Network Performance Engineering - A Handbook on Convergent Multi-Service Networks and Next Generation Internet, 1<sup>st</sup> ed. *Computer Communication Networks and Telecommunications (LNCCN) Springer*. ISBN 978-3-642-02741-3 <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02742-0>
- Kreutz, D., Ramos, F. M., Verissimo, P. E., Rothenberg, C. E., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2014). Software-defined networking: A comprehensive survey. *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14-76. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2371999>
- Kumar, S., Meena, R., Pub, I. (2023). The Rise of OTT Platform: Changing Consumer Preferences. *International Journal of Management (IJM)*. vol. 14, no. 5, pp.. 70-94. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/AN69G>
- Küfeoğlu, S. (2022). Emerging Technologies. In: *Emerging Technologies . Sustainable Development Goals Series*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-07127-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-07127-0_2)
- Liang, C., Yu, F. R. (2014). Wireless Network Virtualization: A Survey, Some Research Issues and Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 358-380. <https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2352118>
- Lloret, J., Garcia, M., Bri, D., & Diaz, J. R. (2009). Study and performance of a group-based Content Delivery Network. *Journal of Network and Computer Applications*. vol. 32, no. 5, pp. 991-999, <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2009.03.008>
- Medhat, A. M., Taleb, T., Elmangoush, A., Carella, G. A., Covaci, S., & Magedanz, T. (2017). Service function chaining in next generation networks: State of the art and research challenges. *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 216-223. doi: 10.1109/MCOM.2016.1600219RP <https://ieeexplore.ieee.org/document/7593430>



Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J. L., Bouten, N., De Turck, F., & Boutaba, R. (2015). Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236-262.

<https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2477041>

Miller, J. S., Mondal, A., Potharaju, R., Dinda, P. A., & Kuzmanovic, A. (2011). Understanding End-user Perception of Network Problems. *In Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Workshop on Measurements Up the Stack (W-MUST'11)*, pp. 43-48

<https://doi.org/10.1145/2018602.2018613>

Mocanu, D. C., Exarchakos, G., & Liotta, A. (2018). Decentralized dynamic understanding of hidden relations in complex networks *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1571. (<https://doi.org/10.1038/s41598-018-19356-4>)

Morley, J., Widdicks, K., Hazas, M. (2018). Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption. *Energy Research & Social Science*. vol. 38, pp. 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.018>

Raje, Kalyani. (2023). The growing usage of connected devices will contribute to the growth of the IoT MCU market. Global IoT Microcontroller Market 2023 White Paper, *Cognitive Market Research*

Reyes-Menendez, A., Palos-Sanchez, P. R., Saura, J. R., & Martin-Velicia, F. (2018). Understanding the Influence of Wireless Communications and Wi-Fi Access on Customer Loyalty: A Behavioral Model System. *Wireless Communications and Mobile Computing*. vol. 2018, no. 1, pp. 3487398. <https://doi.org/10.1155/2018/3487398>

Sahut, J., Schweizer, D., Peris-Ortiz, M. (2022). Technological forecasting and social change introduction to the VSI technological innovations to ensure confidence in the digital world. *Technological Forecasting and Social Change*. vol. 179. pp.121680.

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121680>

Seufert, M., Egger, S., Slanina, M., Zinner, T., Hoßfeld, T., & Tran-Gia, P. (2014). A survey on quality of experience of HTTP adaptive streaming. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 469-492.

<http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2014.2360940>

Sobiesiak, R., O'Keefe, T. (2011). Complexity analysis: a quantitative approach to usability engineering. *In Proceedings of the 2011 Conference of the Center for Advanced Studies on Collaborative Research (CASCON '11)*. IBM Corp., USA, pp. 242-256.

Stockhammer, T. (2011). Dynamic adaptive streaming over HTTP: standards and design principles. *In Proceedings of the second annual ACM conference on Multimedia systems*, pp. 133-144. <https://doi.org/10.1145/1943552.1943572>

Talebi, H., & khatibi Bardsiri, A. (2023). The Impact of Information Technology on Service Quality, Satisfaction, and Customer Relationship Management (Case Study: IT Organization Individuals). *Journal of Management Science & Engineering Research*. vol. 6, no. 2, pp. 24-31, <https://doi.org/10.30564/jmser.v6i2.5823>

Terziu, H. (2020). The Role of the Internet in the Development of Marketing and Electronic Services in Business. *European Journal of Economics and Business Studies*. vol. 6, no. 2, <https://doi.org/10.26417/451fzx75d>

Vakali, A., Pallis, G. (2003). Content Delivery Networks: Status and Trends. *IEEE Internet Computing*. vol. 7. no. 6, pp. 68-74. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1250586>

Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. & Zorzi, M. (2014), Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22-32, doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328 <https://ieeexplore.ieee.org/document/6740844>

Zhang, R., Shi, Y., Schuller, B., André, E., Oviatt, S., Quigley, A., Marquardt, N., Aslan, I., Ju, R. (2021). User Experience for Multi-Device Ecosystems: Challenges and Opportunities. *In Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 111, pp 1–5., <https://doi.org/10.1145/3411763.3441325>

Zhao, Z., Dumitru, C., Grosso, P., & de Laat, C. (2012). Network Resource Control for Data Intensive Applications in Heterogeneous Infrastructures. *Proceedings of the 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium Workshops & PhD Forum (IPDPSW)*. Shanghai, China, pp. 2069-2076, doi:10.1109/IPDPSW.2012.243, <https://ieeexplore.ieee.org/document/6270416>

HTTP/2-Based Methods to Improve the Live Experience of Adaptive Streaming (2015) [Figure]. (n.d.). ResearchGate. Retrieved September 30, 2024, from [https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-HTTP-Adaptive-Streaming-HAS-was-introduced-As-shown-in-Figure-1-video\\_fig1\\_283073448](https://www.researchgate.net/figure/The-concept-of-HTTP-Adaptive-Streaming-HAS-was-introduced-As-shown-in-Figure-1-video_fig1_283073448)

QoE-Aware Resource Allocation for Adaptive Device-to-Device Video Streaming (2015) [Figure]. (n.d.). ResearchGate. Retrieved September 30, 2024, from [https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-process-of-QoE-aware-adaptive-D2D-video-streaming\\_fig1\\_281841582](https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-process-of-QoE-aware-adaptive-D2D-video-streaming_fig1_281841582)

Seamless Multimedia Delivery Within a Heterogeneous Wireless Networks Environment: Are We There Yet? (2018) [Figure]. (n.d.). *ResearchGate*. Retrieved September 30, 2024, from [https://www.researchgate.net/figure/QoS-vs-QoE-in-Multimedia-Content-Delivery\\_fig2\\_322257972](https://www.researchgate.net/figure/QoS-vs-QoE-in-Multimedia-Content-Delivery_fig2_322257972)

The Strategic Role of Inter-Container Communications in RAN Deployment Scenarios (2019) [Figure]. (n.d.). *ResearchGate*. Retrieved September 30, 2024, from [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-SDN-NFV-architecture-views\\_fig1\\_332110686](https://www.researchgate.net/figure/Example-of-a-SDN-NFV-architecture-views_fig1_332110686)