



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**  
**Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των**  
**Υπολογιστών**  
**Ειδίκευση Λογισμικού και Πληροφοριακών Συστημάτων,**  
**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Tactile Internet**

**Φώτιος Αλεξόπουλος**  
**A.M. 18031**

**Εισηγητής: Δρ Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Tactile Internet**

**Φώτιος Αλεξόπουλος  
Α.Μ. 18031**

**Εισηγητής:**

**Δρ Αντώνιος Μπόγρης, Καθηγητής**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Ιωάννα Καντζάβελου, Επίκουρη Καθηγήτρια  
Νικόλαος Ψαρράς, Λέκτορας**

**Ημερομηνία εξέτασης 21/2/2023**



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φώτιος Αλεξόπουλος του Κών/νου, με αριθμό μητρώου 18031 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου». Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Ο Δηλών  
Φώτιος Αλεξόπουλος





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώθηκε μετά από επίμονες προσπάθειες, σε ένα ενδιαφέρον γνωστικό αντικείμενο, όπως αυτό του αππικού διαδικτύου. Την προσπάθειά μου αυτή υποστήριξε ο επιβλέπων καθηγητής μου, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω.





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το Απτικό Διαδίκτυο (Tactile Internet – TI). Το Διαδίκτυο έχει εξελιχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, από σταθερό σε κινητό Διαδίκτυο, μετά στο Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things - IoT), και τώρα στο TI (Tactile Internet - TI). Το TI υπερβαίνει την παράδοση ήχου, δεδομένων και βίντεο σε σταθερά και κινητά δίκτυα, καθώς και την επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ των πραγμάτων που υπάρχει στο IoT. Το TI κάνει εφικτές τις απτικές επικοινωνίες και όντας προσανατολισμένο σε αυτές, επιτρέπει την παράδοση ενός συνόλου δεξιοτήτων μέσω δικτύων. Μερικά παραδείγματα πιθανών εφαρμογών είναι η επαυξημένη πραγματικότητα, η τηλεχειρουργική, ο αυτοματισμός βιομηχανικών διαδικασιών και οι στόλοι οχημάτων. Μία από τις τεχνολογίες που θα βοηθήσουν στην πραγμάτωση αυτών των εφαρμογών είναι τα δίκτυα κινητής πέμπτης γενιάς και αυτά που θα τα ακολουθήσουν (Beyond 5G – B5G). Στα 5G δίκτυα, η υψηλή αξιοπιστία και η χαμηλή καθυστέρηση έχουν γίνει τα πιο σημαντικά ζητήματα εκτός από την υποστήριξη τεράστιου αριθμού συσκευών και την εξαιρετικά υψηλή απόδοση. Για την επίτευξη του στόχου της χαμηλής καθυστέρησης, εισήχθη η έννοια του TI. Για να μειωθεί ο λανθάνων χρόνος, μπορούν να εφαρμοστούν διάφορες τεχνικές, από το φυσικό επίπεδο στο επίπεδο εφαρμογής, ανάλογα με τη συγκεκριμένη εφαρμογή και την αρχιτεκτονική του δικτύου. Η εργασία αυτή προσφέρει μία επισκόπηση της αρθρογραφίας πάνω σε αυτά και άλλα θέματα του TI. Ξεκινά από τις γενικές έννοιες, τους τομείς εφαρμογών και τις προκλήσεις, συνεχίζοντας με τις σχετικές τεχνολογίες, κάποια ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης και κριτήρια αξιολόγησης που έχουν προταθεί. Επιπλέον παρατίθενται κάποια παραδείγματα δοκιμαστικών πλατφορμών και τα αποτελέσματά τους. Τέλος συζητείται η πρόταση μίας νέας ευέλικτης αρχιτεκτονικής για το διαδίκτυο, με την οποία θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του TI.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	14
<b>2</b>	<b>ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ</b> .....	22
2.1	Τομείς εφαρμογών και προκλήσεις .....	22
2.2	Υπάρχουσες έρευνες στο ΤΙ.....	25
2.3	Το όραμα για το ΤΙ .....	29
2.4	Συνοψη.....	34
<b>3</b>	<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ, ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ</b> .....	35
3.1	Τεχνολογίες .....	35
3.2	Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης.....	41
3.3	Κριτήρια Αξιολόγησης Απτικού Διαδικτύου .....	48
3.4	Αρχιτεκτονικές .....	52
3.5	Συνοψη.....	59
<b>4</b>	<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ</b> .....	61
4.1	Τεχνολογίες και ερευνητικά πεδία .....	61
4.2	Πλατφόρμες δοκιμών.....	62
4.3	Σύνοψη.....	75
<b>5</b>	<b>ΕΥΕΛΙΚΤΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΤΙ</b> .....	76
5.1	Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική FlexNGIA .....	76
5.2	Παραδείγματα μελλοντικών εφαρμογών .....	80
5.3	Απαιτήσεις μελλοντικών εφαρμογών .....	82
5.4	Χαρακτηριστικά Μελλοντικών Εφαρμογών .....	84
5.5	Δικτυακή Υποδομή .....	86
5.6	Υπηρεσίες Δικτύου .....	88
5.7	Λειτουργίες δικτύου και στοίβα πρωτοκόλλου .....	90
5.8	Σύνοψη.....	91
<b>6</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> .....	92
<b>7</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	95

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Εικόνα 1.1</b> Εξελικτικά βήματα του Απτικού Διαδικτύου (Tactile Internet, TI) [4] .....	14
<b>Εικόνα 1.2</b> Απεικόνιση της λειτουργικής αρχιτεκτονικής του Απτικού Διαδικτύου [13]..	15
<b>Εικόνα 1.3</b> Βελτίωση των απαιτήσεων από 4G (IMT-advanced) σε 5G (IMT-2020) συστήματα [6].....	18
<b>Εικόνα 1.4</b> Σύνοψη 3 πεδίων (eMBB: enhanced Mobile Broadband, mcMTC: Mission-Critical Machine-Type Communications, mMTC: Massive Machine-Type Communications) και των στόχων του 5G σύμφωνα με το IMT2020, τους 3GPP KPIs (key performance indicators), και την αναφορά της Qualcomm του 2018 [7] .....	19
<b>Εικόνα 2.1</b> Κοινά σημεία μεταξύ IoT, 5G και Tactile Internet [4] .....	30
<b>Εικόνα 2.2</b> Ενδεικτικές συσκευές απτικής ανατροφοδότησης [14].....	33
<b>Εικόνα 3.1</b> Σύστημα εξ αποστάσεως χειρισμού που βασίζεται σε αμφίδρομες απτικές επικοινωνίες μεταξύ ενός ανθρώπου χειριστή και ενός απομακρυσμένου ρομπότ [55]. .....	37
<b>Εικόνα 3.2</b> Απομακρυσμένη ρομποτική χειρουργική [55]. .....	42
<b>Εικόνα 3.3</b> Αυτόνομη οδήγηση για αποφυγή σύγκρουσης [55]. .....	45
<b>Εικόνα 3.4</b> Εξ' αποστάσεως θεραπεία της αραχνοφοβίας [55].....	47
<b>Εικόνα 3.5</b> Σύστημα cloud πολλαπλών επιπέδων για το TI [72] .....	54
<b>Εικόνα 3.6</b> Αρχιτεκτονική συστήματος για διαδραστικό multiplayer παιχνίδι σε περιβάλλοντα VR εσωτερικού χώρου [78].....	56
<b>Εικόνα 3.7</b> Προτεινόμενη αρχιτεκτονική TI με γνώμονα την ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) για έξυπνες πόλεις [82] .....	58
<b>Εικόνα 3.8</b> Δικτυακή υποδομή για την εξυπηρέτηση των εφαρμογών υγείας του TI σε μία πανεπιστημιούπολη νοσοκομείου [83] .....	59
<b>Εικόνα 4.1</b> Σύστημα ενεργειακής διαχείρισης του σπιτιού [95] .....	63
<b>Εικόνα 4.2</b> VANET - Αυτόνομα ad-hoc δίκτυα οχημάτων [97].....	66
<b>Εικόνα 4.3</b> Επικοινωνίες στα έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα [100] .....	68
<b>Εικόνα 4.4</b> Σύστημα εξισορρόπησης της κυκλοφορίας, με χρήση (LTE) σε ζώνες χωρίς άδεια (LTE U) για απτικές επικοινωνίες στο TI (TAC-U) [102].....	70
<b>Εικόνα 4.5</b> Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρων (Edge Computing) [103].....	71

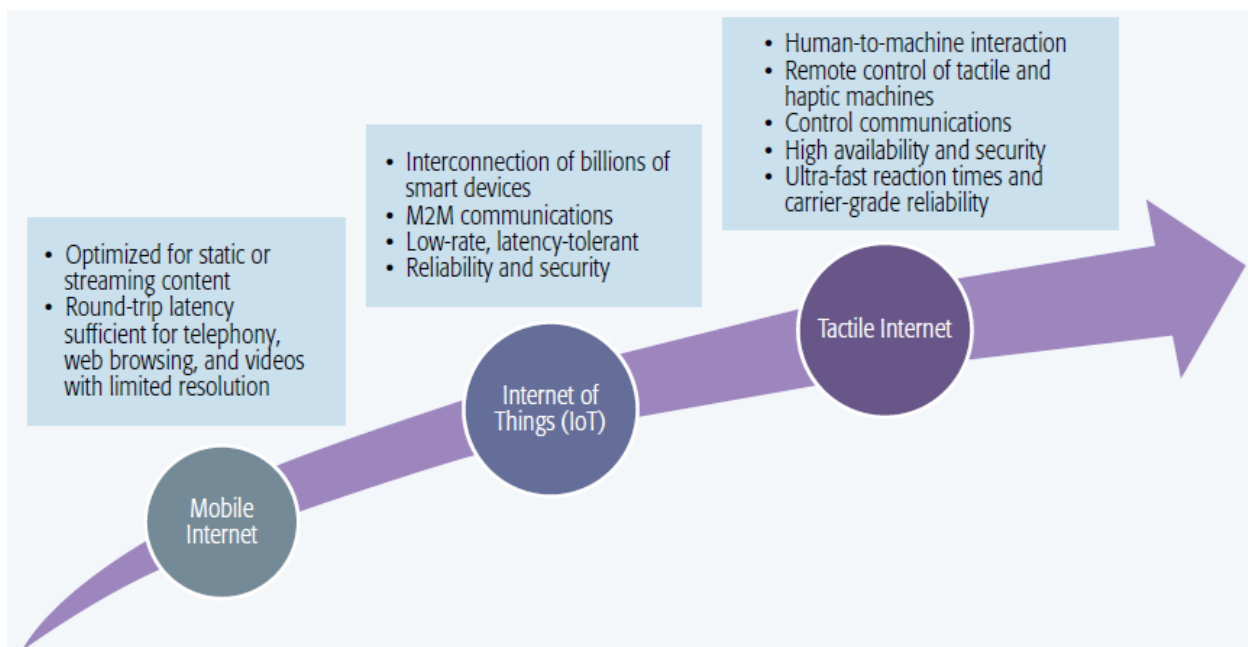
<b>Εικόνα 4.6</b> Αρχιτεκτονική Ad hoc Κοινωνικών Δικτύων (Ad-hoc Social Network - ASNET) [104].....	73
<b>Εικόνα 4.7</b> Αρχιτεκτονική IoT network slicing σε δίκτυα LoRa [105].....	74
<b>Εικόνα 5.1</b> Ανθρώπινες αισθήσεις και χρόνοι αντίδρασης [2].....	83
<b>Εικόνα 5.2</b> Υποδομή δικτύου FlexNGIA [107]. .....	86
<b>Εικόνα 5.3</b> Παράδειγμα ενός Service Function Chain που σχετίζεται με μια εφαρμογή [107] .....	89
<b>Εικόνα 5.4</b> Κατηγορίες προηγμένων λειτουργιών στο FlexNGIA και τα επίπεδα λειτουργίας τους [107] .....	90

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.1</b> Στόχοι, απαιτήσεις και χαρακτηριστικά κυκλοφορίας δεδομένων για τις περιπτώσεις χρήσης του TI [3].....	17
<b>Πίνακας 2.1</b> Ενδεικτικοί τομείς εφαρμογών του TI και παραδείγματα.....	22
<b>Πίνακας 2.2</b> QoS παράμετροι και απαιτήσεις για μετάδοση ήχου, βίντεο, γραφικών και απτικών σημάτων [14].....	23
<b>Πίνακας 2.3</b> Κατηγορίες προκλήσεων του TI και παραδείγματα.....	24
<b>Πίνακας 2.4</b> Υπάρχουσες έρευνες στο TI.....	26
<b>Πίνακας 3.1</b> Τύποι επικοινωνίας και σχετικές τεχνολογίες.....	35
<b>Πίνακας 3.2</b> Τεχνολογίες ενεργοποίησης του TI.....	40
<b>Πίνακας 3.3</b> Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης TI.....	42
<b>Πίνακας 3.4</b> Κριτήρια αξιολόγησης λύσεων TI.....	49
<b>Πίνακας 3.5</b> Αρχιτεκτονικές TI.....	53
<b>Πίνακας 4.1</b> Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις για το TI.....	61
<b>Πίνακας 4.2</b> Πλατφόρμες δοκιμών συναφών με το TI.....	63
<b>Πίνακας 5.1</b> Χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικής FlexNGIA.....	77
<b>Πίνακας 5.2</b> Παραδείγματα μελλοντικών εφαρμογών.....	80
<b>Πίνακας 5.3</b> Απαιτήσεις μελλοντικών εφαρμογών.....	82
<b>Πίνακας 5.4</b> Χαρακτηριστικά μελλοντικών εφαρμογών.....	84
<b>Πίνακας 5.5</b> Χαρακτηριστικά μελλοντικών δικτυακών υποδομών.....	87

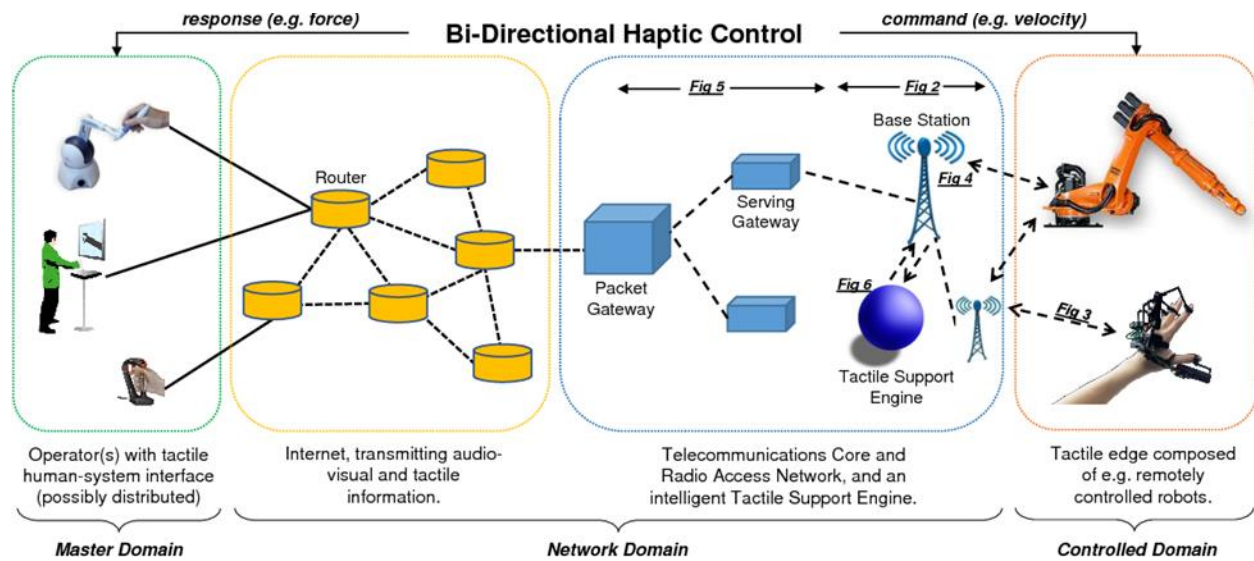
## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σημερινό Διαδίκτυο εγκαινιάζει μια νέα εποχή επικοινωνιών, όπου τα διαδραστικά κυβερνοφυσικά συστήματα μπορούν να ανταλλάσσουν όχι μόνο τα συμβατικά δεδομένα τριπλής αναπαραγωγής (δηλ., ήχο, βίντεο, και κείμενο), αλλά και απτικά μηνύματα ελέγχου σε πραγματικό χρόνο μέσω του λεγόμενου Απτικού Διαδικτύου. Το TI (Tactile Internet) μπορεί να θεωρηθεί ως μία εξέλιξη του Διαδικτύου, η οποία ξεκινάει από το σταθερό και βασισμένο σε κείμενο Διαδίκτυο, συνεχίζει στο κινητό Διαδίκτυο πολυμέσων, και στη συνέχεια στο Internet of Things (IoT) (Εικόνα 1.1).



**Εικόνα 1.1** Εξελικτικά βήματα του Απτικού Διαδικτύου (Tactile Internet, TI) [4]

Το TI είναι προσανατολισμένο προς τις απτικές επικοινωνίες μέσω του δικτύου (Εικόνα 1.2). Χρησιμοποιώντας το TI, ένας γιατρός μπορεί να είναι σε θέση να εκτελέσει μια εξ' αποστάσεως χειρουργική επέμβαση σε έναν απομακρυσμένο ασθενή με την αντίληψη όχι μόνο οπτικών και ακουστικών ερεθισμάτων σε πραγματικό χρόνο, αλλά και αίσθησης αφής του απομακρυσμένου περιβάλλοντος. Αυτές οι νέες δυνατότητες θα φέρουν επανάσταση στο σύνολο των εφαρμογών και των υπηρεσιών που παρέχονται μέχρι σήμερα από το Διαδίκτυο και θα εξελίξουν τα συστήματα επόμενης γενιάς με ένα άνευ προηγουμένου επίπεδο ανθρώπινης επικοινωνίας.



Εικόνα 1.2 Απεικόνιση της λειτουργικής αρχιτεκτονικής του Απτικού Διαδικτύου [13]

Το ΤΙ θα φέρει επανάσταση και θα συνδυάσει τις αλληλεπιδράσεις μηχανής με μηχανή και ανθρώπου με μηχανή [1]. Ο όρος ΤΙ επινοήθηκε για πρώτη φορά το 2014 από τον Fettweis στη βασική του εργασία [2]. Ο Fettweis όρισε το ΤΙ ως την τεχνολογία που επιτρέπει τον έλεγχο πραγματικών ή/και εικονικών αντικειμένων μέσω του Διαδικτύου απαιτώντας πολύ χαμηλό λανθάνοντα χρόνο (καθυστέρηση) μετ' επιστροφής [2]. Όχι πολύ αργότερα, τον Μάρτιο του 2016, τα λειτουργικά πρότυπα IEEE P1918.1 σχημάτισαν μια ομάδα, η οποία στοχεύει στον καθορισμό της αρχιτεκτονικής αναφοράς του πλαισίου του ΤΙ [3]. Η τυπική ομάδα εργασίας του IEEE P1918.1 ορίζει το ΤΙ ως «ένα δίκτυο ή ένα δίκτυο δικτύων για απομακρυσμένη πρόσβαση όπου η αντίληψη, ο χειρισμός ή ο έλεγχος πραγματικών και εικονικών αντικειμένων ή διεργασιών γίνεται σε αντιληπτό πραγματικό χρόνο». Μερικές από τις βασικές περιπτώσεις χρήσης που αναφέρονται στο IEEE P1918.1 είναι η εξ αποστάσεως ρομποτική χειρουργική, η αυτόνομη οδήγηση και η εικονική πραγματικότητα με δυνατότητα απτικής.

Απτικές εφαρμογές διαδικτύου, όπως η τηλεχειρουργική, απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και ασφάλειας για να λειτουργήσουν σωστά και με ασφάλεια. Οι απαιτήσεις καθυστέρησης των εφαρμογών ΤΙ ενδέχεται να διαφέρουν, ανάλογα με το είδος της εφαρμογής και τη δυναμική του περιβάλλοντος. Πιο συγκεκριμένα, ενώ οι απαιτήσεις καθυστέρησης των απτικών εφαρμογών Διαδικτύου ενδέχεται να ποικίλλουν από  $< 10$  ms έως δεκάδες χιλιοστά του δευτερολέπτου, το ΤΙ

στοχεύει ένα εξαιρετικά χαμηλό λανθάνον χρόνο μετ' επιστροφής από άκρο σε άκρο της τάξης του 1 ms. Αυτό απαιτεί να διατηρούνται οι απτικές εφαρμογές σχετικά κοντά στις εφαρμογές των τελικών σημείων (π.χ. διατήρηση της εφαρμογής ρομποτικής χειρουργικής σχετικά κοντά στην κονσόλα του χειρουργού και σε αυτήν του ρομπότ εκτέλεσης της χειρουργικής επέμβασης) [4].

Λαμβάνοντας υπόψη το καλύτερο σενάριο, όπου η καθυστέρηση διάδοσης που επιβάλλεται από την περιορισμένη ταχύτητα του φωτός (300 km/ms) είναι ο μόνος περιοριστικός παράγοντας, η απόσταση μεταξύ των τελικών σημείων οποιασδήποτε δεδομένης απτικής εφαρμογής περιορίζεται σε έως 150 km, για να διασφαλιστεί ότι ικανοποιείται η απαίτηση καθυστέρησης μετ' επιστροφής του TI σε 1 ms. Σε πραγματικά σενάρια, ωστόσο, αυτό το ανώτατο όριο γίνεται ακόμη μικρότερο. Παράγοντες όπως η καθυστέρηση στην ουρά (queue delay), η καθυστέρηση πρόσβασης στο κανάλι και η καθυστέρηση μετάδοσης, μεταξύ άλλων, μπορεί επίσης να συμβάλουν στην συνολική καθυστέρηση που παρουσιάζουν τα απτικά πακέτα. Παρόμοια με την απαίτηση καθυστέρησης, η απαίτηση αξιοπιστίας του TI μπορεί επίσης να διαφέρει, ανάλογα με τη δεδομένη εφαρμογή. Μπορεί να ξεκινήσει από ένα ποσοστό αποτυχίας  $10^{-3}$  [5] αλλά οι πιο κρίσιμες εφαρμογές TI (π.χ. τηλεχειρουργική) απαιτούν αξιοπιστία έως και  $10^{-7}$  [5].

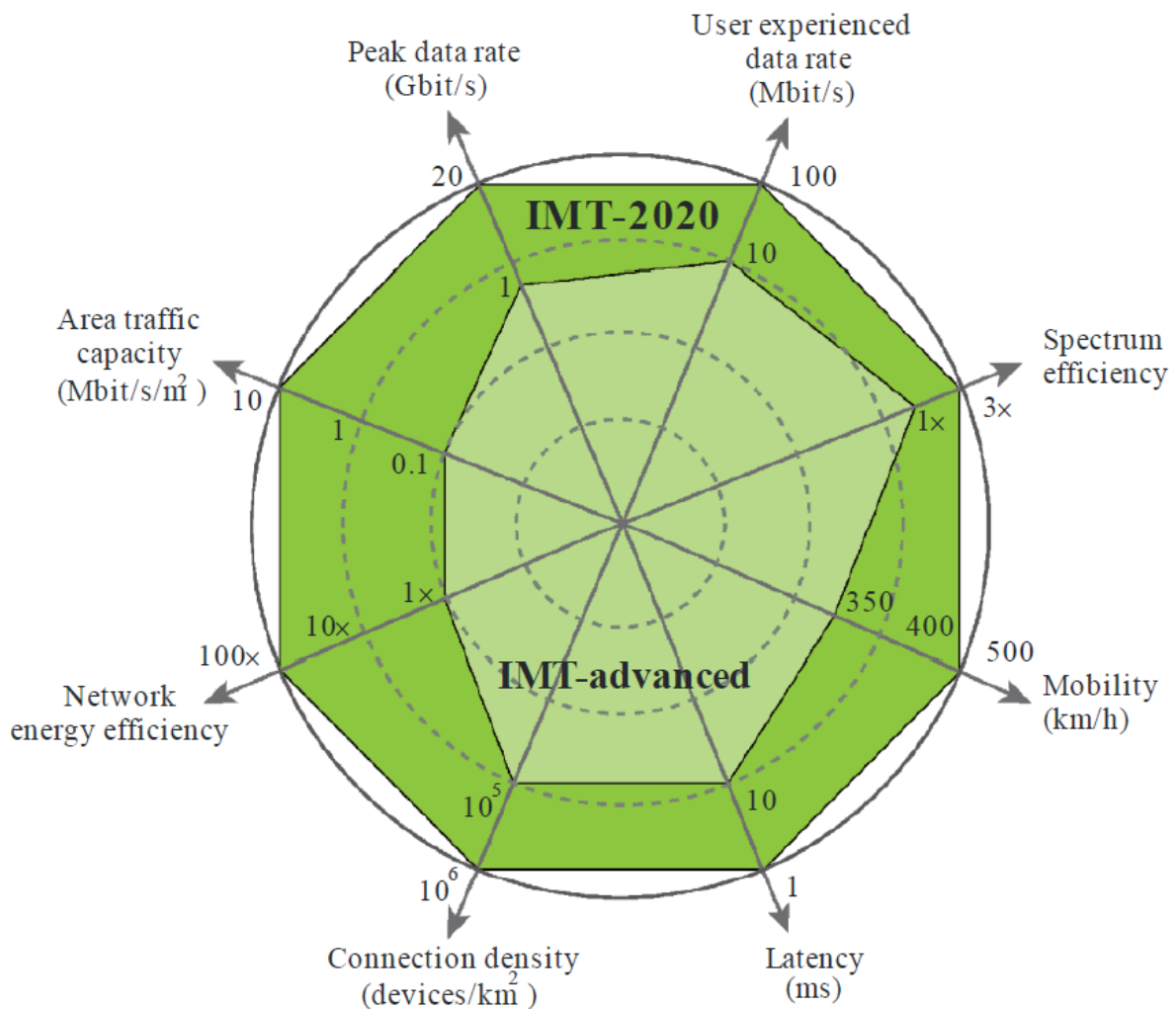
Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1.1) παρατίθενται μερικά ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης του TI και οι στόχοι/απαιτήσεις τους ως προς την κυκλοφορία των δεδομένων.



Use case / scenario	Traffic direction	Traffic types	Burst size	Reliability (%)	Latency (ms)	Average data rate
Immersive Virtual Reality	Slave → Master (Users → IVR system)	Haptic feedback	Kines./tactile sigs. 1 DoF: 2-8 B 3 DoFs: 6-24 B 6 DoFs: 12-48 B	99.9 (w/o compr.) 99.999 (w/ compr.)	<5 [21], [22]	1-4k pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s, (w/ compr.)
	Master → slave	Video	1.5 kB	99.999	<10 [19], [20]	1-100 Mbps
		Audio	100 B	99.9	<10 [19], [20]	5-512 kbps
		Haptic feedback	Kines./tactile sigs. 1 DoF: 2-8 B 3 DoFs: 6-24 B 6 DoFs: 12-48 B	99.9 (w/o compr.) 99.999 (w/ compr.)	1-50 [21], [22]	1-4k pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s, (w/ compr.)
Tele-operation	Master → Slave	Haptics	1 DoF: 2-8 B 3 DoFs: 6-24 B 6 DoFs: 12-48 B	99.999	1-10 (high dyn. environ.) 10-100 (dyn.)	1-4k pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s (w/ compr.)
	Slave → Master	Video	1.5 kB	99.999	10-20	1-100 Mbps
		Audio	50 B	99.9	10-20	5-512 kbps
		Haptic feedback	Tactile sigs. 1 DoF: 2-8 B 10 DoFs: 20-80 B 100 DoFs: 200-800 B	99.999	1-10	1-4k (w/o compr.) 100-500 (w/ compr.)
Automotive	Master → Slave	Haptics (pos., veloc., ang. veloc., decel., accel.)	2 kB	99.9 (w/o compr.) 99.999 (w/ compr.)	1-10 (life-critical, high-dyn. environ.) 10-100 (med.-dyn.) 100-1000 (stat. or quasi-stat.) [18]	100-2000 pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s, (w/ compr.) [17]
	Slave → Master	Video	2 kB- 4 kB	99.9	1-10 (high-dyn. environ.)	1-10 Mbps
		Audio	100 B	99.9	10-100 (med.-dyn.) 50-150 (stat. or quasi-stat.) [18]	100-500 kbps [17]
		Haptic feedback (forces, trqes, vib'tact. sigs.)	1 DoF: 2-8 B 10 DoFs: 20-80 B 100 DoFs: 200-800 B	99.9 (w/o compr.) 99.999 (w/ compr.)	1-10 (high-dyn. environ.) 1-10 (med.-dyn.) 1-10 (stat. or quasi-stat.) [18]	100-500 pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s, (w/ compr.) [17]
Internet of Drones (with humans; without humans latency requirement even more stringent)	Master → Slave	Haptic feedback	Kines./tactile sigs. 1 DoF: 2-8 B 3 DoFs: 6-24 B 6 DoFs: 12-48 B	99.9 (w/o compr.) 99.999 (w/ compr.)	2.5-5 (kines.) [23] 50-100 (tactile) [23]	1-4 k pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s, (w/ compr.)
	Slave → Master	GPS	2 kB	99.9	30-40 [23]	1-20 Mbps
		Video	4 kB	99.999		1-100 Mbps
		Audio	50 B	99.9		5-512 kbps
Haptic feedback	Kines./tactile sigs. 1 DoF: 2-8 B 3 DoFs: 6-24 B 6 DoFs: 12-48 B 10 DoFs: 20-80 B 100 DoFs: 200-800 B	99.9 (w/o compr.) 99.999 (w/ compr.)	2.5-5 (case dependent) [29]	1-4k pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s (w/ compr.)		
Inter-personal Communication	Participant 1 ↔ Participant 2	Video	1.5 kB	99.999	10-20	1-100 Mbps
		Audio	50 B	99.9	10-20	5-512 kbps
		VR	MTU	99.9	50	600 Mbps
		Haptic	Tactile sigs. 1 DoF: 2-8 B 10 DoFs: 20-80 B 100 DoFs: 200-800 B	99.999	1-10 (for interaction) [24], [25] 100-1000 (for observation) [24], [26], [27]	1-4k pkts/s (w/o compr.) 100-500 pkts/s, (w/ compr.)
Live Haptic-Enabled Broadcast	N/A	Video	See ATSC 3.0		NA	See ATSC 3.0
		Audio	See ATSC 3.0		NA	See ATSC 3.0
		Haptic	TBD		12-18 [40], [41]	See ATSC 3.0, 5G and SMPTE standards
Cooperative Automated Driving	Slave → Master	Haptic (pos., vel., accel., pre-proc. sens. data)	~50-1200 B	99.999 [38]	1-10 [37]--[39]	<10 Mbps [37], [38]
	Master → Slave	Video (raw radar, lidar, cam. data)	~2-4 kB	99.9 [38]	10-50 [37]--[39]	10-40 Mbps [37], [38]

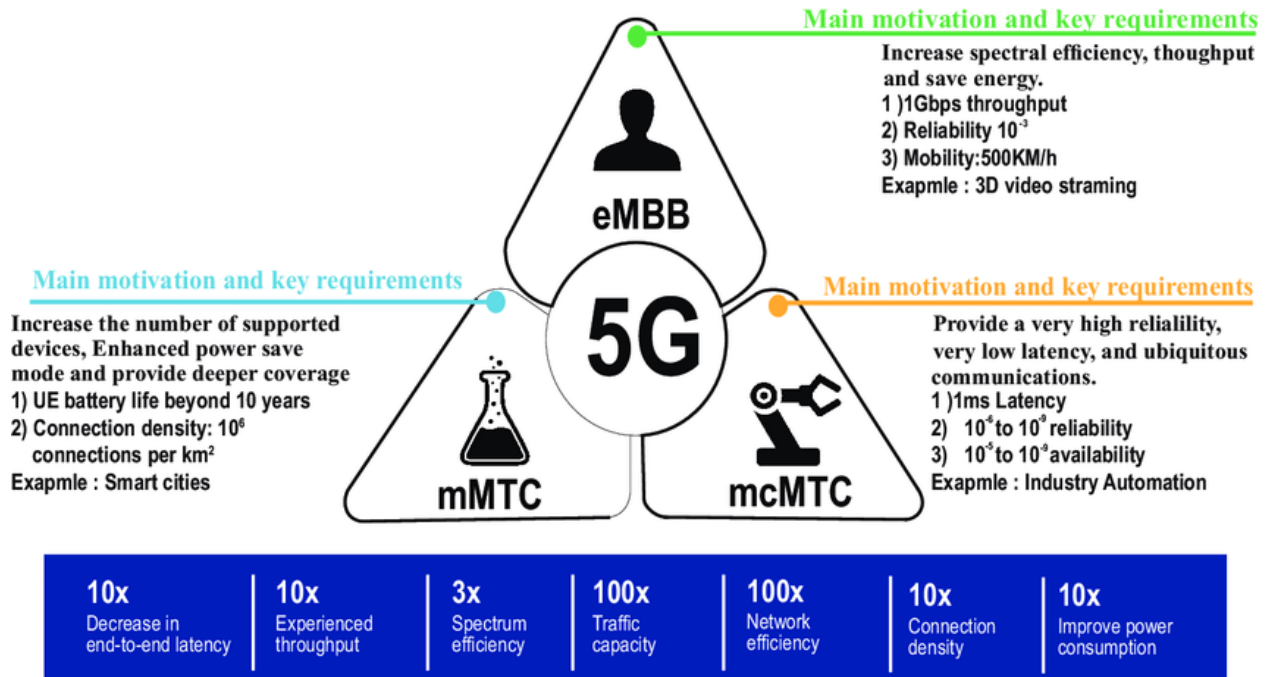
Πίνακας 1.1 Στόχοι, απαιτήσεις και χαρακτηριστικά κυκλοφορίας δεδομένων για τις περιπτώσεις χρήσης του TI [3]

Για την υποστήριξη των διαφόρων αναδυόμενων εφαρμογών/πλατφορμών όπως οι επικοινωνίες από Μηχανή σε Μηχανή (Machine to Machine - M2M), η Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), τα 5G δίκτυα κινητής, η Εικονική Πραγματικότητα (VR), τα αυτόνομα οχήματα και το ΤΙ, τα συστήματα θα πρέπει να επιτύχουν αρκετούς στόχους απόδοσης (Εικόνα 1.3 και 1.4). Κάποιοι από αυτούς είναι: 1 ms καθυστέρηση μετ' επιστροφής, 10 Mbps ανά τετραγωνικό μέτρο χωρητικότητα περιοχής, 20 Gbps μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων,  $10^6$  συσκευές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο και 100 Mbps ρυθμός μετάδοσης δεδομένων στα άκρα της κυψέλης [6].



**Εικόνα 1.3** Βελτίωση των απαιτήσεων από 4G (IMT-advanced) σε 5G (IMT-2020) συστήματα [6]

Συγκρίνοντας αυτές τις απαιτήσεις με τα τρέχοντα συστήματα 4G, τα συστήματα 5G πρέπει να παρέχουν 10x συνολική βελτίωση, 100x βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου, 100x βελτίωση της χωρητικότητας κυκλοφορίας και 10x μείωση στην καθυστέρηση [8] (Εικόνα 1.3 και 1.4).



**Εικόνα 1.4** Σύνοψη 3 πεδίων (eMBB: enhanced Mobile Broadband, mcMTC: Mission-Critical Machine-Type Communications, mMTC: Massive Machine-Type Communications) και των στόχων του 5G σύμφωνα με το IMT2020, τους 3GPP KPIs (key performance indicators), και την αναφορά της Qualcomm του 2018 [7]

Από αυτά τα αναμενόμενα αποτελέσματα, δύο πιο απαιτητικοί στόχοι για τα επερχόμενα συστήματα 5G είναι [9]:

- να επιτυγχάνουν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (περίπου ή λιγότερο από 1 ms) και
- να υπάρχει εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία (αξιοπιστία 99.999%, δηλ. ένα σε ένα εκατομμύριο πιθανότητα αποτυχίας).

Δεδομένου ότι αυτές οι δύο απαιτήσεις είναι απαραίτητες στις περισσότερες από τις εφαρμογές ΤΙ, τα σενάρια που τις υποστηρίζουν σε ασύρματα συστήματα, θα φέρουν μοναδικές ερευνητικές προκλήσεις. Το αναδυόμενο ΤΙ οραματίζεται την αλλαγή από των προσανατολισμένων στο περιεχόμενο επικοινωνιών, στο σύστημα ελέγχου-διεύθυνσης επικοινωνιών έτσι ώστε να ενδυναμωθεί ο ανθρώπινος έλεγχος, τόσο για τα πραγματικά όσο και για τα εικονικά αντικείμενα μέσω ασύρματων καναλιών [2], [10]. Με άλλα λόγια,

το TI προβλέπεται να παρέχει φυσικές απτικές εμπειρίες και εξ αποστάσεως έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, καθώς και να μετατρέψει τα δίκτυα παράδοσης περιεχομένου σε δίκτυα παράδοσης εργασίας-δεξιοτήτων [11].

Επιπλέον, θεωρείται ότι είναι η επόμενη εξέλιξη του IoT που ενσωματώνει M2M (Machine to Machine) και H2M (Human to Machine). Έχει ένα ευρύ φάσμα σεναρίων εφαρμογής στους τομείς της εκπαίδευσης, της βιομηχανίας, της ψυχαγωγίας και της ηλεκτρονικής περίθαλψης, και στοχεύει να φέρει επανάσταση σε διάφορες πτυχές της καθημερινότητάς [10]. Ως ένα παράδειγμα στον τομέα της ηλεκτρονικής περίθαλψης, μπορεί να εξεταστεί μια χειρουργική επέμβαση εξ αποστάσεως, η οποία απαιτεί από τον χειρουργό να πραγματοποιήσει την επέμβαση ενός ασθενούς από απόσταση με την παροχή ανατροφοδότησης μέσω απτικού εξοπλισμού-ρουχισμού, με αίσθηση της αφής και με την εφαρμογή των απαιτούμενων προσαρμογών και ενεργειών ελέγχου [12]. Ένα άλλο σημαντικό παράδειγμα για το TI είναι το σενάριο οδικής ασφάλειας [2], στο οποίο παρέχεται εξαιρετικά αξιόπιστη επικοινωνία και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, κάτι που αποτελεί μια κρίσιμη απαίτηση για την ασφάλεια των επιβατών.

### **Συνεισφορές της εργασίας**

Στην βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια πληθαίνουν τα άρθρα και έρευνες επισκόπησης στις περιοχές του TI. Η εργασία αυτή θα κάνει μια επισκόπηση αυτών των πηγών, με στόχο να αναλυθούν οι διάφορες πτυχές του TI. Προς αυτή την κατεύθυνση, οι κύριοι στόχοι της παρούσας έρευνας είναι:

- να παρέχει μια ολοκληρωμένη άποψη για το TI μαζί με ένα γενικευμένο πλαίσιο TI
- η μελέτη των τρεχόντων ζητημάτων για την υποστήριξη εφαρμογών TI,
- η παροχή μίας ανασκόπησης των πρόσφατων προόδων στο TI

Στη συνέχεια, επισημαίνονται εν συντομία οι κύριες συνεισφορές αυτής της έρευνας.

- Προτείνεται ένα γενικευμένο πλαίσιο για το TI,
- Προσδιορίζονται τα κύρια συστατικά του και στη συνέχεια συζητούνται διάφορες πτυχές του, συμπεριλαμβανομένων μιας βασικής TI αρχιτεκτονικής, των βασικών τεχνικών απαιτήσεων, των κύριων τομέων εφαρμογής και της ανάλυσης σκοπιμότητας των υφιστάμενων τεχνολογιών,

- Κατηγοριοποιούνται οι περιπτώσεις χρήσης TI
- Εντοπίζονται οι βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την υποστήριξη εφαρμογών
- Εντοπίζονται αρκετά ανοιχτά ερευνητικά ζητήματα και παρέχονται μερικές ενδιαφέρουσες ερευνητικές κατευθύνσεις και ενθάρρυνση μελλοντικών ερευνητικών δραστηριοτήτων στους σχετικούς τομείς.
- Συζητείται μία πολλά υποσχόμενη ευέλικτη αρχιτεκτονική διαδικτύου η οποία εν δυνάμει θα μπορέσει να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις και να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των εφαρμογών του TI.

### **Δομή της εργασίας**

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια γενική εισαγωγή στο Tactile Internet με κάποιους ορισμούς και γενικές έννοιες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται πιο αναλυτικά κάποιες γενικές έννοιες, εφαρμογές του TI καθώς και ήδη υπάρχουσες έρευνες και το όραμα του.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνολογίες, περιπτώσεις χρήσης και τα κριτήρια αξιολόγησης του TI.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αναφέρονται οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις κάποιων τεχνολογιών και η χρησιμοποίησή τους σε πλατφόρμες δοκιμών και εφαρμογές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ευέλικτη αρχιτεκτονική διαδικτύου, η FlexNGIA, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των προκλήσεων του TI.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής.

## 2 ΓΕΝΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΥΠΑΡΧΟΥΣΕΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

### 2.1 Τομείς εφαρμογών και προκλήσεις

Το ΤΙ αναμένεται να επιτρέψει την υλοποίηση ενός μεγάλου φάσματος νέων εφαρμογών που θα εμπλουτίσουν αυτές που προσφέρονται ήδη από το σημερινό Διαδίκτυο. Οι διαδραστικές και σε πραγματικό χρόνο απτικές εφαρμογές αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος αυτών, και θα παίξουν κεντρικό ρόλο στην ενίσχυση της καθημερινότητας. Τα εξ' αποστάσεως ελεγχόμενα συστήματα μπορεί να γίνουν το κλειδί για τη λειτουργία πολλών πολύ σημαντικών και ευαίσθητων τομέων, όπως η βιομηχανία (π.χ. δυσπρόσιτα και επικίνδυνα περιβάλλοντα), η υγειονομική περίθαλψη (π.χ. τηλεχειρουργική, τηλεδιάγνωση), η διαχείριση της κίνησης στους δρόμους (π.χ. συνεργατική και αυτοματοποιημένη οδήγηση), η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα (π.χ. σύστημα εκπαίδευσης πυροσβεστών), τα σοβαρά παιχνίδια και η εκπαίδευση (π.χ. παιχνίδια για εξατομικευμένη καρδιοπροπόνηση), και πολλά άλλα [2], [13] (Πίνακας 2.1).

Τομείς	Παραδείγματα
Βιομηχανία	Δυσπρόσιτα και επικίνδυνα περιβάλλοντα, εξ αποστάσεως χειρισμός ρομπότ
Υγειονομική περίθαλψη	Τηλεχειρουργική, τηλεδιάγνωση, απομακρυσμένη φυσικοθεραπεία
Διαχείριση κίνησης	Συνεργατική και αυτοματοποιημένη οδήγηση
Εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα	Σύστημα εκπαίδευσης πυροσβεστών, εμφάνιση χρήσιμων πληροφοριών σε τουριστικές τοποθεσίες
Εκπαίδευση	Εικονική επίσκεψη σε ιστορικές τοποθεσίες κατά τη διάρκεια μαθήματος ιστορίας, εικονικό χειρουργείο
Σοβαρά παιχνίδια	Προσομοίωση πραγματικών περιβάλλοντων για την επίτευξη ενός στόχου. π.χ. Παιχνίδια για εξατομικευμένη καρδιοπροπόνηση,
Αθλήματα	Εκπαίδευση/προπόνηση αθλημάτων με χρήση εξωσκελετού, π.χ. σερφ

**Πίνακας 2.1** Ενδεικτικοί τομείς εφαρμογών του ΤΙ και παραδείγματα

Οι απτικές εφαρμογές φέρνουν ένα σύνολο αυστηρών απαιτήσεων σε θέματα ασφάλειας, καθυστέρησης και αξιοπιστίας. Για να διασφαλιστεί η έγκαιρη παράδοση των μηνυμάτων ελέγχου (π.χ. κίνηση του χεριού ενός χειρουργού) και να αποφευχθεί η εμφάνιση του φαινομένου της ναυτίας του προσομοιωτή (cybersickness) (π.χ. στην περίπτωση της εικονικής πραγματικότητας), απαιτείται εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (Πίνακας 2.2) . Όταν πολλές αισθήσεις (αφή, βίντεο και ήχος) συμμετέχουν σε μια αλληλεπίδραση, αλλά

η ανάδραση των διαφορετικών αισθήσεων είναι αξιοσημείωτα ασύγχρονη τότε αναφερόμαστε στην ναυτία του προσομοιωτή (cybersickness) (π.χ., η χρονική υστέρηση μεταξύ της απτικής και της οπτικής αίσθησης υπερβαίνει το 1 ms) [14]. Ένα πολυτροπικό σήμα είναι όταν ένα απτικό σήμα Διαδικτύου περιλαμβάνει το συγχρονισμό μεταξύ πολλών αισθήσεων. Η εξαιρετικά υψηλή ασφάλεια και αξιοπιστία απαιτούνται για αρκετές από τις εφαρμογές που προβλέπονται για το TI.

QoS Parameter	Audio	Video	Graphics	Haptics
Delay	$\leq 150$ ms	$\leq 400$ ms	[100 - 300] ms	[3 - 60] ms
Jitter	$\leq 30$ ms	$\leq 30$ ms	$\leq 30$ ms	[1 - 10] ms
Data Loss Rate	$\leq 1\%$	$\leq 1\%$	$\leq 10\%$	[0.01 - 10]%
Data Rate	[22 Kbps - 200 Kbps]	[2.5 Mbps - 40 Mbps]	[45 Kbps - 1.2 Mbps]	[128 Kbps]

**Πίνακας 2.2** QoS παράμετροι και απαιτήσεις για μετάδοση ήχου, βίντεο, γραφικών και απτικών σημάτων [14]

Για παράδειγμα, κατά τον έλεγχο ενός αεροπλάνου σε πτήση ή κατά τη διάρκεια χειρουργικής επέμβασης ανοιχτής καρδιάς εξ αποστάσεως, είναι αδιανόητο ότι ενδέχεται να εμφανιστεί ένα σφάλμα επικοινωνίας (π.χ. που βασίζεται στο δίκτυο ή κακόβουλο παράγοντα). Λόγω των στοχευμένων εφαρμογών και των απαιτήσεών τους, η υλοποίηση του TI φέρνει ξεκάθαρα πολλές προκλήσεις. Όπως αποτυπώνεται στο [15], αυτές οι προκλήσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις: επικοινωνίας, απτικές, υπολογιστικές και νοημοσύνης.

Προκλήσεις	Παραδείγματα
Επικοινωνιακές	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Υποστήριξη επικοινωνίας με τα στοιχεία του cloud και της υπολογιστικής άκρων (edge computing)</li> <li>- Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση</li> <li>- Εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία</li> <li>- Μηχανισμοί ασφαλείας</li> </ul>
Απτικές	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Παράδοση, μετάδοση, αποθήκευση και απόκτηση απτικών πληροφοριών</li> <li>- Κινητική όσο και δερματική ανατροφοδότηση απαιτείται και στα δύο άκρα</li> <li>- Πολυτροπικά σχήματα κωδικοποίησης</li> <li>- Διάκριση μεταξύ των αλληλεπιδράσεων μηχανής με μηχανή, μηχανής με άνθρωπο και ανθρώπου με μηχανή</li> </ul>
Υπολογιστικές	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Επεξεργασία της απτικής ανατροφοδότησης</li> <li>- Εκτέλεση του προγράμματος έξυπνης πρόβλεψης</li> <li>- Αίσθηση αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο</li> </ul>
Νοημοσύνης	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ευφυΐα για την πρόβλεψη της απτικής πληροφορίας</li> <li>- Προβλέψεις ανατροφοδότησης</li> <li>- Μείωση καθυστερήσεων και διακοπών στην επικοινωνία</li> </ul>

**Πίνακας 2.3** Κατηγορίες προκλήσεων του TI και παραδείγματα

**Επικοινωνιακές προκλήσεις:** Αυτή η κατηγορία περιλαμβάνει τις απαιτήσεις για την υποστήριξη της επιπλέον επικοινωνίας με τα στοιχεία του cloud και της υπολογιστικής άκρων (edge computing), την εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και την εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία. Μένει να αναπτυχθεί μια επικοινωνιακή υποδομή που πληροί όλες αυτές τις απαιτήσεις. Απαιτούνται σχήματα πολυπλεξίας, μηχανισμοί ασφαλείας και ο σεβασμός της καθυστέρησης του 1 ms [14].

**Απτικές προκλήσεις:** Αυτές καλύπτουν την παράδοση, τη μετάδοση, την αποθήκευση και την απόκτηση απτικών πληροφοριών. Οι απτικές συσκευές είναι ικανές να ανιχνεύουν και να παρέχουν τόσο κινητική όσο και δερματική ανατροφοδότηση όπως απαιτείται και στα δύο άκρα [16]. Τα πολυτροπικά σχήματα κωδικοποίησης ορίζονται για να υποστηρίζουν τις διαφορετικές τροποποιήσεις (δηλαδή απτική, οπτική και φωνητική) των πληροφοριών του TI, χωρίς να αυξηθεί η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο [17]. Οι Steinbach et al. [17] αναφέρουν ότι η ακουστική και η οπτική κωδικοποίηση πληροφοριών έχει μελετηθεί εκτενώς, αλλά όχι και η απτική κωδικοποίηση. Αντιμετωπίζοντας την πρόκληση των απτικών επικοινωνιών, απαιτούνται επίσης προσαρμοσμένες διεπαφές για την διάκριση μεταξύ των αλληλεπιδράσεων μηχανής με μηχανή, μηχανής με άνθρωπο και ανθρώπου με μηχανή.

**Υπολογιστικές προκλήσεις:** Αυτές περιλαμβάνουν όλες τις υπολογιστικές πτυχές των απτικών επικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένης της επεξεργασίας της απτικής ανατροφοδότησης και της εκτέλεσης του προγράμματος έξυπνης πρόβλεψης έτσι ώστε να επιτευχθεί η σε πραγματικό χρόνο αίσθηση αλληλεπίδρασης. Ενώ οι υπολογισμοί μπορούν είναι χρονοβόροι και να απαιτούν πόρους, δεν θα πρέπει να επηρεάζουν την απαίτηση του χρόνου καθυστέρησης από άκρο σε άκρο.

**Προκλήσεις νοημοσύνης:** Αυτές σχετίζονται με την ευφυΐα που απαιτείται για την πρόβλεψη της απτικής πληροφορίας (π.χ. για την πρόβλεψη της επόμενης κίνησης του χειρουργού). Αυτό καλύπτει τις προβλέψεις ανατροφοδότησης, τις κινήσεις και τις ενέργειες για την βελτίωση του λανθάνοντος χρόνου, και τη μείωση καθυστερήσεων και διακοπών στην επικοινωνία. Οι προβλέψεις μπορεί να γεμίσουν ένα κρίσιμο κενό για



παράδειγμα, εάν το σήμα εντολής για την ακόλουθη ενέργεια δεν λαμβάνεται έγκαιρα, είτε λόγω της απόστασης (περισσότερα από 150 km) ή λόγω προβλήματος σύνδεσης.

## 2.2 Υπάρχουσες έρευνες στο TI

Το TI έχει προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον και κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος. Το 2014 όταν επινοήθηκε ο όρος Απτικό Διαδίκτυο, δημοσιεύτηκε μόνο μία εργασία για το θέμα, και στις αρχές του 2020, ο αριθμός έχει αυξηθεί σε 135. Το IEEE αναπτύσσει ειδικά πρότυπα με την ομάδα εργασίας 1918.1. Η αναφορά [3] παρέχει μια επισκόπηση στην προσπάθεια τυποποίησης. Ο πρώτος στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα βασικό πρότυπο που περιλαμβάνει τις απαιτήσεις, τα σενάρια εφαρμογής, την ορολογία, ακόμη και τη βασική(ες) αρχιτεκτονική(ες). Πιο συγκεκριμένα πρότυπα, όπως είναι οι απτικοί κωδικοποιητές, βρίσκονται επίσης υπό κατασκευή [17].

Υπάρχουν πολλές έρευνες και σεμινάρια μεταξύ των πολλών άρθρων που έχουν δημοσιευτεί μέχρι στιγμής στο TI. Υπάρχουν γενικές έρευνες που στοχεύουν στο ευρύτερο θέμα και υπάρχουν έρευνες που εστιάζουν σε συγκεκριμένες πτυχές του θέματος.

Εστίαση	Παραπομπή	Περιεχόμενο
Γενικές έρευνες	Fettweis et.al [2]	Ορισμός του TI, εφαρμογή σεναρίων και παρουσίαση των βασικών προκλήσεων
	Maier et.al [4]	Παρουσίαση του απτικού οράματος του Διαδικτύου και τού προβλεπόμενου αντίκτυπού του, ομοιότητες και διαφορές του με το IoT και το κινητό Διαδίκτυο, πρόοδοι στις σχετικές τεχνολογίες, σχετικές ερευνητικές προκλήσεις
	Aijaz et.al. [18]	Προσδιορισμός των ερευνητικών προκλήσεων για το TI και συμβουλές για το πώς θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν.
	Li et.al [20]	Παροχή του TI σε περιβάλλον 5G και εγγενής υποστήριξη που παρέχεται από τέτοια περιβάλλοντα
	Simsek et.al [13]	Κοινά σημεία του 5G και του TI, συστατικά αρχιτεκτονικά στοιχεία και εφαρμογές του TI Επισκόπηση εξελίξεων στο 5G και επίπτωση τους στο TI
	Sharma et.al [21]	Προοπτική του TI στην μετά 5G εποχή
	Gupta et.al [22]	Ανασκόπηση των εφαρμογών του TI σε δίκτυα 5G

Έρευνες στις απτικές πτυχές	Steinbach et.al [23]	Απτικές επικοινωνίες: Ανασκόπηση της κατάστασης της τεχνολογίας από τεχνικές και ψυχολογικές προοπτικές
	Van Den Berg et.al [14]	Προκλήσεις για τις απτικές επικοινωνίες στο TI
	Steinbach et.al [17]	Απτικοί αποκωδικοποιητές για το IT
	Antonakoglou [10]	Απτικές επικοινωνίες στα συστήματα TI 5G
	Steinbach et.al [24]	Προκλήσεις απτικής συμπίεσης και επικοινωνίας δεδομένων
Έρευνες σε άλλες πτυχές	Budhiraja et.al [25]	Μη ορθογώνια πολλαπλή πρόσβαση (Non Orthogonal Multiple Access) (NOMA) για απτικά συστήματα Διαδικτύου
	Kim et.al [5]	Επισκόπηση της λειτουργικότητας 5G για χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετική αξιοπιστία
	Sachs et.al [26]	Επισκόπηση της 5G τεχνολογίας για χαμηλή καθυστέρηση στο φυσικό επίπεδο
	Jiang et.al. [27]	Αντιμετώπιση της καθυστέρησης σε ανώτερα από το φυσικό επίπεδα
	Miao et.al. [28]	Ρομποτική χειρουργική
	Gupta et.al. [29]	Ρομποτική χειρουργική
	Haddadin et.al. [30]	Απτικά ρομπότ
	Aijaz et.al. [31]	Εφαρμογές TI στην βιομηχανία
	Dressler et.al. [32]	Συνεργατική οδήγηση
	Ateya et.al. [33]	Ζητήματα ασφαλείας στο TI
	Szymanski [34]	Ζητήματα ασφαλείας στο TI
	Dohler et.al. [16]	Edge computing και TI
	Oteafy et.al. [15]	Edge technologies και TI
	Cabrera et.al. [35]	Δίκτυα καθορισμένα από λογισμικό και TI
	Sukhmani et.al. [36]	Edge caching/computing και TI
	Aggarwal et.al. [37]	Fog computing και TI
	Bastug et.al. [38]	Εικονική πραγματικότητα σε ασύρματα συστήματα 5G

Πίνακας 2.4 Υπάρχουσες έρευνες στο TI

**Γενικές έρευνες:** Δίνουν μια γενική εισαγωγή στο TI, εξηγώντας το όραμα, τις προκλήσεις και τις δυνατότητες [2] [4], [18] [19]. Για παράδειγμα, ο Fettweis [2] ορίζει το TI, συζητά την εφαρμογή σεναρίων και παρουσιάζει τις βασικές προκλήσεις. Η παραπομπή [4] παρουσιάζει το απτικό όραμα του Διαδικτύου και τον προβλεπόμενο αντίκτυπό του, συζητά τις ομοιότητες και τις διαφορές του με το IoT και το κινητό Διαδίκτυο, ερευνά τις προόδους στις τεχνολογίες και εισάγει τις σχετικές ερευνητικές προκλήσεις (π.χ. υπολογιστική άκρων (edge computing), cloudlets και δίκτυα που καθορίζονται από λογισμικό (SDN)). Η αναφορά [18] προσδιορίζει τις ερευνητικές προκλήσεις για το TI και δίνει συμβουλές για το πώς θα μπορούσαν να αντιμετωπιστούν.

Ορισμένα άλλα άρθρα επικεντρώνονται στην παροχή του TI σε περιβάλλον 5G και συζητούν την εγγενή υποστήριξη που παρέχεται από τέτοια περιβάλλοντα [13], [20].

Ορισμένες από αυτές τις εργασίες αναλύουν επίσης πιθανές βελτιώσεις για την ενίσχυση αυτής της υποστήριξης. Για παράδειγμα, οι Simsek et al. στο [13] διερεύνησαν τα κοινά σημεία του 5G και του TI, τα συστατικά αρχιτεκτονικά στοιχεία (τομείς δικτύου, master-slave) και τις εφαρμογές του TI (π.χ. υγειονομική περίθαλψη, ρομποτική). Επίσης έκαναν μία επισκόπηση των προσδοκόμενων εξελίξεων στο 5G και πώς αυτές μπορούν να υποστηρίξουν την TI αρχιτεκτονική.

Το άρθρο [21] εστιάζει στην προοπτική του TI για την μετά 5G εποχή. Εισάγει ένα γενικό πλαίσιο για το ασύρματο TI, και τις τρεις απτικές περιοχές του Διαδικτύου (δηλ. ασύρματη επαυξημένη-εικονική πραγματικότητα, απτικές επικοινωνίες), συζητά την ασφάλεια-απόρρητο και εντοπίζει ανοιχτές ερευνητικές προκλήσεις.

Οι συγγραφείς στο [22] παρέχουν μια ανασκόπηση των υφιστάμενων έργων που θεωρούν το TI ως τη ραχοκοκαλιά για την ελαχιστοποίηση λανθανόντων καταστάσεων σε δίκτυα 5G και εστιασμένη κυρίως σε έξυπνες εφαρμογές που απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση όπως η έξυπνη εκπαίδευση, η έξυπνη υγειονομική περίθαλψη και η Industry 4.0. Εκεί επισημάνθηκαν οι κύριες διαφορές μεταξύ των παραδοσιακών TI και IoT και τονίστηκαν τα ανοιχτά ζητήματα για τη χρήση του TI σε διάφορες έξυπνες εφαρμογές.

**Έρευνες εστιασμένες στις απτικές πτυχές:** Πολλές από τις έρευνες και τα σεμινάρια είναι αφιερωμένα στις απτικές επικοινωνίες. Η αναφορά [23] συζητά τις απτικές επικοινωνίες, αλλά χωρίς εστίαση στο TI. Ανασκοπεί την κατάσταση της τεχνολογίας από τεχνικές και ψυχολογικές προοπτικές. Επίσης συζητήθηκε η ανάγκη για διάφορες αντικειμενικές ποιοτικές μετρήσεις για τις απτικές επικοινωνίες. Από την άλλη, οι Berg et al. [14] εστιάζουν στις προκλήσεις για τις απτικές επικοινωνίες στο TI. Οι συγγραφείς προτείνουν ορισμένες απαιτήσεις και τις χρησιμοποιούν για να εξετάσουν τις υπάρχουσες τεχνολογίες απτικών επικοινωνιών. Ωστόσο, αυτό το άρθρο δεν εξετάζει καμία άλλη πτυχή του TI. Το άρθρο [17] είναι ακόμη πιο περιορισμένης έκτασης, καθώς εστιάζει αποκλειστικά σε απτικούς κωδικοποιητές για το TI. Το άρθρο [10] παρέχει μια έρευνα για τις απτικές επικοινωνίες στα συστήματα TI 5G. Εισάγει τα βασικά της εξ αποστάσεως λειτουργίας και συζητά τις απτικές επικοινωνίες μέσω 5G και μέσω του Διαδικτύου, τις τεχνολογίες απτικού ελέγχου και τη μείωση-συμπύεση των δεδομένων. Η επισκόπηση του

άρθρου [24] εξέτασε τις προκλήσεις της απτικής συμπίεσης και επικοινωνίας δεδομένων, και τις λειτουργίες τηλεπαρουσίας και τηλεδιάδρασης. Οι συγγραφείς στο [14] παρείχαν μια περίληψη των προκλήσεων και των απαιτήσεων των απτικών επικοινωνιών, μαζί με κάποιες πιθανές λύσεις

**Έρευνες σε άλλες πτυχές:** Υπάρχουν έρευνες για πολλές άλλες πτυχές του TI: π.χ. ενοποίηση και ασφάλεια με άλλες τεχνολογίες, εφαρμογές και επικοινωνίες (χωρίς έμφαση στα απτικά). Το άρθρο [25] εξετάζει τη χρήση μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας ραδιοεπικοινωνιών, μη ορθογώνιας πολλαπλής πρόσβασης (Non Orthogonal Multiple Access) (NOMA) για απτικά συστήματα Διαδικτύου. Οι αναφορές [5] και [26] είναι αφιερωμένες στις εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες και στην χαμηλή καθυστέρηση, μια κρίσιμη πτυχή των TI συστημάτων. Το πρώτο παρέχει μια εις βάθος επισκόπηση της λειτουργικότητας 5G για χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετική αξιοπιστία, ενώ το δεύτερο δίνει μια επισκόπηση της νέας τεχνολογίας φυσικού επιπέδου. Η αντιμετώπιση και στα δύο αυτά έγγραφα δεν υπερβαίνει το φυσικό και το MAC (Media Access Control) επίπεδο. Πρέπει να σημειωθεί ότι μερικές αναφορές [27] υπερβαίνουν το φυσικό και το MAC επίπεδο στις συζητήσεις τους για χαμηλή καθυστέρηση.

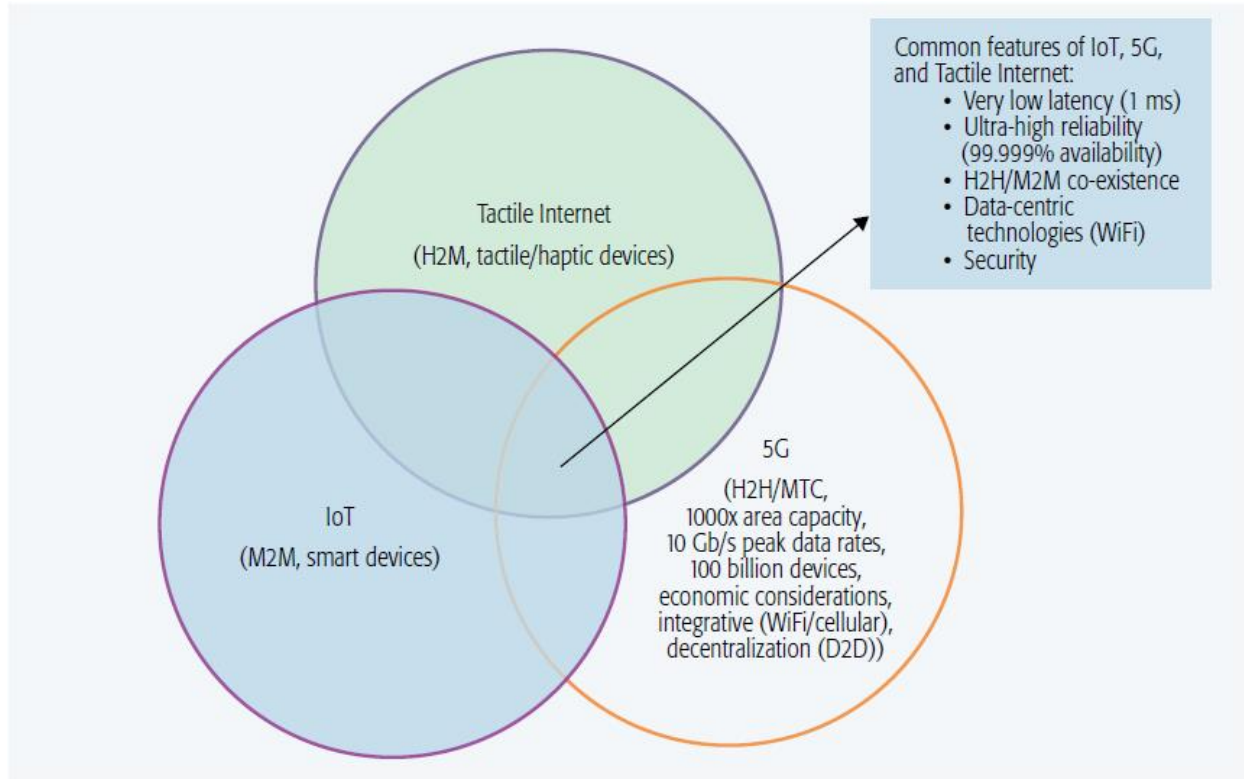
Οι εφαρμογές TI που έχουν αναλυθεί μέχρι στιγμής στη βιβλιογραφία περιλαμβάνουν τη ρομποτική χειρουργική [28], [29], τα απτικά ρομπότ [30], τις βιομηχανίες γενικά [31], και τη συνεργατική οδήγηση [32]. Μερικές εργασίες είναι επίσης αποκλειστικά αφιερωμένες σε ζητήματα ασφαλείας [33], [34]. Η ενσωμάτωση ή χρήση των ακόλουθων τεχνολογιών με το TI έχει συζητηθεί σε πολλά άρθρα: edge computing [16], edge technologies [15], και 5G, IoT, δίκτυα καθορισμένα από λογισμικό [35], edge caching/computing [36], και fog computing [37].

Όσον αφορά το ασύρματο AR/VR, το άρθρο [38] τόνισε τη σημασία της εικονικής πραγματικότητας ως χρήσης σε ασύρματα συστήματα 5G. Συζητήθηκαν πιθανές επιστημονικές προκλήσεις και ερευνητικοί δρόμοι για την υλοποίηση διασυνδεδεμένης εικονικής πραγματικότητας μέσω συνδέσεων ασύρματου δικτύου. Επιπρόσθετα, παρουσιάστηκαν τρεις διαφορετικές μελέτες περίπτωσης VR που σχετίζονται με την άρθρωση της κατανομής και του υπολογισμού των πόρων, και του προληπτικού έναντι

του αντιδραστικού υπολογισμού, καθώς και των αυτοοδηγούμενων οχημάτων με δυνατότητα AR.

### 2.3 Το όραμα για το TI

Το TI αναμένεται να είναι η επόμενη γενιά του IoT και να φέρει επανάσταση σε διάφορες πολιτιστικές, οικονομικές και κοινωνικές πτυχές της καθημερινότητάς μας, επιτρέποντας τις αλληλεπιδράσεις (Human to machine) H2M και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο στα Beyond 5G (B5G) δίκτυα. Το TI θα προσθέσει διάφορα νέα χαρακτηριστικά στα μελλοντικά δίκτυα B5G και IoT όπως εξ' αποστάσεως χειρισμό απτικών μηχανών, αξιοπιστία σε επίπεδο φορέα, υψηλή ασφάλεια, εξαιρετικά γρήγορους χρόνους αντίδρασης και υψηλή διαθεσιμότητα [39]. Σε αντίθεση με τα ασύρματα δίκτυα και το συμβατικό Διαδίκτυο που συνήθως λειτουργούν ως μέσο για οπτικές και ακουστικές πληροφορίες, το TI θα παρέχει ένα μέσο για την ενεργοποίηση της αφής και την μετάδοση της σε πραγματικό χρόνο μαζί με τις οπτικοακουστικές πληροφορίες. Αν και υπάρχουν διαφορές μεταξύ των εννοιών των TI, των δικτύων IoT και του 5G, όσον αφορά τα υποκείμενα παραδείγματα επικοινωνίας και τις συσκευές ενεργοποίησης, υπάρχει ένα κοινό σύνολο απαιτήσεων για τα μελλοντικά δίκτυα B5G (Εικόνα 2.1). Αυτό συμπεριλαμβάνει την ασφάλεια, τις επικοινωνίες τύπου μηχανήματος (Machine Type Communications - MTC), την υπερ-υψηλή αξιοπιστία περίπου στο 99,999%, την συνύπαρξη των Επικοινωνιών Ανθρώπινου Τύπου (Human Type Communications - HTC) και την πολύ χαμηλή καθυστέρηση περίπου 1 ms [4].



**Εικόνα 2.1** Κοινά σημεία μεταξύ IoT, 5G και Tactile Internet [4]

Η κύρια εστίαση του TI είναι στις επικοινωνίες H2M και στις λειτουργίες τηλεχειρισμού με τη χρήση διαφόρων απτικών συσκευών. Επιπλέον, οι αναδυόμενες επικοινωνίες M2M (Machine to Machine) είναι επίσης σημαντικές σε περιπτώσεις χρήσης TI, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών ρομπότ, και του ηλεκτρονικού ελέγχου ευστάθειας των οχημάτων [39]. Επιπλέον, το TI αναμένεται να ενισχύσει σημαντικά την ευημερία της ανθρώπινης ζωής συνεισφέροντας σε διάφορους τομείς συμπεριλαμβανομένης της υγειονομικής περίθαλψης, της προσωπικής ασφάλειας, της ενέργειας, της εκπαίδευσης και της οδικής κυκλοφορίας. Επιπλέον, το TI θα συμβάλει στην αντιμετώπιση των σύνθετων προκλήσεων που αντιμετωπίζει η σημερινή ανθρώπινη κοινωνία λόγω της μετάβασης στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, τις δημογραφικές αλλαγές με την αυξανόμενη γήρανση του πληθυσμού και την αυξανόμενη ζήτηση για κινητικότητα [39].

Πιο συγκεκριμένα, το TI επιτρέπει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών και περιπτώσεων επιχειρηματικής χρήσης συμπεριλαμβανομένων των απτικών ρομπότ, των τηλελειτουργικών συστημάτων, του έξυπνου ελέγχου κυκλοφορίας, της ασύρματης

επαυξημένης-εικονικής πραγματικότητας (AR)/(VR), eHealthcare, drones, την απομακρυσμένη οδήγηση, τα έξυπνα ενεργειακά συστήματα και τη συνεργατική οδήγηση με αυτόματο πιλότο. Επιπλέον, διάφορες κρίσιμες εφαρμογές στον τομέα των κατασκευών και μεταφορών, της κινητικότητας, της υγειονομικής περίθαλψης, καθώς και μη κρίσιμες όπως η εκπαίδευση μπορούν να θεωρηθούν πολύ υποσχόμενες περιπτώσεις χρήσης του TI [3].

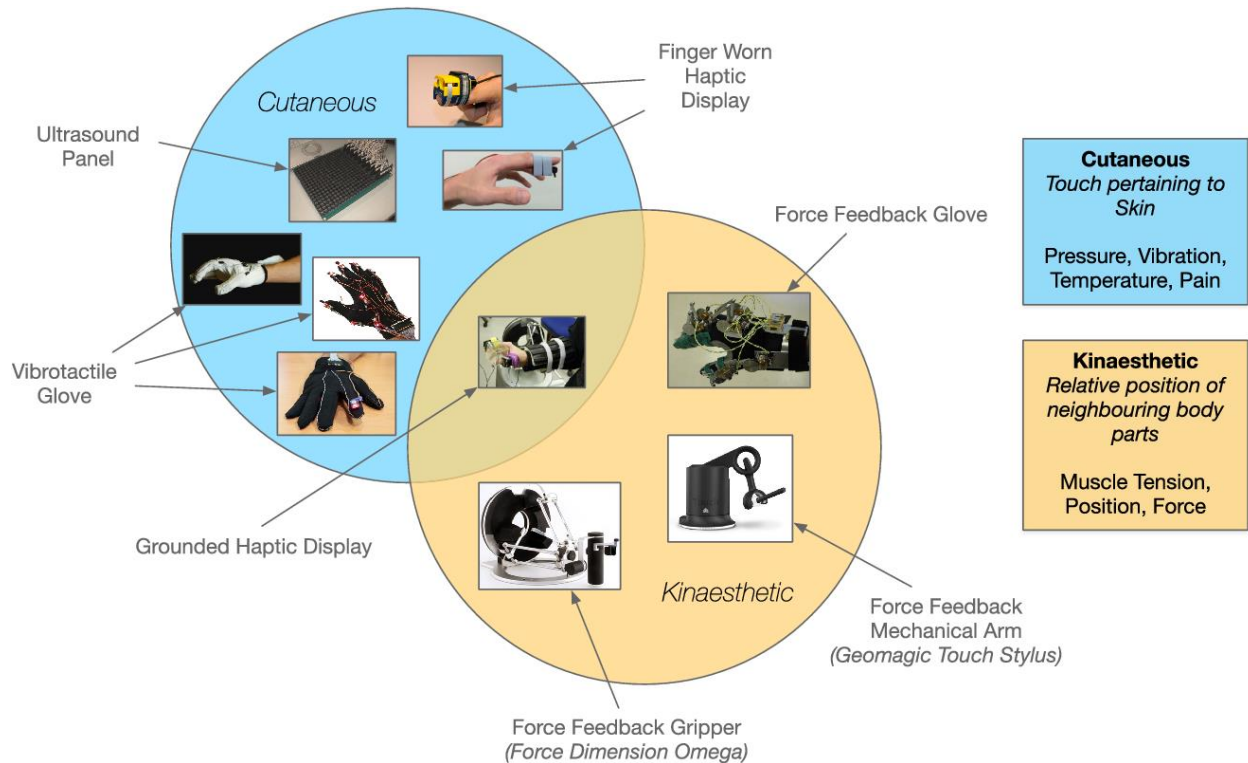
Ωστόσο, οι υπάρχουσες υποδομές δικτύου είναι τεχνικά και εννοιολογικά ανεπαρκείς για την υποστήριξη των αναδυόμενων εφαρμογών TI. Το TI φέρνει διάφορες μη συμβατικές και αυστηρές απαιτήσεις σε μελλοντικά δίκτυα B5G (Beyond 5G) mobile edge cloud, σε επίπεδο αξιοπιστίας, αρχιτεκτονικής συστήματος, καθυστέρησης, δικτύων πρόσβασης και αισθητήρων-ενεργοποιητών [39]. Ο σχεδιασμός των απαιτήσεων των συστημάτων-συσκευών TI για να επιτευχθεί η αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο, εξαρτάται από τις συμμετέχουσες ανθρώπινες αισθήσεις, δεδομένου ότι η ταχύτητα της αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με το υποκείμενο σύστημα-περιβάλλον περιορίζεται από τις αντιληπτικές μας διαδικασίες. Επίσης, είναι σημαντική η προσαρμογή και η ανατροφοδότηση του συστήματος που βασίζεται στον χρόνο αντίδρασης του ανθρώπου. Εκτός από τον πολύ χαμηλό από άκρο σε άκρο λανθάνοντα χρόνο, πρέπει να διασφαλιστούν η αξιοπιστία των συστημάτων, οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του TI, η διαθεσιμότητα και η ασφάλεια δεδομένων χωρίς να παραβιάζονται οι απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης, λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερήσεις κρυπτογράφησης.

Παρ' όλα αυτά, οι υπάρχουσες κεντρικές αρχιτεκτονικές δεν είναι αρκετές για να ανταποκριθούν στις περισσότερες κατακεντρωμένες αρχιτεκτονικές δικτύων που βασίζονται σε edge computing για φορητές συσκευές και cloudlet, και χρειάζεται να διερευνηθούν για να έρθουν πιο κοντά οι εφαρμογές TI με τους τελικούς χρήστες [4]. Επίσης, είναι απαραίτητο να επανασχεδιαστούν τα ασύρματα δίκτυα πρόσβασης με τη διερεύνηση νέων δυνατοτήτων αποφυγής καθυστέρησης των εφαρμογών TI, κατανομής πόρων, διαχείρισης παρεμβολών, μηχανισμών ανάδρασης, και τεχνικών ελέγχου μεσαίας πρόσβασης (MAC) προκειμένου να ανταποκριθούν στις αυστηρές απαιτήσεις αξιοπιστίας [39]. Ακόμα διάφορες αναδυόμενες τεχνολογίες δικτύου όπως το edge fog computing, η κωδικοποίηση δικτύου, τα δίκτυα ορισμένα από λογισμικό (Software Defined Networks -

SDN) και η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (Network Functions Virtualization - NFV), είναι πολύ υποσχόμενα παραδείγματα για την υποστήριξη των εφαρμογών TI σε μελλοντικά δίκτυα B5G (Beyond 5G).

Την τελευταία δεκαετία έχει γίνει σημαντική έρευνα στην ανάπτυξη έξυπνων συστημάτων αίσθησης αφής (Εικόνα 2.2), τα οποία αποτελούνται κυρίως από απτικούς αισθητήρες (οπτικούς, χωρητικούς, πιεζοηλεκτρικούς και πιεζο-αντιστατικούς) και έξυπνα εργαλεία επεξεργασίας σήματος που έχουν την ικανότητα λήψης αποφάσεων και ερμηνείας πληροφοριών [40]. Ωστόσο, απαιτείται ακόμα ανάπτυξη στους αλγόριθμους Machine Learning (ML). Επίσης έχουν γίνει αρκετές διεπιστημονικές ερευνητικές προσπάθειες σχεδίασης έξυπνων συστημάτων αίσθησης και αφής, όσον αφορά τα υλικά συσκευών, τις τεχνολογίες κατασκευής και την επεξεργασία σημάτων για την αντιμετώπιση του όγκου των πολυδιάστατων δεδομένων από τους αισθητήρες αφής. Επιπλέον εκτός από τον χειρισμό εξ' αποστάσεως, η μετάδοση απτικών δεδομένων-αισθήσεων μέσω του ασύρματου διαδικτύου, επιτρέποντας παράλληλα την αίσθηση αφής από απόσταση, είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Ακόμα, διάφορες πτυχές των υποκείμενων ασύρματων δικτύων επικοινωνίας, όπως η διαθεσιμότητα, η αξιοπιστία, η ασφάλεια και ο λανθάνοντας χρόνος, πρέπει να ληφθούν υπόψη στο σχεδιασμό των συστημάτων TI.





**Εικόνα 2.2** Ενδεικτικές συσκευές απτικής ανατροφοδότησης [14]

Αρκετά έργα τυποποίησης αναμένεται να δημιουργήσουν στο εγγύς μέλλον συνέργειες μεταξύ της εξέλιξης των υφιστάμενων ασύρματων δικτύων και των τομέων εφαρμογής του TI. Από την προοπτική των ρυθμιστικών προτύπων, εξετάζοντας το TI στο πλαίσιο μιας τεχνολογίας υπό παρακολούθηση, ο τομέας τυποποίησης τηλεπικοινωνιών της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) δημοσίευσε μια έκθεση σχετικά με διάφορες πτυχές του TI, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων για τον εξοπλισμό, τις εφαρμογές τόσο σε κρίσιμους όσο και σε μη κρίσιμους τομείς και τα πλεονεκτήματα για την κοινωνία. Όσον αφορά τη συνεχιζόμενη τυποποίηση, δημιουργήθηκε μια νέα τυπική οικογένεια IEEE P1918.X όπου ορίζεται το Tactile Internet [6].

Ο σκοπός του βασικού προτύπου TI IEEE P1981.1 είναι να ορίσει ένα πλαίσιο TI, το οποίο ενσωματώνει τις περιγραφές της ορολογίας και των ορισμών του, συμπεριλαμβανομένων των σεναρίων εφαρμογής, τις τεχνικές παραδοχές και τις απαραίτητες λειτουργίες [3]. Εντός αυτού, το IEEE P1918.X ορίζει την αρχιτεκτονική τεχνολογία και τις παραδοχές των συστημάτων TI, το IEEE P1918.X.3 εργάζεται προς την κατεύθυνση MAC για το TI, το IEEE P1918.X.2 επικεντρώνεται στην Τεχνητή

Νοημοσύνη (AI) για το TI και το IEEE P1918.X.1 είναι αφιερωμένο σε Codec για το TI. Επίσης, η Κοινοπραξία Βιομηχανικού Διαδικτύου (IIC) (η οποία ξεκίνησε από τις IBM, GE, AT&T, Intel και CISCO και που αργότερα υποστηρίχθηκε από 160 εταιρείες) αναπτύσσει ένα βιομηχανικό πρότυπο για IoT χαμηλής καθυστέρησης (IIoT) για διαφορετικά έξυπνα κυβερνοφυσικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των έξυπνων συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης, της έξυπνης κατασκευής και των έξυπνων συστημάτων μεταφοράς [34], [41].

## 2.4 Συνοψη

Σε αυτή την ενότητα αρχικά αναφέρθηκαν οι τομείς εφαρμογών του TI καθώς και οι προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν έτσι ώστε να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις του TI. Στη συνέχεια έγινε μία επισκόπηση στις έρευνες και τις εργασίες στο θέμα του TI γενικά, αλλά και σε αυτές που επικεντρώνουν σε συγκεκριμένες πτυχές του TI. Ολοκληρώθηκε το κεφάλαιο με την παρουσίαση του οράματος άλλα και των πρόσφατων κατευθύνσεων για το TI.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα μελετήσουμε τις τεχνολογίες που χρειάζονται για να γίνει εφικτό το TI και θα αναφερθούν μερικές ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης. Στη συνέχεια θα μελετηθούν κάποια κριτήρια για την αξιολόγηση του και θα αναφερθούν μερικές από τις αρχιτεκτονικές και τα πρωτοκολλά που έχουν προταθεί για την υλοποίηση του TI.

### 3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ, ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

#### 3.1 Τεχνολογίες

Σε αυτή την ενότητα θα συζητηθούν τα κοινά σημεία και οι διαφορές μεταξύ του TI και των σχετικών τεχνολογιών, καθώς και οι βασικές τεχνολογίες που κάνουν εφικτό το TI.

#### Σχετικές Τεχνολογίες

Για την καλύτερη κατανόηση του οράματος του TI, μπορεί να είναι χρήσιμο να αναλυθούν οι λεπτές διαφορές αλλά και τα κοινά σημεία μεταξύ του TI ,του IoT και των δικτύων κινητής τηλεφωνίας (2G-3G-4G-5G) (Πίνακας 3.1). Τα συμβατικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πριν από το 5G επικεντρώνονται στην ενίσχυση των επικοινωνιών H2H (Human to Human, ανθρώπου σε άνθρωπο), εστιάζοντας κυρίως στη μετάδοση δεδομένων τριπλής αναπαραγωγής (δηλαδή δεδομένα, βίντεο, φωνή). Ενώ το IoT βασίζεται στις επικοινωνίες M2M (Machine to Machine, μηχανής με μηχανή), κάτι που είναι χρήσιμο για την αυτοματοποίηση των μηχανοκεντρικών και βιομηχανικών διαδικασιών [42]. Αντίθετα, το TI περιέχει την αλληλεπίδραση ανθρώπου με μηχανή/ρομπότ (Human to Machine/Robot - H2M/R) και την εγγενή αλληλεπίδραση του ανθρώπου στον βρόχο (Human-in-the-loop ή HITL), επιβάλλοντας έτσι την ανάγκη για μια ανθρωποκεντρική προσέγγιση σχεδιασμού.

Τεχνολογία	Κύριος τύπος επικοινωνίας
Συμβατικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας πριν από το 5G (2G-3G-4G)	Επικοινωνίες H2H (Human to Human, ανθρώπου σε άνθρωπο). Εστίαση κυρίως στη μετάδοση δεδομένων τριπλής αναπαραγωγής (δηλαδή δεδομένα, βίντεο, φωνή).
Internet of Things (IoT, Διαδίκτυο των πραγμάτων)	Επικοινωνίες M2M (Machine to Machine, μηχανής με μηχανή). Χρήσιμο για την αυτοματοποίηση των μηχανοκεντρικών και βιομηχανικών διαδικασιών.
Tactile Internet (TI, Απτικό Διαδίκτυο)	Περιέχει την αλληλεπίδραση ανθρώπου με μηχανή/ρομπότ (Human to Machine/Robot - H2M/R) και την εγγενή αλληλεπίδραση του ανθρώπου στον βρόχο (Human-in-the-loop ή HITL).

Πίνακας 3.1 Τύποι επικοινωνίας και σχετικές τεχνολογίες

Αυτό κάνει εφικτή την προσθήκη μιας νέας διάστασης στην αλληλεπίδραση H2M/R μέσω του Διαδικτύου, καθώς και μια πληθώρα συναρπαστικών ερευνητικών κατευθύνσεων [4],

[43]. Για να γίνει καλύτερα κατανοητό το πλήρες δυναμικό της αναδυόμενης ρομποτικής, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο απώτερος στόχος του TI δεν είναι να αντικαταστήσει τους ανθρώπους από μηχανές, αλλά να επεκτείνει τις δυνατότητες των ανθρώπων αυξάνοντας τις ταυτόχρονα [44]. Σε αντίθεση με το IoT και τα κινητά δίκτυα, στο TI δίνεται σημαντική έμφαση στο ρόλο των συστημάτων HITL, που εγγενώς βασίζονται κατά καιρούς στην ανθρώπινη τεχνογνωσία. Η ρομποτική τηλεχειρουργική είναι ένα ενδιαφέρον παράδειγμα εφαρμογών Διαδικτύου με χαμηλή καθυστέρηση, του HITL Tactile, όπου το υποκείμενο ρομποτικό σύστημα σε αντίθεση με ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα ρομποτικής χειρουργικής, επεκτείνει τις δυνατότητες του χειρουργού [16].

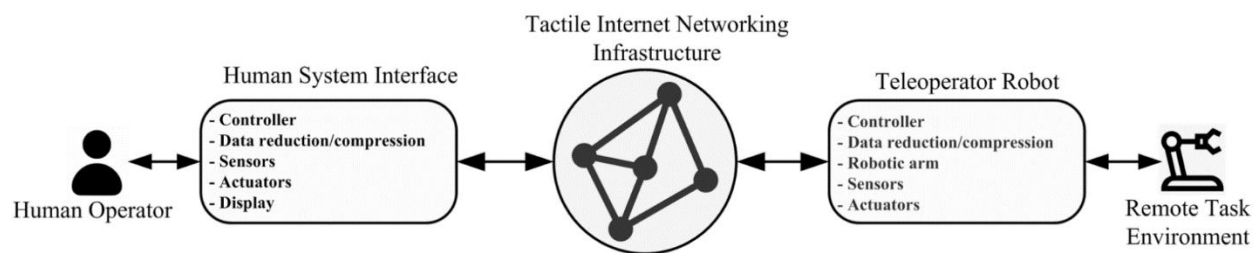
Τα δίκτυα 5G αρχικά ήταν γνωστά ως πολλά υποσχόμενος υποψήφιος για την ενεργοποίηση του TI, αν και οι τρέχουσες εμπειρίες από αυτά τα δίκτυα αποδεικνύουν το αντίθετο. Το 5G είναι ικανό να παρέχει μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων έως και 20 Gbps. Παρόλα αυτά, δεν ανταποκρίνεται στις αυστηρές απαιτήσεις του TI εξαιτίας των παρακάτω:

Πρώτον, αναμένεται ότι οι αναδυόμενες εφαρμογές TI θα απαιτούν ταχύτητες δεδομένων της τάξης των Tbps. Ως παράδειγμα, σημειώνεται ότι οι τυπικές συσκευές VR απαιτούν μια σύνδεση επικοινωνίας πολλαπλών Gbps. Στα δίκτυα 5G, αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω καλωδιακής σύνδεσης με υπολογιστή, δημιουργώντας έτσι σοβαρούς περιορισμούς στην κινητικότητα των χρηστών. Αυτές οι απαιτήσεις μπορεί να γίνουν ακόμη υψηλότερες για εφαρμογές TI, όπου υπάρχει ανάγκη μετάδοσης πολυαισθητηριακών περιεχομένων σε πραγματικό χρόνο [45].

Δεύτερον, είναι σαφές ότι όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας προηγούμενης γενιάς, το 5G βασίζεται κυρίως στον σχεδιασμό με επίκεντρο τις προσεγγίσεις περιεχομένου και μηχανής για να πραγματοποιηθεί η κυκλοφορία M2M και H2H αντίστοιχα. Αντίθετα, το TI έχει στόχο την πραγματοποίηση της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής μέσω των επικοινωνιών H2M/R, η οποία διαφέρει από τις συμβατικές κινήσεις δεδομένων M2M και H2H με πολλούς τρόπους. Η πρώτη βασική διαφορά μεταξύ της συμβατικής κίνησης δεδομένων H2H της M2M και της H2M/R βρίσκεται στον υποκείμενο τύπο της επικοινωνίας, ο οποίος πηγάζει από τη φύση HITL της τελευταίας. Οι απτικές επικοινωνίες είναι κεντρικό στοιχείο στην κυκλοφορία H2M/R και επιτρέπουν σε έναν

άνθρωπο, τον εξ' αποστάσεως χειρισμό ρομπότ μέσω μιας αμφίδρομης επικοινωνίας πραγματικού χρόνου, σε αντίθεση με τη συμβατική κυκλοφορία δεδομένων που βασίζεται είτε σε απλή είτε σε διπλή μονοκατευθυντική επικοινωνία.

Για καλύτερη κατανόηση, η εικόνα 3.1 απεικονίζει ένα παράδειγμα τυπικού τηλελειτουργικού συστήματος βασισμένου σε αμφίδρομες απτικές επικοινωνίες για ανταλλαγή εντολών ελέγχου σε πραγματικό χρόνο από έναν άνθρωπο χειριστή και τις απτικές ανατροφοδοτήσεις από ένα απομακρυσμένο ρομπότ.



**Εικόνα 3.1** Σύστημα εξ αποστάσεως χειρισμού που βασίζεται σε αμφίδρομες απτικές επικοινωνίες μεταξύ ενός ανθρώπου χειριστή και ενός απομακρυσμένου ρομπότ [55].

Τα βασικά στοιχεία του συστήματος τηλελειτουργίας όπως φαίνονται στην εικόνα 3.1, είναι το τηλεχειριζόμενο ρομπότ, η υποδομή δικτύου, ο άνθρωπος χειριστής και η ανθρώπινη διεπαφή του συστήματος. Μια τοπική συσκευή ανθρώπινης διεπαφής του συστήματος χρησιμοποιείται για να εμφανιστεί η απτική αλληλεπίδραση με το απομακρυσμένο ρομπότ. Ο αριθμός των ανεξάρτητων συντονιστών ο οποίος απαιτείται για να προσδιοριστεί πλήρως ο έλεγχος-κατεύθυνση της θέσης και η ταχύτητα και ο προσανατολισμός του τηλεχειριζόμενου ρομπότ, ορίζεται από τους βαθμούς ελευθερίας (DoF). Τα διαθέσιμα συστήματα τηλελειτουργίας περιλαμβάνουν ρομποτικούς βραχίονες με 1 έως 20 DoF, ή ακόμα πιο ψηλά. Για παράδειγμα, ένας ρομποτικός βραχίονας 6 DoF επιτρέπει τόσο τη μεταφορική κίνηση μέσω της περιστροφικής κίνησης (κύλιση, εκτροπή, βήμα), μέσω της δύναμης (σε τρισδιάστατο χώρο) και μέσω ροπής. Οι τοπικοί ελεγκτές και στα δύο άκρα του συστήματος τηλελειτουργίας διασφαλίζουν την παρακολούθηση της απόδοσης και της σταθερότητας της ανθρώπινης διεπαφής του συστήματος και του τηλεχειριζόμενου ρομπότ.

Οι ιδιότητες της ανθρώπινης απτικής αντίληψης μπορούν να αξιοποιηθούν από προηγμένες τεχνικές αντιληπτικής κωδικοποίησης (perceptual coding) προκειμένου να μειωθεί ουσιαστικά ο ρυθμός των απτικών πακέτων [23], [10]. Μια άλλη λεπτή διαφορά που περιορίζει την κυκλοφορία δεδομένων H2M/R από τις συμβατικές κυκλοφορίες M2M και H2H μπορεί να εκφραστεί όσον αφορά τη διαδικασία άφιξης των πακέτων. Ενώ τα μοντέλα άφιξης πακέτων Pareto και Poisson έχουν χρησιμοποιηθεί από καιρό για την περιγραφή στις κινήσεις M2M και H2M, οι διανομές αυτές δεν αρκούν για να αποτυπωθούν τα μοναδικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας H2M/R, τα οποία κυριαρχούνται από σήματα ανάδρασης και ελέγχου. Πρόσφατα, οι συγγραφείς του [43] έδειξαν ότι οι διαδρομές ανάδρασης και εντολών των συστημάτων τηλελειτουργίας μπορούν να μοντελοποιηθούν από κοινού με ντετερμινιστικές κατανομές χρόνου μεταξύ άφιξης πακέτων, Gamma ή γενικευμένο Pareto, ανάλογα με τη δεδομένη τιμή των αντίστοιχων παραμέτρων νεκρής ζώνης. Σε μια άλλη μελέτη, οι συγγραφείς των [46] και [47] σημείωσαν ότι οι χρόνοι μεταξύ άφιξης πακέτων ενός συστήματος VR με απτική δυνατότητα μπορούν να μοντελοποιηθούν με τη γενίκευση της κατανομής Pareto, που ισοδυναμεί με τα ευρήματα του [43].

Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, το TI επιβάλλει την ανάγκη για μια ολοκληρωμένη σχεδίαση λειτουργιών επικοινωνίας, υπολογισμού και ελέγχου, οι οποίες ως επί το πλείστον παραμελούνται στο 5G. Παρόλο που το 5G μπορεί να είναι ένας ενεργοποιητής των εφαρμογών URLLC (Ultra-reliable low latency communication) γενικά, ο σχεδιασμός των στόχων του δεν ήταν προσαρμοσμένος στα μοναδικά χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις του TI με την εγγενή φύση του HITL. Τέτοιες αδυναμίες του 5G προσέκλυσαν πρόσφατα αρκετό ενδιαφέρον για τον καθορισμό συστημάτων επόμενης γενιάς 6G τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον ακαδημαϊκό κόσμο. Σε αυτά τα συστήματα θα δώσουν ώθηση μια ποικιλία από καινοτόμες εφαρμογές που κυμαίνονται από απτική έως εκτεταμένη πραγματικότητα [42], [45]. Εκτός από τις διαφορές μεταξύ του TI και του 5G που συζητήθηκαν παραπάνω, αξίζει να αναφερθεί ότι το TI δεν πρέπει να περιορίζεται στο πλαίσιο του 5G.

Υπάρχουν αρκετές ερευνητικές προσπάθειες που στοχεύουν να αξιοποιήσουν το TI με τη χρήση άλλων τεχνολογιών (τεχνολογία sub-GHz, τεχνολογίες WBAN και WLAN καθώς

και συνδυασμούς αυτών των τεχνολογιών). Το TI με την HITL φύση του, προσφέρει ένα πλήθος πιθανών σεναρίων για την αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης, με σκοπό την βελτίωση του αντίκτυπου των υπερβολικών καθυστερήσεων διάδοσης δεδομένων στην ανθρώπινη αντίληψη, όπως συνήθως συναντάται σε δίκτυα ευρείας περιοχής (wide area networks) [16], [43]. Κάτι που δεν αποτελεί εστίαση του 5G [3]. Επιπλέον, σύμφωνα με την Έκθεση Technology Watch για το TI [39], που δημοσιεύτηκε το 2014, τόσο η ασύρματη όσο και η ενσύρματη πρόσβαση δικτύων είναι απαραίτητες για να αντιμετωπιστούν οι αυστηρές απαιτήσεις χρόνου καθυστέρησης, καθώς και οι απαιτήσεις αξιοπιστίας του TI στις εφαρμογές του [2].

Τα ενσύρματα δίκτυα πρόσβασης μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, για τις περιπτώσεις απτικής χρήσης του διαδικτύου, που δεν απαιτούν κινητικότητα ανά πάσα στιγμή και επομένως μπορούν να πραγματοποιηθούν σε υποδομές σταθερής δικτύωσης. Παρά τις διαφορές τους, τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το IoT και το TI, μοιράζονται τους ακόλουθους κοινούς σχεδιαστικούς στόχους: ασφάλεια, συνύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης καναλιών (π.χ. κινητής τηλεφωνίας και WiFi), και εγγυημένη διαθεσιμότητα [43].

### **Τεχνολογίες ενεργοποίησης**

Το 5G είναι ένας από τους βασικούς κινητήριους παράγοντες του TI, δεδομένων του υψηλού επιπέδου ασφάλειας, της υψηλής διαθεσιμότητας, των υψηλών ρυθμών δεδομένων και των εγγενών του στόχων για εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση (Πίνακας 3.2), αν και δεν είναι φυσικά σχεδιασμένο για να συλλαμβάνει την HITL φύση του TI. Προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη υποδομή για τη αντιμετώπιση των επικοινωνιακών προκλήσεων και για την απτική υλοποίηση του διαδικτύου [14]. Μια ολοκληρωμένη έρευνα για το 5G δίνεται στο [48]. Η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου (NFV) [49], τα δίκτυα ορισμένα από λογισμικό (SDN) [50] και το edge computing [51], είναι τρεις άλλες σημαντικές έννοιες που μπορούν να αξιοποιηθούν για να αντιμετωπιστούν οι αναμενόμενες υπολογιστικές και επικοινωνιακές προκλήσεις (Πίνακας 3.2).

Δικτυακή Τεχνολογία TI	Χαρακτηριστικά/Σκοπός
Δίκτυα 5G	Από τους βασικούς κινητήριους παράγοντες του TI, <ul style="list-style-type: none"> <li>- Υψηλό επίπεδο ασφάλειας,</li> <li>- Υψηλή διαθεσιμότητα,</li> <li>- Υψηλοί ρυθμοί δεδομένων</li> <li>- Εγγενείς στόχοι για εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση</li> </ul>
SDN (Software Defined Network)	Αρχιτεκτονική δικτύωσης όπου στο δίκτυο το επίπεδο ελέγχου διαχωρίζεται από το επίπεδο δεδομένων. Οι συσκευές δικτύωσης διαχειρίζονται από ένα κεντρικό ελεγκτή, απλοποιώντας έτσι την όλη διαδικασία διαχείρισης
NFV (Network Functions Virtualization)	Αναλαμβάνει τη διαδικασία λειτουργίας και δημιουργίας δικτύου, αποσυνδέοντας τις λειτουργίες του δικτύου από την υποδομή υλικού που εκτελεί αυτές τις λειτουργίες. Βασίζεται σε τυπικές τεχνολογίες εικονικοποίησης για την εικονικοποίηση στοιχείων δικτύου και λειτουργιών, δημιουργώντας λειτουργίες εικονικού δικτύου (VNF)
Edge computing (Υπολογιστική άκρων)	Φέρνει τις υπολογιστικές δυνατότητες κοντά στον εξοπλισμό χρήστη. Παραδείγματα: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mobile cloud computing, cloudlets, fog computing, και edge computing για φορητές συσκευές</li> </ul>

Πίνακας 3.2 Τεχνολογίες ενεργοποίησης του TI

Η υπολογιστική άκρων (edge computing) ωθεί την αποθήκευση και τον υπολογισμό στο άκρο του δικτύου (network edge), προσφέροντας έτσι μια ουσιαστική μείωση του λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίας [52]. Η ιδέα αντιμετωπίστηκε στη βιβλιογραφία από διάφορες πτυχές και παραδείγματα του edge computing που περιλαμβάνουν mobile cloud computing, cloudlets, fog computing, και edge computing για φορητές συσκευές [53]. Το SDN (Software Defined Network) αναφέρεται σε μια αρχιτεκτονική δικτύωσης όπου στο δίκτυο το επίπεδο ελέγχου διαχωρίζεται από το επίπεδο δεδομένων [50]. Οι συσκευές δικτύωσης (όπως δρομολογητές, switches) διαχειρίζονται από ένα κεντρικό ελεγκτή, απλοποιώντας έτσι την όλη διαδικασία διαχείρισης (όπως την επιβολή πολιτικής και τη διαμόρφωση δικτύου). Το NFV (Network Functions Virtualization) αναλαμβάνει τη διαδικασία λειτουργίας και δημιουργίας δικτύου σε ένα νέο επίπεδο ευελιξίας, αποσυνδέοντας τις λειτουργίες του δικτύου από την υποδομή υλικού που εκτελεί αυτές τις λειτουργίες. Βασίζεται σε τυπικές τεχνολογίες εικονικοποίησης για την εικονικοποίηση στοιχείων δικτύου και λειτουργιών, δημιουργώντας λειτουργίες εικονικού δικτύου (VNF, Virtual Network Function) [49].

Τα VNF είναι συνδεδεμένα στιγμιότυπα και εκτελούνται όπως απαιτείται για την παροχή στοχευμένων υπηρεσιών, συντομεύοντας έτσι τον κύκλο ζωής της παροχής νέων



υπηρεσιών. Οι διάφορες δυνατότητες δικτύωσης μπορούν να συνδυαστούν για να δημιουργήσουν ακόμη περισσότερα οφέλη. Για παράδειγμα, στο [53] και [54] διερευνούν πώς μπορούν να επωφεληθούν η υπολογιστική άκρων και το 5G, αντίστοιχα από το SDN. Οι Aijaz et al. [18] συζήτησαν μια νέα αρχιτεκτονική μόχλευσης NFV, SDN, edge computing και 5G, για την παροχή μιας αρχιτεκτονικής γενικού σκοπού που μπορεί να υποστηρίξει το TI. Η δική τους αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί την εικονικοποίηση του NFV για να επιτρέψει τη δυναμική εγκατάσταση ενός δικτύου από άκρο σε άκρο ανάλογα με τις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Τα SDN και Edge computing μπορούν να βοηθήσουν στην μείωση του λανθάνοντος χρόνου, χρησιμοποιώντας το κεντρικό ελεγκτή ενός SDN και φέρνοντας τις υπολογιστικές δυνατότητες κοντά στον εξοπλισμό χρήστη (περιορισμός του αριθμού των ενδιάμεσων κόμβων) [33]. Η τεχνητή νοημοσύνη (AI) είναι ένας άλλος βασικός παράγοντας για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις λανθάνοντος χρόνου 1 ms. Η μόνη προσέγγιση που μπορεί να αντιμετωπίσει τον περιορισμό του 1 ms με την εξάλειψη του περιορισμού των 150 km είναι η χρήση προβλέψεων [14].

### 3.2 Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης

Στο [55] αναφέρονται τρεις ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης του TI (Πίνακας 3.3), τις οποίες θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Αυτές είναι: η εξ' αποστάσεως θεραπεία φοβιών, η αυτόνομη οδήγηση και η απομακρυσμένη ρομποτική χειρουργική επέμβαση. Η αυτόνομη οδήγηση και η εξ αποστάσεως ρομποτική χειρουργική, αναφέρονται συχνά στη βιβλιογραφία [2], [13], [56].

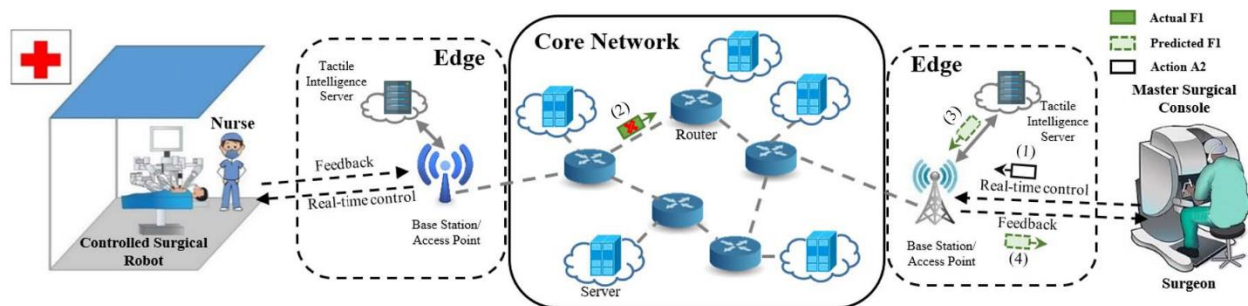
Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης TI	Περιγραφή/Συνεισφορά
Εξ' αποστάσεως ρομποτική χειρουργική	Κάνει διαθέσιμη σχεδόν από οπουδήποτε τη χειρουργική επέμβαση. Μείωση των καθυστερήσεων και των κινδύνων για υποεξυπηρετούμενες περιοχές. Μείωση/εξάλειψη των ταξιδιών ασθενών, σε μεγάλες αποστάσεις. Πολλαπλασιασμός των προηγμένων χειρουργικών δεξιοτήτων.

Αυτόνομη οδήγηση	Καθοριστική συμβολή στη μείωση των ατυχημάτων, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και της κυκλοφοριακής συμφόρησης.
Απομακρυσμένη θεραπεία φοβιών με χρήση εικονικής πραγματικότητας	Επιτρέπει στους θεραπευτές να θεραπεύουν σταδιακά τους φοβικούς ασθενείς τους (οποτεδήποτε και οπουδήποτε ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους), με τη συστηματική έκθεση τους στα αντικείμενα που φοβούνται μέσω VR περιβάλλοντος χωρίς κανέναν κίνδυνο.

Πίνακας 3.3 Ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης ΤΙ

## Εξ' αποστάσεως ρομποτική χειρουργική

Η εξ' αποστάσεως ρομποτική χειρουργική κάνει διαθέσιμη σχεδόν από οπουδήποτε τη χειρουργική επέμβαση, ανεξάρτητα από το πού εντοπίζονται ασθενείς και χειρουργοί. Αυτό προσφέρει πολλαπλά πιθανά οφέλη για την ανθρώπινη κοινωνία. Κάποια από αυτά είναι η μείωση των καθυστερήσεων και των κινδύνων, που σχετίζονται με τη διάθεση χειρουργικών επεμβάσεων, σε ασθενείς που ζουν σε υποεξυπηρετούμενες περιοχές και η μείωση/εξάλειψη των ταξιδιών ασθενών, σε μεγάλες αποστάσεις. Θα επιτρέψει τον πολλαπλασιασμό των προηγμένων χειρουργικών δεξιοτήτων [57], [58]. Η εικόνα 3.2 δείχνει ένα σύστημα απτικού διαδικτύου που βασίζεται σε 5G για εξ' αποστάσεως ρομποτική χειρουργική.



Εικόνα 3.2 Απομακρυσμένη ρομποτική χειρουργική [55].

Η αρχιτεκτονική που βασίζεται στα άκρα (edges) είναι το υπόβαθρο και αναφέρεται σε διάφορα άρθρα [13], [59]. Το σύστημα μπορεί να χωριστεί στο κεντρικό δίκτυο, σε ένα άκρο από την πλευρά του ασθενούς και σε ένα άκρο από την πλευρά του χειρουργού. Το κεντρικό δίκτυο λειτουργεί ως μέσο παροχής διμερών επικοινωνιών μεταξύ των δύο άκρων. Στην πλευρά του ασθενούς, το σύστημα παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα στο ελεγχόμενο χειρουργικό ρομπότ που χειρουργεί τον ασθενή σύμφωνα με τους

χειρουργούς που δίνουν τις εντολές, και λαμβάνοντας την αντίστοιχη ανατροφοδότηση. Η άκρη του χειρουργού παρέχει ασύρματη σύνδεση σε μια κύρια χειρουργική κονσόλα μέσω της οποίας οι χειρουργοί μπορούν να χειριστούν ένα χειρουργικό ρομπότ εξ' αποστάσεως και να λάβουν σε πραγματικό χρόνο απτική, οπτική και ακουστική ανατροφοδότηση. Και οι δύο άκρες είναι εξοπλισμένες με edge clouds (όπως fog computing [60]) στα οποία βρίσκεται μία μηχανή απτικής τεχνητής νοημοσύνης η οποία διευκολύνει τις προβλέψεις των απτικών πληροφοριών.

Σε ένα υποθετικό σενάριο, οι χειρουργοί σε ένα νοσοκομείο πρέπει να χειρουργήσουν έναν ασθενή που βρίσκεται σε διαφορετικό νοσοκομείο. Γενικά, μια ρομποτική χειρουργική επέμβαση αποτελείται από τέσσερις φάσεις: (1) πρόσβαση στην κοιλότητα του σώματος, (2) εκτομή ιστών, (3) καταστροφή των ιστών και (4) ανακατασκευή ιστών (ραφή, κόμπος κτλ.) [61]. Πρέπει να εκτελούνται συγκεκριμένες εργασίες στην κάθε φάση. Αυτή η περίπτωση χρήσης, περιλαμβάνει μια εργασία δεσίματος κόμπου, η οποία πραγματοποιείται κατά την τελευταία φάση. Σε αυτή τη φάση, οι χειρουργοί πρέπει να εκτελούν πολλαπλές ενέργειες-χειρονομίες όπως να σηκώνουν βελόνες και με τα δύο χέρια, κάνοντας ένα C. Κάνουν θηλιά γύρω από τη δεξιά πλευρά της βελόνας, σηκώνοντας ένα ράμμα και τραβώντας το ράμμα με τα δύο χέρια για να δέσουν έναν κόμπο [62], όλα μέσω της κύριας χειρουργικής κονσόλας.

Αυτές οι ενέργειες θα μεταφραστούν σε μήνυμα ελέγχου και θα σταλούν στο χειρουργικό ρομπότ. Μόλις παραληφθούν, το ελεγχόμενο χειρουργικό ρομπότ θα εκτελέσει αυτές τις ενέργειες στον ασθενή και θα δημιουργήσει την αντίστοιχη ανατροφοδότηση. Στη συνέχεια θα σταλθεί η ανατροφοδότηση πίσω στην κύρια χειρουργική κονσόλα όπου τελικά θα παρουσιαστεί στους χειρουργούς. Είναι προφανές ότι αυτές οι επικοινωνίες πρέπει να είναι πολύ γρήγορες και αρκετά αξιόπιστες ώστε να διασφαλίζεται η σταθερότητα της αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο. Σε διαφορετική περίπτωση, οι χειρουργοί θα παρατηρήσουν μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ των ενεργειών και της αντίστοιχης ανατροφοδότησης, αποτρέποντάς τους από το να είναι σίγουροι για το τι πρέπει να κάνουν στη συνέχεια, επειδή η ανατροφοδότηση της προηγούμενης δράσης επηρεάζει την επόμενη δράση τους. Η απτική μηχανή τεχνητής νοημοσύνης θα παίξει σημαντικό ρόλο στην αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος.

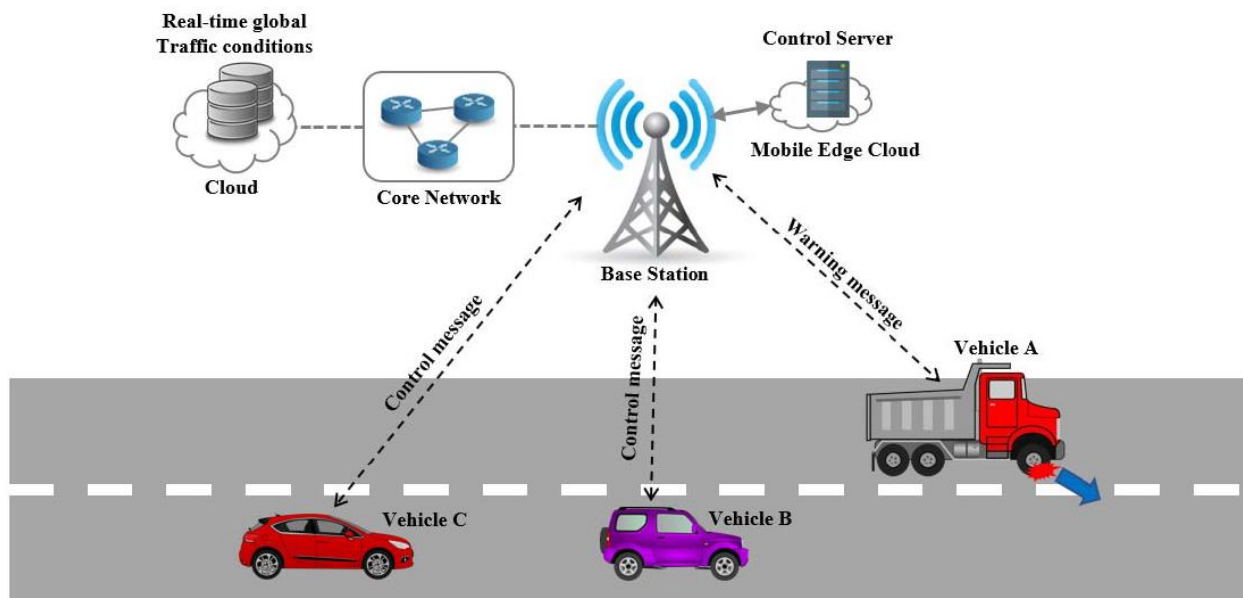
Για παράδειγμα, έστω ότι οι χειρουργοί εκτελούν μια ενέργεια A1 και στη συνέχεια με βάση την αντίστοιχη ανάδραση (F1), θα αποφασίσουν να κάνουν ξανά είτε την A1 ή A2 ως επόμενη ενέργεια. Στη συνέχεια, μπορεί να εξεταστεί ένα σενάριο όπου το A1 μεταδίδεται επιτυχώς στο ελεγχόμενο χειρουργικό ρομπότ. Ωστόσο, η F1 καθυστερεί ή χάνεται στο δρόμο προς την κύρια χειρουργική κονσόλα. Σε αυτό το σενάριο, η απτική μηχανή τεχνητής νοημοσύνης από την πλευρά του χειρουργού θα προβλέψει ανατροφοδότηση που είναι πολύ παρόμοια με την F1 και θα σταλεί στην κύρια χειρουργική κονσόλα. Αυτό θα επιτρέψει στους χειρουργούς να αποκτήσουν τη εμπειρία της αλληλεπίδρασης σε πραγματικό χρόνο και να γνωρίζουν τι να περιμένουν στη συνέχεια, παρόλο που η πραγματική ανατροφοδότηση εξακολουθεί να ταξιδεύει μέσα από το δίκτυο.

### **Αυτόνομη οδήγηση**

Η αυτόνομη οδήγηση είναι μια άλλη πιθανή εφαρμογή που μπορεί να πραγματοποιηθεί από το TI. Αναμένεται να συμβάλει καθοριστικά στη μείωση των ατυχημάτων, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, και της κυκλοφοριακής συμφόρησης [63]. Γενικά, ένα σύστημα αυτόνομης οδήγησης μπορεί να χωριστεί σε τρία κύρια υποσυστήματα: έλεγχος, προγραμματισμός και αντίληψη [64]. Το υποσύστημα αντίληψης είναι υπεύθυνο για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον από αισθητήρες, τα κοντινά οχήματα, τις συνθήκες του δρόμου, τις ταχύτητες και την τοποθεσία. Αυτές οι πληροφορίες ανανεώνονται συνεχώς για να δημιουργήσουν ένα μοντέλο δυναμικού περιβάλλοντος. Το υποσύστημα προγραμματισμού παίρνει οδηγικές αποφάσεις με βάση αυτό το μοντέλο περιβάλλοντος και την ανατροφοδότηση από το υποσύστημα ελέγχου.

Στη συνέχεια, το υποσύστημα ελέγχου χειρίζεται τα οχήματα ανάλογα με τις οδηγικές αποφάσεις όπως επιτάχυνση, γωνία διεύθυνσης, προσαρμογή της ταχύτητάς τους κ.λπ. Τα περισσότερα από τα τρέχοντα αυτόνομα οχήματα βασίζονται αποκλειστικά στους ενσωματωμένους αισθητήρες. Ωστόσο, αυτοί μπορεί να μην επαρκούν για τη λήψη ασφαλών αποφάσεων οδήγησης λόγω περιορισμών, συμπεριλαμβανομένων των περιορισμένων δυνατοτήτων και εύρους αντίληψής τους [63]. Τα αυτόνομα οχήματα πρέπει επομένως να επικοινωνούν μεταξύ τους καθώς και με διάφορα στοιχεία υποδομής προκειμένου να αυξηθεί η περιβαλλοντική αντίληψη και ως εκ τούτου να βελτιωθεί η λήψη

αποφάσεων ως προς την αυτόνομη οδήγηση [65] [66]. Αυτή η πτυχή αναφέρεται στην επικοινωνία οχημάτων προς τα πάντα (V2X, vehicle to everything). Με την υποστήριξη της επικοινωνίας V2X, οι περιπτώσεις χρήσης αυτόνομης οδήγησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο ομάδες: σε αυτές με σύντομους χρόνους αντίδρασης (συνεργατικός ελιγμός έκτακτης ανάγκης για αποφυγή σύγκρουσης) και στις προβλέψιμες συμπεριφορές (ομαλοποίηση ταχύτητας σε κοντινές αποστάσεις, συνεργατικές αλλαγές λωρίδας) [65].



**Εικόνα 3.3** Αυτόνομη οδήγηση για αποφυγή σύγκρουσης [55].

Στο παράδειγμα που περιγράφεται, η εστίαση γίνεται σε συνεργατικούς ελιγμούς έκτακτης ανάγκης για αποφυγή σύγκρουσης. Η εικόνα 3.3 απεικονίζει ένα σύστημα TI για περιπτώσεις χρήσης αυτόνομης οδήγησης. Αυτό το σύστημα παρέχει συνδεσιμότητα με υποστήριξη επικοινωνιών V2X για αυτόνομη οδήγηση. Προσφέρει επίσης αποθηκευτικούς και υπολογιστικούς πόρους για το κεντρικό δίκτυο αλλά και για τα άκρα του δικτύου (network edge). Αυτοί οι πόροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση ενός διακομιστή ελέγχου και για την αποθήκευση συνθηκών κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, εξετάζεται ένα σενάριο όπου τα αυτόνομα οχήματα κινούνται σε αυτοκινητόδρομο με μέτρια ταχύτητα όπως φαίνεται στην εικόνα 3.2(b). Στο όχημα A σκάει λάστιχο και ξαφνικά αλλάζει σε άλλη λωρίδα. Υποτίθεται ότι οι οδηγικές αποφάσεις όλων των αυτόνομων οχημάτων πραγματοποιούνται από ένα διακομιστή

ελέγχου που λειτουργεί σε ένα mobile edge cloud σε κοντινή απόσταση από τα οχήματα [66].

Ο διακομιστής ελέγχου λαμβάνει αποφάσεις οδήγησης με βάση τις πληροφορίες που παραλαμβάνει από όλα τα ενδιαφερόμενα οχήματα και στέλνει μηνύματα ελέγχου σε όλα. Επιπλέον, όλα αυτά τα οχήματα ανταλλάσσουν περιοδικά πληροφορίες με τον διακομιστή ελέγχου. Για την αποφυγή ατυχήματος σε αυτό το σενάριο, το Όχημα Α στέλνει πρώτα ένα προειδοποιητικό μήνυμα προς τον διακομιστή ελέγχου που αποτελείται από την κατεύθυνση, την ταχύτητά του, τη θέση και την κατάσταση του. Στη συνέχεια, ο διακομιστής ελέγχου επεξεργάζεται τις λαμβανόμενες πληροφορίες για τη λήψη οδηγικών αποφάσεων για τα οχήματα Β και C και στέλνει μηνύματα ελέγχου και στα δύο οχήματα. Τέλος, με βάση τα μηνύματα ελέγχου, το όχημα Β επιβραδύνει την ταχύτητά του ενώ το όχημα C αλλάζει λωρίδα για να αποφύγει τη σύγκρουση.

### **Απομακρυσμένη θεραπεία φοβιών με χρήση εικονικής πραγματικότητας**

Οι φοβίες είναι μία από τις πιο κοινές διαταραχές ψυχικής υγείας [67], [68]. Μια τεχνική για τη θεραπεία της φοβίας είναι η νίνο έκθεση, στην οποία ένας ασθενής παρουσιάζεται με το ερέθισμα του φόβου προκειμένου να ξεπεράσει τη φοβία του με την καθοδήγηση ενός θεραπευτή [69]. Ωστόσο, αυτή η τεχνική μπορεί να μην λειτουργεί για όλους. Όπως φαίνεται στο [70], αυτή η τεχνική έχει ποσοστά εγκατάλειψης έως και 45%. Πρόσφατα, η εικονική πραγματικότητα (VR) έχει αποδειχθεί ότι είναι μια αποτελεσματική τεχνική για τη θεραπεία της φοβίας [67], [68], [71]. Με αυτή την τεχνική, οι θεραπευτές μπορούν να θεραπεύσουν σταδιακά φοβικούς ασθενείς με τη συστηματική έκθεση των ασθενών στα αντικείμενα που φοβούνται (π.χ. φίδια ή αράχνες) μέσω VR περιβάλλοντος χωρίς κανέναν κίνδυνο. Σε αντίθεση με άλλες τεχνικές θεραπείας της φοβίας, οι θεραπευτές μπορούν να ελέγχουν πλήρως το ερέθισμα του φόβου με βάση το επίπεδο φόβου του ασθενούς τους προσαρμόζοντας το μέγεθος και την κίνηση των αντικειμένων που φοβούνται μέσα στα εικονικά περιβάλλοντα [68], [71].

Το TI προσφέρει περισσότερα οφέλη στην παραδοσιακή θεραπεία φοβίας VR. Επιτρέπει στους θεραπευτές να θεραπεύουν τους φοβικούς ασθενείς τους, οποτεδήποτε και οπουδήποτε ανεξάρτητα από την τοποθεσία τους. Οι ασθενείς και οι θεραπευτές είναι σε θέση από κοινού να αγγίξουν και να δουν εικονικά αντικείμενα, νιώθοντας τις αισθήσεις

τους (συμπεριλαμβανομένης της αφής) σε πραγματικό χρόνο, μέσα από ένα κοινό περιβάλλον απτικής VR, χωρίς να πρέπει να είναι στο ίδιο δωμάτιο. Οι ασθενείς δεν χρειάζεται να ταξιδέψουν για να δουν τους θεραπευτές για αυτή τη θεραπεία, εξοικονομώντας έτσι σημαντικό χρόνο (και πιθανότατα κόστος).



**Εικόνα 3.4** Εξ' αποστάσεως θεραπεία της αραχνοφοβίας [55].

Η εικόνα 3.4 δείχνει ένα σύστημα TI που χρησιμοποιείται στη θεραπεία φοβιών με χρήση εικονικής πραγματικότητας από απόσταση. Τόσο ο θεραπευτής όσο και ο ασθενής πρέπει να επικοινωνούν με έναν διακομιστή VR για να αλληλεπιδράσουν με ένα κοινό απτικό VR περιβάλλον. Και οι δύο είναι εξοπλισμένοι με συσκευές παρακολούθησης κίνησης, απτικές συσκευές (π.χ. απτικά γάντια) και κράνη VR, για λήψη απτικής, ακουστικής και οπτικής ανάτροφοδότησης σε πραγματικό χρόνο και για ελεύθερη κίνηση στο περιβάλλον VR.

Το σύστημα TI παρέχει την απαιτούμενη επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης μεταξύ διακομιστών VR, ασθενών και θεραπευτών. Η απομακρυσμένη θεραπεία φοβιών με χρήση εικονικής πραγματικότητας θα μπορούσε εύκολα να χωριστεί σε τρία στάδια: (1) ο ασθενής να βλέπει και να ακούει αντικείμενα χωρίς κανένα άγγιγμα, (2) άγγιγμα αντικειμένων που υπάρχει φοβία με τη βοήθεια ενός θεραπευτή και (3) άγγιγμα χωρίς βοήθεια από θεραπευτή. Εξετάστηκε ένα σενάριο όπου χρειάζεται ένας θεραπευτής, σε

ένα νοσοκομείο, να θεραπεύσει έναν αραχνοφοβικό ασθενή, που βρίσκεται στο σπίτι. Γίνεται η υπόθεση ότι ο ασθενής έχει ήδη ολοκληρώσει το πρώτο στάδιο. Στο δεύτερο στάδιο, ο θεραπευτής θα εκθέσει τον ασθενή σε μια εικονική αράχνη επιτρέποντας στον ασθενή να νιώσει την αίσθηση της αγγίζοντας την. Ωστόσο, μπορεί ο ασθενής να φοβάται να αγγίξει μόνος την εικονική αράχνη. Ως εκ τούτου, σε αυτό το στάδιο, ο θεραπευτής είναι το άτομο που αγγίζει την εικονική αράχνη, ενώ τόσο ο θεραπευτής όσο και ο ασθενής μπορούν να βιώσουν την αίσθηση της αφής.

Σε μια συνεδρία θεραπείας, ο θεραπευτής επιχειρεί πρώτα να αγγίξει την εικονική αράχνη. Οι συσκευές παρακολούθησης κίνησης στη συνέχεια εντοπίζουν τη δράση του θεραπευτή και την στέλνουν στον διακομιστή VR. Μετά από αυτό, με βάση τη ληφθείσα ενέργεια, ο διακομιστής VR αποδίδει τα VR καρτέ και δημιουργεί απτική ανατροφοδότηση. Επίσης στέλνει την αντίστοιχη απτική ανατροφοδότηση και το βίντεο, τόσο στον θεραπευτή όσο και στον ασθενή. Τέλος, ο ασθενής θα βιώσει την αληθοφανή εικονική πραγματικότητα και θα νιώσει την υφή της αράχνης στο δέρμα μέσω απτικών γαντιών και συσκευών VR, χωρίς να την αγγίζει. Αυτό το στάδιο μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές μέχρι ο ασθενής να εξοικειωθεί περισσότερο με την εικονική αράχνη. Μετά από αυτό, ο ασθενής μπορεί να μετακινηθεί στο τελευταίο στάδιο όπου αγγίζει μόνος του την εικονική αράχνη.

### **3.3 Κριτήρια Αξιολόγησης Απτικού Διαδικτύου**

Σε αυτή την ενότητα προτείνεται ένα σύνολο κριτηρίων προς αξιολόγηση των αλγορίθμων, των έξυπνων σχημάτων πρόβλεψης, των πρωτοκόλλων και των αρχιτεκτονικών που έχουν προταθεί μέχρι σήμερα για το TI [55]. Συμπληρωματικά με τις τρεις περιπτώσεις χρήσης που αναλύθηκαν προηγουμένως, αυτά τα κριτήρια έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν όλες τις πιθανές εφαρμογές TI. Η εστίαση γίνεται κυρίως στις βασικές απαιτήσεις και σχετίζεται με την αξιοπιστία και την καθυστέρηση. Ενώ πολλά άρθρα [4], [13], [14] προσδιορίζουν ακριβώς τις ίδιες απαιτήσεις, συνήθως δεν υποστηρίζονται με λεπτομερείς περιπτώσεις χρήσης.



Κριτήρια αξιολόγησης λύσεων TI	Περιγραφή
Εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση	Η σε πραγματικό χρόνο απτική αλληλεπίδραση απαιτεί η χρονική υστέρηση μεταξύ της ανατροφοδότησης και των ενεργειών να είναι μικρότερη από όλες τις ανθρώπινες αντιδράσεις, για να επιτραπεί σε όλες τις ανθρώπινες αισθήσεις να αλληλεπιδράσουν με τις μηχανές. Για να είναι η απτική αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο παραπλήσια της πραγματικότητας, απαιτείται λανθάνον χρόνος από άκρο σε άκρο της τάξης του 1 ms
Εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία	Ανάγκη παροχής εξαιρετικά αξιόπιστης συνδεσιμότητας δικτύου (εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία), καθώς πολλές από τις απτικές εφαρμογές διαδικτύου θα έχουν τεράστιο αντίκτυπο στον άνθρωπο. Απαιτείται πολύ μικρό ποσοστό αποτυχίας για να εγγυηθεί αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, η οποία μεταφράζεται σε λίγα δευτερόλεπτα διακοπής του συστήματος ανά έτος. Αυτός ο ρυθμός μπορεί επίσης να ποσοτικοποιηθεί ως ποσοστό απώλειας πακέτων $10^{-7}$ .

Πίνακας 3.4 Κριτήρια αξιολόγησης λύσεων TI

Το πρώτο κριτήριο είναι η ανάγκη παροχής εξαιρετικά υψηλής απόκρισης συνδεσιμότητας δικτύου (πολύ χαμηλή καθυστέρηση). Το Απτικό Διαδίκτυο επιτρέπει την σε πραγματικό χρόνο απτική αλληλεπίδραση. Αυτή η αλληλεπίδραση απαιτεί η χρονική υστέρηση μεταξύ της ανατροφοδότησης και των ενεργειών να είναι μικρότερη από όλες τις ανθρώπινες αντιδράσεις, για να επιτραπεί σε όλες τις ανθρώπινες αισθήσεις να αλληλεπιδράσουν με τις μηχανές. Για παράδειγμα, στην περίπτωση χρήσης ρομποτικής χειρουργικής εξ αποστάσεως, όταν ένας χειρουργός χειρίζεται ένα ρομπότ για να κόψει τον ιστό ενός ασθενούς, ο χειρουργός θα πρέπει να λαμβάνει ανατροφοδότηση δύναμης εντός του φυσιολογικού χρόνου της ανθρώπινης αντίδρασης για τη χειροκίνητη αλληλεπίδραση (δηλαδή, 1 ms). Αυτό θα επιτρέψει στον χειρουργό να νιώσει την αίσθηση της αφής σε πραγματικό χρόνο.

Ομοίως, για την περίπτωση της εξ' αποστάσεως θεραπείας φοβιών με χρήση εικονικής πραγματικότητας, η αλληλεπίδραση υψηλής πιστότητας μεταξύ χρηστών απτικών περιβαλλόντων εικονικής πραγματικότητας μπορεί να επιτευχθεί μόνο εάν ο λανθάνον χρόνος από άκρο σε άκρο είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών του δευτερολέπτου [2]. Διαφορετικά, οι χρήστες VR θα βιώσουν κυβερνοναυτία. Επιπλέον, για να εξασφαλιστεί

η συνεπής προβολή VR για όλους τους χρήστες εικονικής πραγματικότητας σε ένα κοινό απτικό περιβάλλον VR, ο λανθάνον χρόνος επικοινωνίας μεταξύ των χρηστών VR και του διακομιστή VR θα πρέπει να είναι πολύ χαμηλός. Για να είναι η απτική αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο παραπλήσια της πραγματικότητας, απαιτείται λανθάνον χρόνος από άκρο σε άκρο της τάξης του 1 ms [13].

Όπως ορίζεται στο [13], η καθυστέρηση από άκρο σε άκρο (round-trip latency) σε τεχνικά συστήματα, περιλαμβάνει την uplink καθυστέρηση για μετάδοση πληροφοριών από έναν αισθητήρα σε έναν διακομιστή, την καθυστέρηση για την επεξεργασία των ληφθέντων πληροφοριών και τη δημιουργία απάντησης, με την downlink καθυστέρηση για τη μετάδοση της απόκρισης πίσω στον χρήστη που εκκίνησε την ενέργεια.

Αυτός ο ορισμός μπορεί επίσης να αναφέρεται ως round-trip delay and response time delay [13], ανάλογα με τις συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης. Οποιαδήποτε από αυτά τα κριτήρια μέτρησης καθυστέρησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση λύσεων, αναλόγως του τύπου του λανθάνοντος χρόνου που στοχεύουν. Για παράδειγμα το round-trip delay θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε μία αλγοριθμική λύση η οποία εστιάζει στην κατανομή πόρων στα άκρα του δικτύου με στόχο την ελάφρυνση του υπολογιστικού φόρτου. Στοχεύοντας έτσι στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου που χρειάζεται, για την μείωση του φόρτου εργασίας από τον τελικό χρήστη στην υπολογιστική μονάδα στα άκρα του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου του χρόνου για την επεξεργασία του αιτήματος και την αποστολή της απάντησης πίσω στον τελικό χρήστη.

Το round-trip latency μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση μιας αλγοριθμικής λύσης σε χαμηλότερα επίπεδα (όπως κατανομή πόρων σε WLAN, WBAN και RAN) καθώς κύριος στόχος του είναι να ελαχιστοποιήσει την προκύπτουσα καθυστέρηση των πακέτων κατά τη μεταφορά από άκρο σε άκρο. Επομένως, προκειμένου να ικανοποιηθεί το κριτήριο της εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης, οι λύσεις σε ένα σύστημα TI θα πρέπει να είναι σε θέση να επιτύχουν 1ms round-trip latency ή round-trip delay.

Το δεύτερο κριτήριο είναι η ανάγκη παροχής εξαιρετικά αξιόπιστης συνδεσιμότητας δικτύου (εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία), καθώς πολλές από τις απτικές εφαρμογές διαδικτύου θα έχουν τεράστιο αντίκτυπο στον άνθρωπο. Στην εξ αποστάσεως ρομποτική χειρουργική, οι χειρουργοί γενικά εκτελούν κάθε επόμενη χειρουργική ενέργεια με βάση

την ανατροφοδότηση που λαμβάνεται από την προηγούμενη ενέργεια. Εάν η ανατροφοδότηση χαθεί κατά τη διάρκεια μιας εγχείρησης, ο χειρουργός μπορεί να πάρει λάθος απόφαση για την επόμενη ενέργεια, κάτι που θα μπορούσε να έχει απειλητικές συνέπειες για τη ζωή του ασθενούς.

Ομοίως, στην περίπτωση της αυτόνομης οδήγησης, τα αυτόνομα οχήματα πρέπει να ανταλλάσσουν απρόσκοπτα μηνύματα ελέγχου και προειδοποίησης με τον διακομιστή ελέγχου (control server). Εάν τα μηνύματα χαθούν κατά τη μετάδοσή τους στα αυτόνομα οχήματα, αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε σοβαρή αλυσίδα συγκρούσεων. Γενικά, η εξ αποστάσεως χειρουργική με ρομπότ και η αυτόνομη οδήγηση απαιτεί πολύ μικρό ποσοστό αποτυχίας για να εγγυηθεί αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων, η οποία μεταφράζεται σε λίγα δευτερόλεπτα διακοπής του συστήματος ανά έτος [5]. Αυτός ο ρυθμός μπορεί επίσης να ποσοτικοποιηθεί ως ποσοστό απώλειας πακέτων  $10^{-7}$ . Επιπλέον, η εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία μπορεί να ερμηνευθεί με όρους πρόβλεψης σφάλματος  $10^{-7}$  όταν πρόκειται για έξυπνες λύσεις πρόβλεψης που στοχεύουν στην κάλυψη ενός κενού, όπου τα δεδομένα δεν φτάνουν έγκαιρα είτε λόγω απόστασης (μεγαλύτερη των 150 km) είτε όταν υπάρχει κάποιο πρόβλημα σύνδεσης.

Για να εξασφαλιστεί αξιόπιστη απτική αλληλεπίδραση, οι διαφορές μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων δεδομένων πρέπει να διατηρούνται εξαιρετικά μικρές. Οποιοσδήποτε από τις προαναφερθείσες μετρήσεις αξιοπιστίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση διαφορετικών λύσεων. Η μη διαθεσιμότητα του συστήματος χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αρχιτεκτονικών του συστήματος, ενώ η απώλεια πακέτων χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των αλγοριθμικών λύσεων. Επιπλέον, το σφάλμα πρόβλεψης χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση λύσεων που αφορούν την νοημοσύνη του συστήματος.

Το TI θεωρείται ένα σύστημα που παρέχει εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Για την αξιολόγηση της καθυστέρησης από άκρο σε άκρο και της αξιοπιστίας του συστήματος TI, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όλες οι επιλογές σχεδιασμού όπως οι αλγόριθμοι, η αρχιτεκτονική, και τα πρωτόκολλα σε οποιοδήποτε μέρος αυτού του συστήματος.

### 3.4 Αρχιτεκτονικές

Διάφορες εργασίες εισήγαγαν αρχιτεκτονικές για το TI. Κάποιες από αυτές τις αρχιτεκτονικές προορίζονται για συγκεκριμένο τύπο εφαρμογών, ενώ κάποιες άλλες είναι αγνωστικιστικές ως προς την εφαρμογή.

Κάποια έργα επικεντρώθηκαν αποκλειστικά στις πτυχές πρωτοκόλλου των αρχιτεκτονικών, χωρίς να προτείνουν πλήρεις αρχιτεκτονικές. Επιπρόσθετα, κάποια από αυτά πρότειναν έξυπνα σχήματα πρόβλεψης για να αντιμετωπιστούν τα κρίσιμα ζητήματα των απτικών πληροφοριών (π.χ. απτικές ανατροφοδοτήσεις, εντολές ελέγχου) που αναμένονται από τις οντότητες που έχουν απομακρυσμένη λειτουργία και δεν φθάνουν στην ώρα τους.

Τύπος Αρχιτεκτονικής	Αρχιτεκτονική	Περιγραφή
Αγνωστικιστικές	IEEE P1918.1 [3]	Είναι γενική και μπορεί να αντιστοιχιστεί σε όλους τους τύπους συνδεσιμότητας (π.χ. τοπικής/ευρείας περιοχής, ενσύρματα/ασύρματα και υβριδικά δίκτυα)
	Ενισχυμένη Αρχιτεκτονική Κυψελοειδών Δικτύων MEC [72]	Σύστημα cloud πολλαπλών επιπέδων για να παρέχουν τη δυνατότητα μείωσης του φόρτου στα κυψελωτά δίκτυα για την υποστήριξη εφαρμογών TI
	Ενισχυμένη Αρχιτεκτονική Κυψελοειδών Δικτύων FiWi [76]	Στοχεύει να βελτιώσει τα LTE-A HetNets με δίκτυα πρόσβασης FiWi για παροχή υψηλής χωρητικότητας ινών backhaul και δυνατότητες εκφόρτωσης (offloading) του WiFi
	Αρχιτεκτονική Δικτύων με βάση την EPON [77]	Αρχιτεκτονική δικτύου διανομής οπτικού νέφους (optical cloud distribution network - OCLDN) για υψηλής ταχύτητας προγραμματιζόμενα και κλιμακούμενα δίκτυα οπτικής πρόσβασης, έτσι ώστε να υποστηριχθούν υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης
Ειδικών εφαρμογών	Εξ' αποστάσεως λειτουργία σε πραγματικό χρόνο [44], [12]	Βελτιωμένα με FiWi, LTE-A HetNets, μαζί με διακομιστές MEC ενισχυμένους με AI που βρίσκονται σε ONU-BS/MPP για υποστήριξη εξ' αποστάσεως λειτουργίας με επίκεντρο το HITL (Human in the loop)
	Εικονική πραγματικότητα [78], [79]	Στο [78] εστίασαν στη διαδραστική εικονική πραγματικότητα για πολλούς παίκτες gaming ενώ στο [79] στόχευσαν την εξ' αποστάσεως θεραπεία τής φοβίας με χρήση VR.

Παρακολούθηση Βίντεο [80]	Σύστημα βιντεοεπιτήρησης σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα με την υπολογιστική ισχύ για εκτέλεση τοπικής επεξεργασίας δεδομένων, τοποθετημένη κοντά σε ενεργοποιητές και αισθητήρες, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση.
Βιομηχανικός αυτοματισμός [81]	Ένα δοκιμαστικό πλαίσιο για την διερεύνηση των δυνατοτήτων των SDN και NFV δικτύων για την υποστήριξη βιομηχανικών εφαρμογών TI
Έξυπνες πόλεις [82]	Αρχιτεκτονική TI με γνώμονα την ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) για έξυπνες πόλεις.
Γενικά Συστήματα E-Health [83]	Προτείνεται μια τοπική περιοχή με βάση την EPON αρχιτεκτονική δικτύου ως δικτυακή υποδομή, για την εξυπηρέτηση των εφαρμογών υγείας του TI σε μία πανεπιστημιούπολη νοσοκομείου

Πίνακας 3.5 Αρχιτεκτονικές TI

### 3.4.1 Αγνωστικιστικές αρχιτεκτονικές εφαρμογών

Η αρχιτεκτονική IEEE P1918.1 [3] εστιάζει στον ορισμό λειτουργικών οντοτήτων και διεπαφών έτσι ώστε να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα. Παράλληλα, οι περισσότερες από τις αγνωστικιστικές αρχιτεκτονικές εφαρμογών που προτείνονται, στοχεύουν να ενισχύσουν τα κυψελοειδή δίκτυα, έτσι ώστε να μπορούν να ανταποκριθούν στις αυστηρές απαιτήσεις TI. Χρησιμοποιούν τεχνολογίες όπως Mobile Edge Computing (MEC) [72], [73], [74], [75] και FiWi [76] για να προσφέρουν τη δυνατότητα μείωσης του φόρτου δεδομένων και να αυξήσουν τη χωρητικότητα του δικτύου. Μία άλλη αγνωστικιστική αρχιτεκτονική εφαρμογή βασίζεται στην τεχνολογία EPON (Ethernet Passive Optical Network) για να υποστηρίξει τις εφαρμογές TI, λόγω της ευελιξίας και της υψηλής χωρητικότητας της [77]. Σημειώνεται ότι οι [74] και [77] αφορούν τόσο αλγοριθμικές όσο και αρχιτεκτονικές πτυχές.

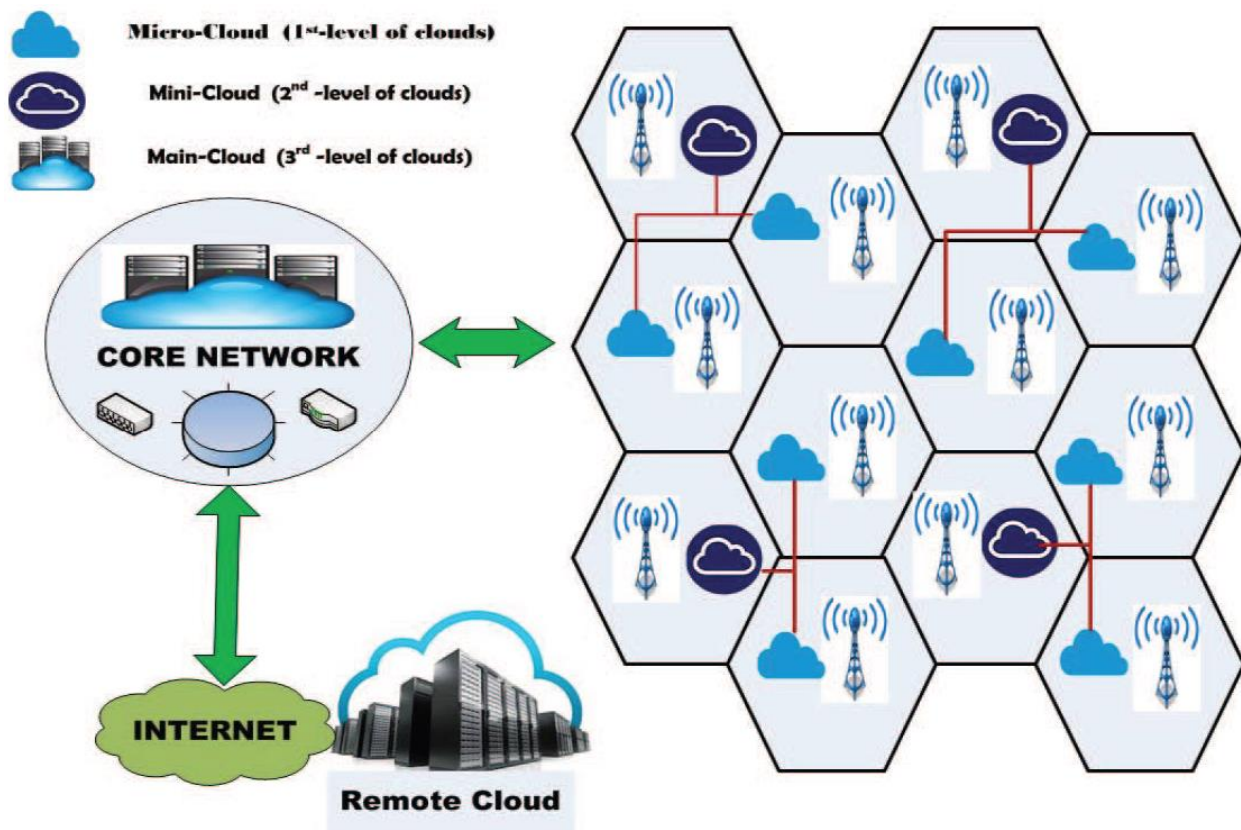
#### IEEE P1918.1 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική IEEE P1918.1 [3] είναι γενική και μπορεί να αντιστοιχιστεί σε όλους τους τύπους συνδεσιμότητας (π.χ. τοπικής/ευρείας περιοχής, ενσύρματα/ασύρματα και υβριδικά δίκτυα). Επιπλέον είναι αγνωστικιστική σε σχέση με τις εφαρμογές. Είναι βασισμένη σε μερικές καλά μελετημένες αρχές σχεδιασμού (αξιοποίηση πόρων cloud και

edge, διαχωρισμός επιπέδων ελέγχου και δεδομένων, ευελιξία και αρθρωτότητα) και αποτελείται από τομείς δικτύου (network domains) και τομείς ακμών (edges domains).

Ενισχυμένη Αρχιτεκτονική Κυψελοειδών Δικτύων MEC (Enhanced Cellular Network Architectures)

Η πρώτη εφαρμογή αγνωστικιστικής αρχιτεκτονικής που χρησιμοποιεί το MEC είναι για να ενισχύσει τα κυψελοειδή δίκτυα και εισάγεται από τους Ateya et al. [72], οι οποίοι πρότειναν ένα σύστημα cloud πολλαπλών επιπέδων για να παρέχουν τη δυνατότητα μείωσης του φόρτου στα κυψελωτά δίκτυα για την υποστήριξη εφαρμογών TI.



Εικόνα 3.5 Σύστημα cloud πολλαπλών επιπέδων για το TI [72]

Το σύστημα αυτό έχει στόχο τη μείωση της συμφόρησης του δικτύου στο κεντρικό δίκτυο και τη βελτίωση του λανθάνοντος χρόνου. Αποτελείται από τρία ιεραρχικά επίπεδα νέφους, με micro-cloud, mini-cloud και core-cloud στο χαμηλότερο, μεσαίο και υψηλότερο επίπεδο, αντίστοιχα. Οι μονάδες micro-cloud, στο χαμηλότερο επίπεδο, συνδέονται με κάθε σταθμό βάσης (BS) μέσω οπτικών ινών.

## Ενισχυμένη Αρχιτεκτονική Κυψελοειδών Δικτύων FiWi (Enhanced Cellular Network Architectures)

Οι Beyranvand et al. [76] προτείνουν μία αρχιτεκτονική LTE-Advanced (LTE-A) ετερογενούς δικτύου (HetNet) ενισχυμένης με ασύρματη οπτική ίνα (fiber wireless - FiWi). Αυτή η αρχιτεκτονική στοχεύει να βελτιώσει τα LTE-A HetNets με δίκτυα πρόσβασης FiWi για παροχή υψηλής χωρητικότητας ινών backhaul και δυνατότητες εκφόρτωσης (offloading) του WiFi. Χρησιμοποιεί μια τεχνολογία παθητικού οπτικού δικτύου Ethernet (Ethernet Passive Optical Network - EPON) για να δημιουργήσει συνδέσμους backhaul μεταξύ του πυρήνα και των δικτύων στα άκρα, και μια τεχνολογία Gigabit WLAN για να δημιουργήσει FiWi δίκτυα πρόσβασης. Αυτή η αρχιτεκτονική παίρνει υπόψη τη χρονική διαίρεση πολυπλεξίας (time division multiplexing) και την πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος (wavelength division multiplexing) των EPON. Το backhaul ινών των EPON αποτελείται από ένα τερματικό οπτικής γραμμής (Optical Line Terminal - OLT) το οποίο συνδέεται με πολλαπλές μονάδες οπτικού δικτύου (Optical Network Units - ONU) μέσω ινών.

### Αρχιτεκτονική Δικτύων με βάση την EPON

Στο [77] εισήγαγαν μια αρχιτεκτονική δικτύου διανομής οπτικού νέφους (optical cloud distribution network - OCLDN) για να προσφέρουν υψηλής ταχύτητας προγραμματιζόμενα και κλιμακούμενα δίκτυα οπτικής πρόσβασης, έτσι ώστε να υποστηρίξουν υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης. Βασίζεται σε ένα δίκτυο EPON επόμενης γενιάς (NG EPON) που επιτρέπει στις μονάδες οπτικού δικτύου (Optical Network Units – ONU) να μεταδίδουν κίνηση ταυτόχρονα σε κανάλια με πολλαπλά μήκη κύματος, αυξάνοντας έτσι τη χωρητικότητα δικτύου. Τα ONU κατανέμονται έτσι ώστε να παρέχουν AP (Access Points) για τελικές συσκευές (π.χ. συσκευές IoT). Είναι επίσης εξοπλισμένα με συντονιζόμενους ή σταθερούς πομποδέκτες για να επιτραπεί η ταυτόχρονη μετάδοση μέσω πολλαπλών καναλιών ανοδικών ζεύξεων.

### 3.4.2 Αρχιτεκτονικές ειδικών εφαρμογών

Ορισμένες αρχιτεκτονικές έχουν στόχο συγκεκριμένες εφαρμογές TI όπως τηλελειτουργία σε πραγματικό χρόνο [44], [12] εικονική πραγματικότητα [78], [79] παρακολούθηση βίντεο

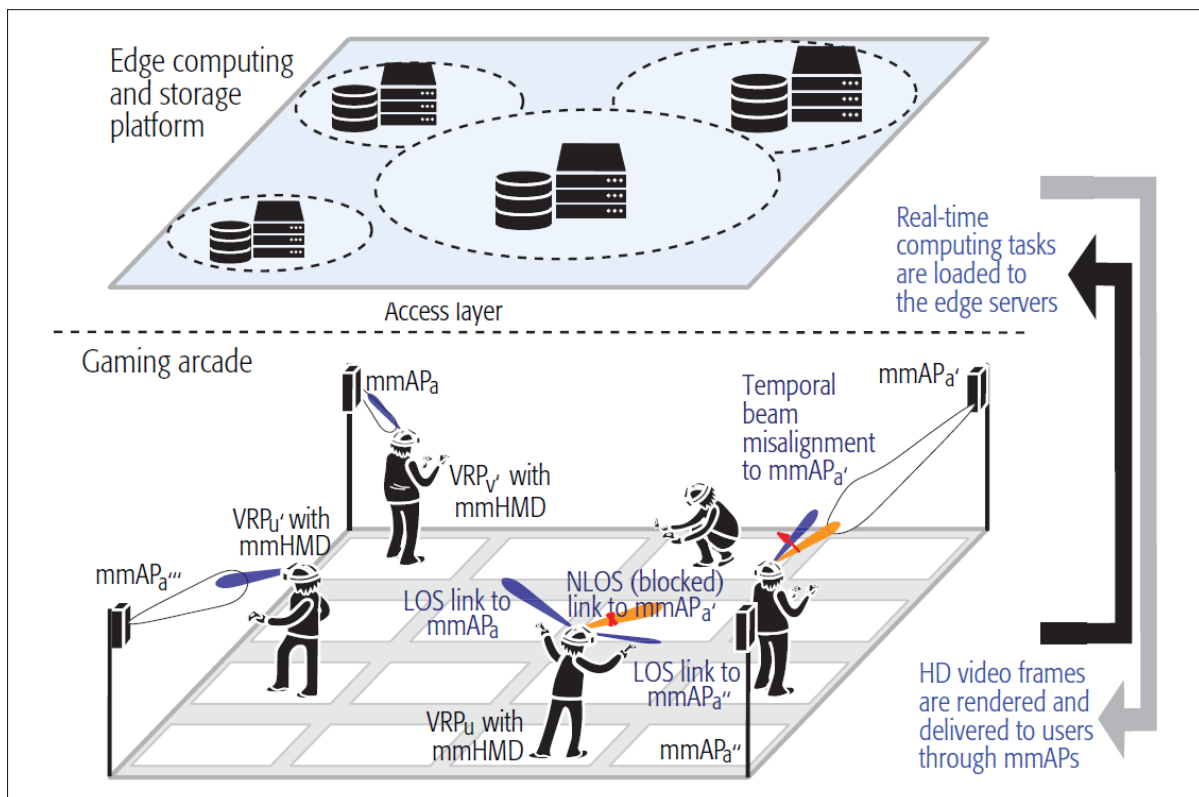
σε πραγματικό χρόνο [80], αυτοματισμό βιομηχανικών δοκιμών [81], έξυπνες πόλεις [82] και γενικές εφαρμογές υγείας [83].

Εξ' αποστάσεως λειτουργία σε πραγματικό χρόνο

Είναι μια πρωταρχική εφαρμογή που υλοποιείται από το TI. Αυτή η εφαρμογή παρουσιάζεται από τους Maier et al. [44] και [12]. Οι Maier et al. [44] εισάγουν τα, βελτιωμένα με FiWi, LTE-A HetNets, μαζί με διακομιστές MEC ενισχυμένους με AI που βρίσκονται σε ONU-BS/MPP για υποστήριξη εξ' αποστάσεως λειτουργίας με επίκεντρο το HITL (Human in the loop).

Εικονική πραγματικότητα

Με το επερχόμενο TI θα γίνουν εφικτές νέες δυνατότητες στις εφαρμογές VR. Έχουν προταθεί δύο αρχιτεκτονικές για αυτές τις εφαρμογές. Στο [78] εστίασαν στη διαδραστική εικονική πραγματικότητα για πολλούς παίκτες gaming ενώ στο [79] στόχευσαν την εξ' αποστάσεως θεραπεία τής φοβίας με χρήση VR. Οι Elbamby et al. [78] προτείνουν μια αρχιτεκτονική συστήματος για διαδραστικό multiplayer παιχνίδι σε περιβάλλοντα VR εσωτερικού χώρου.



**Εικόνα 3.6** Αρχιτεκτονική συστήματος για διαδραστικό multiplayer παιχνίδι σε περιβάλλοντα VR εσωτερικού χώρου [78]



Η αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί ένα δίκτυο MEC για να μειώσει την υπολογιστική καθυστέρηση στην απόδοση/επεξεργασία καρτέ VR HD. Αξιοποιεί επίσης τις επικοινωνίες mmWave αυξάνοντας τη χωρητικότητα δικτύου, λόγω του γενναιόδωρου διαθέσιμου φάσματος σε αυτό το εύρος συχνοτήτων. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική, οι παίκτες VR είναι εξοπλισμένοι με mmWave οθόνες VR οι οποίες τοποθετούνται στο κεφάλι (mmHMDs). Μεταδίδουν τις πράξεις και τις φιγούρες τους σε δίκτυο MEC για την απόδοση/επεξεργασία των καρτέ VR HD, ενώ λαμβάνουν τα αντίστοιχα καρτέ βίντεο που εμφανίζονται στα mmHMD μέσω σημείων πρόσβασης ζώνης mmWave (mmAPs)

#### Παρακολούθηση Βίντεο

Σύμφωνα με το [80], ένα σύστημα βιντεοεπιτήρησης απαιτεί άμεση απόκριση 1 ms έχοντας ποσοστό αποτυχίας του  $10^{-7}$ . Η χρήση του προτείνεται σε μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα με την υπολογιστική ισχύ για εκτέλεση τοπικής επεξεργασίας δεδομένων, τοποθετημένα κοντά σε ενεργοποιητές και αισθητήρες, μειώνοντας έτσι την καθυστέρηση. Σε αυτό το σύστημα, μια περιοχή στόχος χωρίζεται σε πολλαπλές υπο-περιοχές. Καθε υπο-περιοχή παρακολουθείται από ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (drone) και αρκετούς ενεργοποιητές/αισθητήρες που βρίσκονται στο έδαφος.

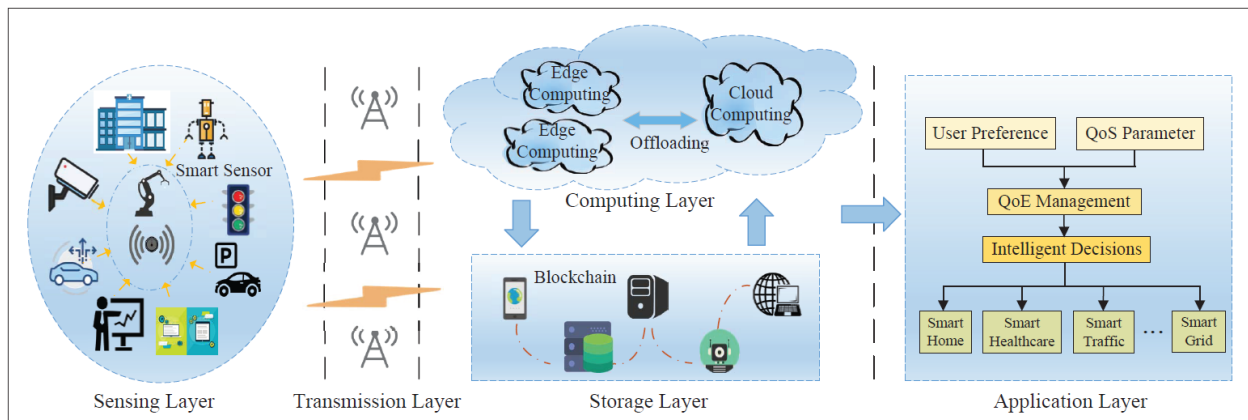
#### Βιομηχανικός αυτοματισμός

Οι Mekikis PV et al, [81] προτείνουν ένα δοκιμαστικό πλαίσιο για να διερευνήσουν τις δυνατότητες των SDN και NFV δικτύων για την υποστήριξη βιομηχανικών εφαρμογών TI. Οι δοκιμές βασίζονται σε ένα καλά καθορισμένο Smart End-to-End πλαίσιο IoT διαλειτουργικότητας, ασφάλειας και συνδεσιμότητας [84] το οποίο αποτελείται από τρία κύρια επίπεδα, που δηλώνονται ως επίπεδα δικτύου, πεδίου και backend/cloud. Στη δοκιμαστική πλατφόρμα, το backend/cloud περιλαμβάνει κόμβους αποθήκευσης και υπολογισμών, οι οποίοι ονομάζονται το τοπικό νέφος (local cloud), στο οποίο αναπτύσσονται ενότητες ενορχήστρωσης και διαχείρισης για NFV, VNF και βάσεις δεδομένων. Το επίπεδο πεδίου είναι μια εικονική βιομηχανική πύλη IoT που συνδέει ενεργοποιητές και αισθητήρες σε ένα πεδίο.

#### Έξυπνες πόλεις

Οι έξυπνες πόλεις είναι ένας άλλος τομέας εφαρμογών που θα επωφεληθούν από το αναδυόμενο TI. Για να διασφαλιστεί η ικανοποίηση των χρηστών, στο [82] προτείνουν μια

αρχιτεκτονική TI με γνώμονα την ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) για έξυπνες πόλεις. Η αρχιτεκτονική έχει σχεδιαστεί όχι μόνο για να επιτύχει υψηλή αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση, αλλά και για την βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών (QoE) αξιοποιώντας απτικές, οπτικές και ακουστικές πληροφορίες. Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει πέντε επίπεδα: αίσθησης, μετάδοσης, αποθήκευσης, υπολογισμού και εφαρμογής.

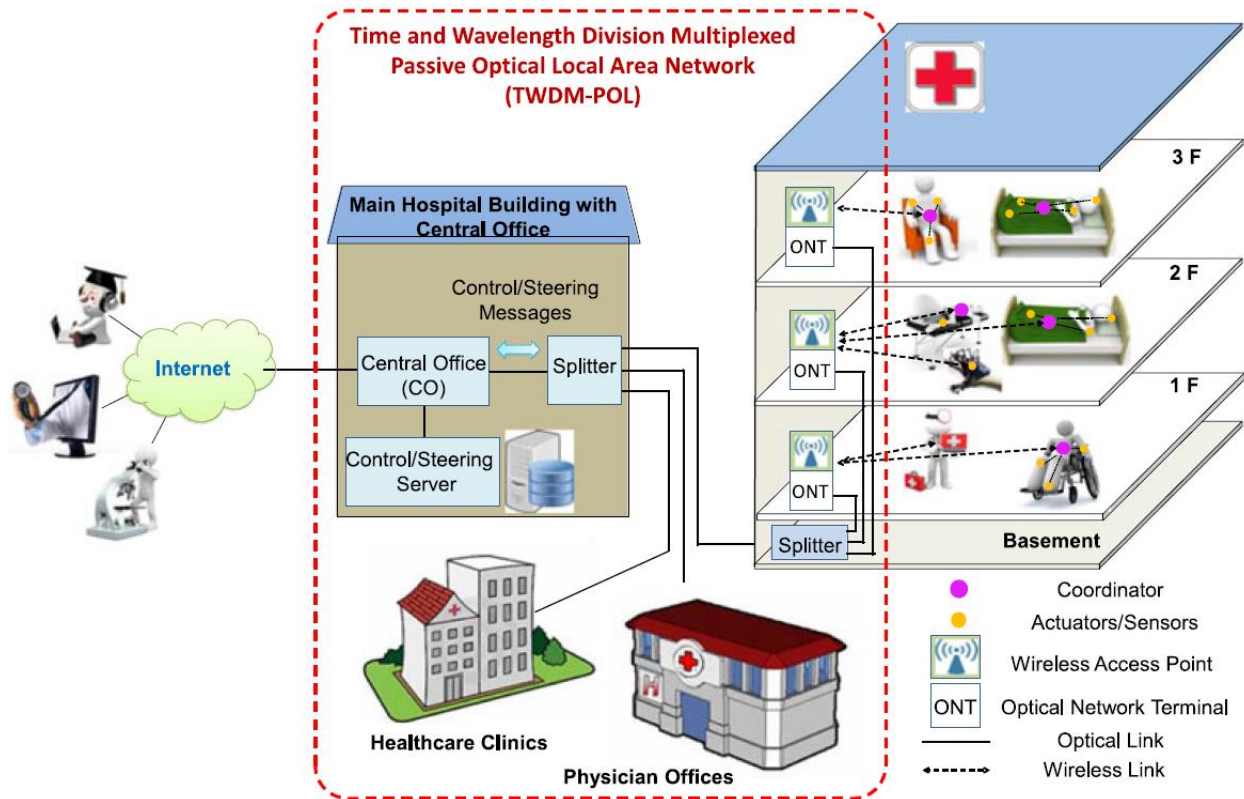


**Εικόνα 3.7** Προτεινόμενη αρχιτεκτονική TI με γνώμονα την ποιότητα εμπειρίας (Quality of Experience - QoE) για έξυπνες πόλεις [82]

Το επίπεδο αίσθησης αποτελείται από καταναμημένους ενεργοποιητές και αισθητήρες που είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή απτικών, οπτικών και ακουστικών πληροφοριών. Το επίπεδο μετάδοσης βασίζεται σε ένα σύστημα πολυπλεξίας συχνοτήτων (frequency division multiplexing) έτσι ώστε να επιτύχει χαμηλή καθυστέρηση. Το επίπεδο αποθήκευσης βασίζεται σε ένα καταναμημένο σύστημα αποθήκευσης όπου τα δεδομένα αποθηκεύονται σε datacenters στις άκρες του δικτύου έτσι ώστε να είναι κοντά και γρήγορα διαθέσιμα στον τελικό χρήστη. Το επίπεδο υπολογισμού χρησιμοποιεί μία υπολογιστική τεχνική κατά την οποία μια εφαρμογή αποσυντίθεται σε μικροπηρεσίες (microservices), οι οποίες κατανέμονται δυναμικά σε datacenters στο cloud στις άκρες του δικτύου. Το επίπεδο εφαρμογών είναι υπεύθυνο για την ποιότητα της εμπειρίας των χρηστών (QoE). Αυτό επιτυγχάνεται με ένα συνδυασμό ανάλυσης των προτιμήσεων των χρηστών και διάφορων QoS (ποιότητα της υπηρεσίας) παραμέτρων (π.χ. θόρυβο, ταχύτητα κτλ.)

## Γενικά Συστήματα E-Health

Για την υποστήριξη εφαρμογών υγείας από το ΤΙ, η τεχνολογία EPON αποτελεί μια βιώσιμη λύση για την παροχή αξιόπιστης αρχιτεκτονικής με χαμηλή καθυστέρηση δικτύου λόγω της ευελιξίας και της υψηλής χωρητικότητάς της.



**Εικόνα 3.8** Δικτυακή υποδομή για την εξυπηρέτηση των εφαρμογών υγείας του ΤΙ σε μία πανεπιστημιούπολη νοσοκομείου [83]

Οι Wong et al. [83] προτείνουν μια τοπική περιοχή με βάση την EPON αρχιτεκτονική δικτύου ως δικτυακή υποδομή για την εξυπηρέτηση των εφαρμογών υγείας του ΤΙ σε μία πανεπιστημιούπολη νοσοκομείου. Σημειώνεται ότι αντίθετα με το OCLDN [77] που αξιοποιεί το NG-EPON, αυτή η αρχιτεκτονική βασίζεται στην τεχνολογία EPON IEEE 802.3av 10 Gb/s. Αποτελείται κυρίως από πολλαπλά ONU και ένα μόνο OLT. Τα ONT κατανέμονται σε όλη την πανεπιστημιούπολη για να αλληλοεπιδρούν με τα ασύρματα AP των δικτύων κορμού.

### 3.5 Συνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά αναφερθήκαν οι σχετικές με το ΤΙ τεχνολογίες και πως αυτές θα μπορούσαν να εξελιχθούν, έτσι ώστε να δημιουργηθεί η απαραίτητη υποδομή που να καλύπτει τις απαιτήσεις του ΤΙ. Στη συνέχεια αναλύθηκαν 3 ενδεικτικές περιπτώσεις

χρήσεως του ΤΙ παρουσιάζοντας τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις τους. Μετά καθορίστηκαν ορισμένα κριτήρια για την αξιολόγηση των λύσεων που προτείνονται. Τέλος έγινε μία επισκόπηση των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών για τις εφαρμογές ΤΙ (γενικές και συγκεκριμένες). Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει επισκόπηση μερικών πλατφόρμων δοκιμών, όπου κάποιες από τις τεχνολογίες βρίσκουν εφαρμογή.

## 4 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΚΑΙ ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 4.1 Τεχνολογίες και ερευνητικά πεδία

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται προτεινόμενες πλατφόρμες, οι οποίες κάνουν χρήση τεχνολογιών/τεχνικών, σχετικών με το TI και τα 5G δίκτυα, με σκοπό να προσφέρουν λύσεις σε διάφορους τομείς της καθημερινότητας. Μερικοί από αυτούς τους τομείς είναι: το διαδίκτυο των πραγμάτων, το διαδίκτυο των οχημάτων, τα έξυπνα δίκτυα, οι έξυπνες πόλεις και οι απτικές επικοινωνίες.

Για τις υπηρεσίες 4G, η απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και η υψηλή απόδοση ακόμη και σε περιοχές των άκρων της κυψέλης, θεωρούνταν βασικές τεχνικές απαιτήσεις. Οι υπηρεσίες 5G, ωστόσο [85], [86], [87] επικεντρώνονται αντί της ίδιας της απόδοσης, στη βελτίωση της εμπειρίας των τελικών χρηστών. Η οπτική των τελικών χρηστών τονίζεται περισσότερο από τις τεχνικές πτυχές των παρόχων και την υπηρεσία δικτύου. Οι συνεχείς εξελίξεις στους τομείς του blockchain [88], του TI 5G [89], του Machine Learning (ML) για TI [43], του Mobile Edge Computing [90], της ευφυΐας βάσει δεδομένων σε ασύρματα δίκτυα [91] και του Internet of Things (IoT) [92], [93] υπόσχονται να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις του μέλλοντος για το TI.

Ερευνητική κατεύθυνση	Συνεισφορά
Κατανομή πόρων	Απαραίτητη για την παροχή της επιθυμητής Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS)
Mobile Edge Computing	Σημαντική μείωση της καθυστέρησης μέσω της λειτουργικότητας του cloud computing στο κεντρικό δίκτυο
Κινητικότητα	Κάνει το δίκτυο εξαιρετικά δυναμικό, θέτει μία πρόκληση ως προς την επίτευξη των απαιτήσεων του QoS
Machine/Reinforcement Learning	Machine Learning: επικοινωνία με ευφυΐα και Reinforcement Learning: δυνατότητα αυτοπροσαρμογής, βελτιώνουν την συνολική ποιότητα του συστήματος
Blockchain	Βελτίωση του απόρρητου και της ασφάλειας (έξυπνες πόλεις υγειονομική περιθαλψη)
Cognitive Radio	Χρησιμοποίηση του διαθέσιμου φάσματος, για την επίτευξη του QoS, χωρίς τη διακύβευση της καθυστέρησης.

**Πίνακας 4.1** Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις για το TI

Στο [94] προσδιορίζονται ορισμένες μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις για το TI (Πίνακας 4.1) και παρατίθενται δοκιμαστικές πλατφόρμες εφαρμογής του TI (Πίνακας 4.2) στην καθημερινότητα. Οι ερευνητικοί τομείς οι οποίοι χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης είναι οι ακόλουθοι. Η κατανομή των πόρων για τις απτικές εφαρμογές Διαδικτύου η οποία

είναι απαραίτητη για την παροχή της επιθυμητής Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS). Το Mobile Edge Computing το οποίο μειώνει σημαντικά την καθυστέρηση μέσω της λειτουργικότητας του cloud computing στο κεντρικό δίκτυο. Η κινητικότητα, η οποία κάνει το δίκτυο εξαιρετικά δυναμικό και θέτει μια πρόκληση για το TI ως προς την επίτευξη των απαιτήσεων του QoS. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (Machine Learning - ML) για επικοινωνία με ευφυΐα και οι αλγόριθμοι ενίσχυσης εκμάθησης (Reinforcement Learning - RL) για δυνατότητα αυτοπροσαρμογής, οι οποίοι θα οδηγήσουν στην βελτίωση της συνολικής ποιότητας του συστήματος. Το απόρρητο και η ασφάλεια, ιδιότητες οι οποίες είναι ιδιαίτερα επιθυμητές για το TI, ειδικά για εφαρμογές έξυπνων πόλεων και υγειονομικής περίθαλψης, και θα μπορούσαν να βελτιωθούν με την χρήση τεχνικών blockchain. Τέλος οι τεχνολογίες Cognitive Radio (CR), οι οποίες είναι χρήσιμες για να χρησιμοποιηθεί το διαθέσιμο φάσμα, για την επίτευξη του QoS, χωρίς τη διακύβευση της καθυστέρησης.

#### 4.2 Πλατφόρμες δοκιμών

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται κάποιες δοκιμαστικές πλατφόρμες [94] για το TI και τα αποτελέσματά τους.

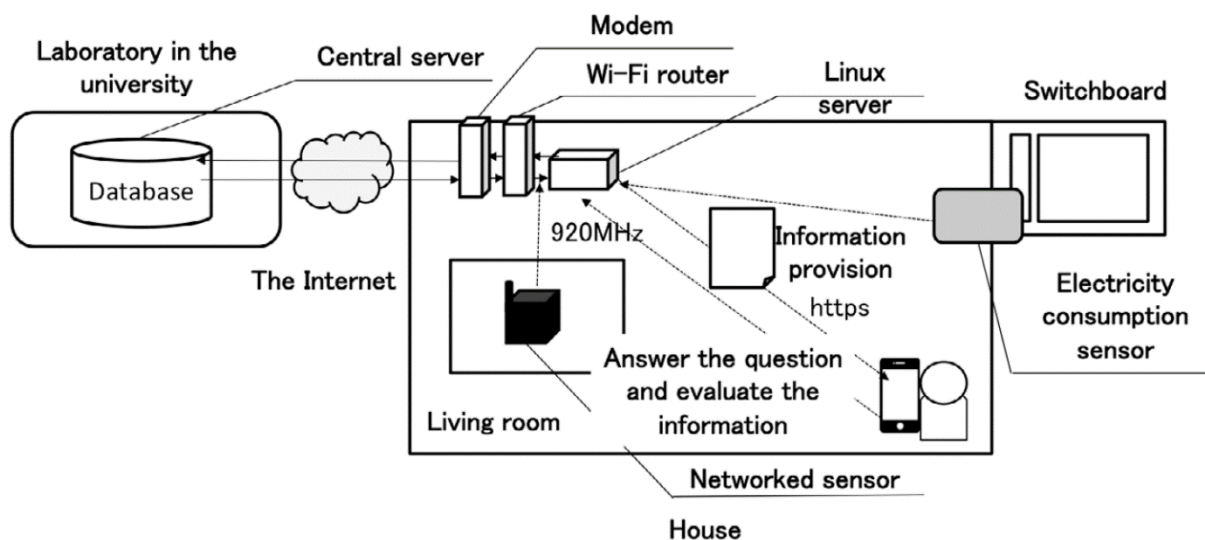
Πλατφόρμα δοκιμών	Περιγραφή
Ενεργειακή διαχείριση σπιτιού [95]	Το Home Energy Management Σύστημα (HEMS) βασίζεται στην προβλεπόμενη μέση ψήφο (PMV - Predicted Mean Vote) για να μετρήσει το επίπεδο άνεσης σε εσωτερικούς χώρους, του κάθε ατόμου, χαρτογραφώντας αυτά τα επίπεδα με ενδείξεις κατανάλωσης ενέργειας
Αυτόνομα οχήματα [97]	Μελέτη που έχει σκοπό να αξιολογηθεί η επίδραση διαφορετικών μοντέλων κινητικότητας (αποτελούμενα από γρήγορα κινούμενες συσκευές και οχήματα), στις τεχνικές ανακάλυψης περιεχομένου για το TI.
Απτική επικοινωνία και συστήματα 5G [98]	Προτείνεται μια συνεργατική μετάδοση σε συστήματα επικοινωνίας 5G και μελετάται η απτική παράδοση πληροφοριών μέσω συστημάτων 5G, για να κατανοηθούν οι εξ' αποστάσεως αλληλεπιδράσεις ανθρώπου με μηχανή, σε πραγματικό χρόνο για το TI.
Έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα [100]	Επανεξέταση της αποτελεσματικότητας των SM (Smart Metering) και της AMI (Advanced Metering Infrastructure) στην εφαρμογή τους στα Smart Grid (SG). Επιπλέον εξέταση της δομής τους, μαζί με πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας και αλγόριθμους δρομολόγησης.
Internet of Vehicles [101]	Συλλέχθηκαν οι συνθήκες κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο στο πλαίσιο των συστημάτων ελέγχου μεταφορών, και

	πρόταθηκε μια μέθοδος εκφόρτωσης υπολογισμού (computation offloading) με δυνατότητα EC (edge computing-enabled) και προστασία της ιδιωτικότητας.
Απτικές επικοινωνίες σε LTE και Wi-Fi [102]	Προτάθηκε ένα σύστημα εξισορρόπησης της κυκλοφορίας, που χρησιμοποιεί το LTE σε ζώνες χωρίς άδεια (LTE U) για απτικές επικοινωνίες στο TI, συνυπάρχον με χρήστες κινητής τηλεφωνίας και Wi-Fi.
Cloud και edge computing [103]	Μελέτη της εφαρμογής των διάφορων λύσεων EC (Edge Computing), και παροχή πληροφοριών για την ενίσχυση της ασφάλειας, τη βελτίωση της ιδιωτικής ζωής, την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και την ελαχιστοποίηση του λανθάνοντος χρόνου.
Κοινωνικά δίκτυα και αποδοτικότερη χρήση των πόρων [104]	Εξέταση των μηχανισμών ελέγχου συμφόρησης και των υπάρχουσών λύσεων σε Ad hoc Κοινωνικά Δίκτυα (Ad-hoc Social Network - ASNET).
5G, IoT και network slicing [105]	Προτάθηκε ένας αλγόριθμος δυναμικής δέσμευσης πόρων, βασισμένος στην εκτίμηση της μέγιστης πιθανότητας. Αυτό βοηθά να εξαλειφθεί η έλλειψη των πόρων, δίνοντας προτεραιότητα σε ένα κομμάτι (slice) του δικτύου έναντι του άλλου, με βάση τον επείγοντα χαρακτήρα και την αξιοπιστία του.

Πίνακας 4.2 Πλατφόρμες δοκιμών συναφών με το TI

### Ενεργειακή διαχείριση σπιτιού

Ο Matsui [95] παρουσίασε το Home Energy Management Σύστημα (HEMS) βασισμένο στην προβλεπόμενη μέση ψήφο (PMV - Predicted Mean Vote) για να μετρήσει το επίπεδο άνεσης σε εσωτερικούς χώρους, του κάθε ατόμου, χαρτογραφώντας αυτά τα επίπεδα με ενδείξεις κατανάλωσης ενέργειας.



Εικόνα 4.1 Σύστημα ενεργειακής διαχείρισης του σπιτιού [95]

Το προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποίησε δευτερεύοντα δεδομένα, δηλαδή αντί για δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, σχόλια από χρήστες, στοχεύοντας στη διατήρηση του επιπέδου άνεσης του κάθε ατόμου και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Το Σύστημα Κλιματισμού Θέρμανσης και Αερισμού (HVAC), χρησιμοποιήθηκε για πειράματα. Το μοντέλο που προτείνεται υποδιαιρείται σε δύο κύριους στόχους. Ο πρώτος είναι η συλλογή έξι τύπων δεδομένων υψηλής ευκρίνειας με τη χρήση αισθητήρων δικτύου, δηλαδή άνεμο, υγρασία, φωτεινότητα, εσωτερική θερμοκρασία, δραστηριότητες που χρησιμοποιούν Μεταβολικά Ισοδύναμα (MET), και αριθμό ρούχων για τον υπολογισμό του PMV και του επιπέδου άνεσης εσωτερικού χώρου.

Το δεύτερο είναι η απόκτηση σχολίων από τους χρήστες με την εμφάνιση των αποτελεσμάτων του PMV τους στην ιστοσελίδα. Ο συγγραφέας πρότεινε ότι ο αισθητήρας θα πρέπει να εγκατασταθεί απευθείας με πίνακες διανομής για να παρακολουθείται η καταναλισκόμενη ενέργεια αντί για τη σύνδεση κάθε συσκευής με το δίκτυο, μειώνοντας έτσι το κόστος εγκατάστασης. Η απόδοση αξιολογήθηκε στην Ιαπωνία σε τρία διαφορετικά νοικοκυριά σε μια περίοδο 12 ετών τις ημέρες του χειμώνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μειώθηκε κατά 5,15% η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας με 42,3% αύξηση στην ικανοποίηση από την άνεση.

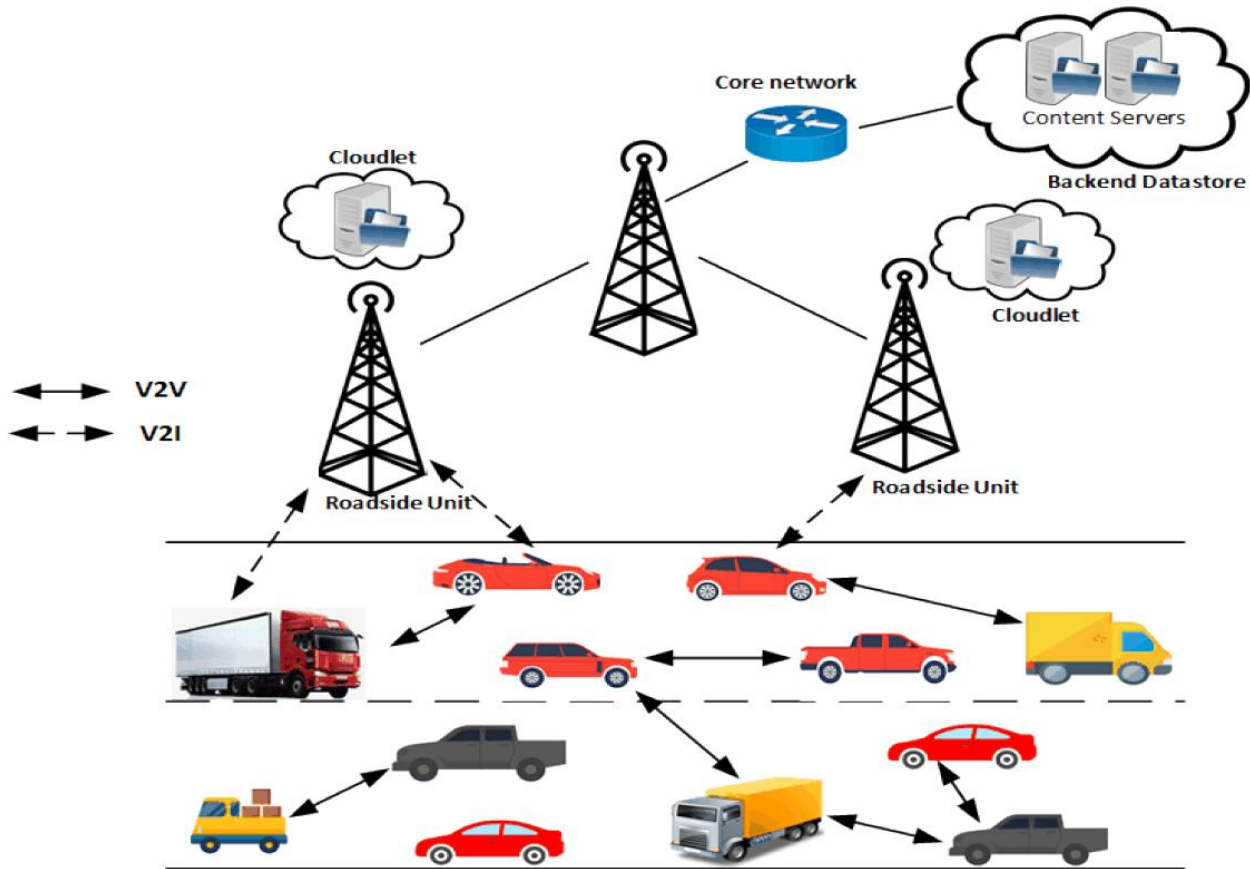
Μια ακραία τιμή αποτελεί ένα σημείο στις ενδείξεις του αισθητήρα, που αποκλίνουν από την κανονική συμπεριφορά των συνολικών δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες. Η ανίχνευση ακραίων τιμών χρησιμοποιείται εναλλακτικά με την ανίχνευση ανωμαλιών, καθώς οι ακραίες τιμές αποτελούν μια σημαντική απόκλιση. Μια ακραία τιμή μπορεί να προκληθεί από δύο παράγοντες, ξαφνική αλλαγή στην ποσότητα που παρακολουθείται ή σφάλμα υλικού. Το πρώτο ονομάζεται γεγονός και το δεύτερο σφάλμα. Επομένως, επιβάλλεται ότι το σύστημα IoT μπορεί να ταξινομήσει τις ακραίες τιμές ανάλογα. Η ανίχνευση ακραίων τιμών πραγματοποιείται είτε με τη χρήση στατιστικών μεθόδων, είτε με αλγορίθμους ML, οι οποίοι το αντιμετωπίζουν ως απλό πρόβλημα ταξινόμησης. Καθώς οι στατιστικές μέθοδοι απαιτούν υπερβολικά μεγάλα σύνολα δεδομένων για να εκτιμήσουν τις αλλαγές, μια μη παραμετρική μέθοδος προτάθηκε από το [96].



Η μέθοδος που προτείνεται χρησιμοποιεί ένα μοντέλο αναφοράς για την ανίχνευση της απόκλισης, χωρίς να υπάρχει όριο χρήσης που να ορίζεται από τον χρήστη, καθώς τέτοιου είδους συστήματα υποφέρουν από προκατάληψη. Στο προτεινόμενο σχήμα, ωστόσο, ένα χαρακτηριστικό μπορεί να θεωρηθεί ως ακολουθία των γεγονότων, και εάν βρεθεί η απόκλιση μόνο σε ένα χαρακτηριστικό, γίνεται σύγκριση όλων των επόμενων αλληλουχιών χαρακτηριστικών για να εντοπιστεί η πηγή της απόκλισης. Η προσέγγιση αυτή προσαρμόζεται καλά στο σύστημα IoT, καθώς έχει τη δυνατότητα λειτουργίας με ένα μικρό σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Η πολυπλοκότητα είναι επίσης κατάλληλη για το QoS του IoT. Ωστόσο, για μεγάλα σύνολα χαρακτηριστικών και για χρονική πολυπλοκότητα ακολουθιών μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος, η αποτελεσματικότητα του συστήματος υποβαθμίζεται. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα δείχνουν υψηλή ακρίβεια στον εντοπισμό συμβάντων και σφαλμάτων.

### **Αυτόνομα οχήματα**

Τα Mobile Ad Hoc Networks (MANETs) παρέχουν υποστήριξη για τις υπηρεσίες της επικοινωνίας Machine to-Machine (M2M), του Fog Computing (FC) και του Edge Computing (EC). Κάθε εφαρμογή στα MANE έχει τις δικές της διαφορετικές απαιτήσεις QoS. Ωστόσο, οι επικοινωνίες των αυτόνομων ad-hoc δικτύων οχημάτων (Autonomous Ad Hoc Vehicular Networks - VANETs) και οι επικοινωνίες από όχημα σε όχημα (Vehicle-to-Vehicle (V2V)) απαιτούν ποιότητα στην μεταφορά δεδομένων και αποτελεσματική ανακάλυψη περιεχομένου. Η συνεχής κίνηση των οχημάτων μπορεί σε μεγάλο βαθμό να επηρεάσει την ποιότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των συσκευών και οχημάτων. Οι Arshad et al. [97] παρουσίασαν μια μελέτη με σκοπό να αξιολογήσουν την επίδραση διαφορετικών μοντέλων κινητικότητας (αποτελούμενα από γρήγορα κινούμενες συσκευές και οχήματα), στις τεχνικές ανακάλυψης περιεχομένου για το TI.



Εικόνα 4.2 VANET - Αυτόνομα ad-hoc δίκτυα οχημάτων [97]

Το προτεινόμενο πλαίσιο εξετάζει παράγωγες και άμεσες μετρήσεις κινητικότητας για να αξιολογήσουν τον αντίκτυπό της, σε μια τεχνική αναζήτησης περιεχομένου Peer-to-Peer (P2P). Μελετώνται αποτελεσματικά τα μοντέλα κινητικότητας Manhattan, Reference Point Group Mobility (RPGM) και Random Waypoint (RWP) ως μοντέλα κινητικότητας, ενώ έχουν επιλέξει το Gnutella για την ανακάλυψη περιεχομένου P2P για μη δομημένα πρωτόκολλα. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης και ανάλυσης που παρουσιάζονται δείχνουν ότι το πρωτόκολλο Gnutella μπορεί να ανακαλύψει περισσότερο αποτελεσματικά τα περιεχόμενα στο μοτίβο κινητικότητας RPGM σε σύγκριση με τα μοτίβα RWP και Manhattan.

### Απτική επικοινωνία και συστήματα 5G

Οι απτικές επικοινωνίες αποτελούν την κύρια εφαρμογή που εκτελείται στο TI. Το TI έχει την απαίτηση επαρκούς χωρητικότητας σε ενδιάμεσους κόμβους, την παροχή πολύ χαμηλής καθυστέρησης και την απαίτηση εξαιρετικής αξιοπιστίας, ώστε να επιτρέπει σε

μεγάλο αριθμό συσκευών να επικοινωνούν μεταξύ τους ταυτόχρονα. Βασισμένοι σε αυτό, οι Feng et al. [98] πρότειναν μια συνεργατική μετάδοση σε συστήματα επικοινωνίας 5G και μελέτησαν την απτική παράδοση πληροφοριών μέσω συστημάτων 5G, για να κατανοήσουν τις εξ' αποστάσεως αλληλεπιδράσεις ανθρώπου με μηχανή, σε πραγματικό χρόνο για το TI. Στο μοντέλο τους ο κόμβος αποστολέα ελέγχει την κατανομή της ροής των δεδομένων με στόχο να αυξήσει την μέση διακίνηση του δικτύου, υπό τον περιορισμό της σταθερότητας και του εγωισμού του δικτύου. Κάθε εγωιστική αναμετάδοση επιλέγει την στρατηγική του προωθητικού αλγορίθμου με σκοπό την βελτιστοποίηση του δικού της οφέλους σε σχέση με την δυναμική κατάσταση του δικτύου. Το προτεινόμενο σχήμα τους, όχι μόνο επιτυγχάνει χαμηλή καθυστέρηση διατηρώντας τη μεγάλη απόδοση δικτύου, αλλά και αποφεύγει την μακροπρόθεσμη εμφάνιση μιας εντελώς εγωιστικής αναμετάδοσης.

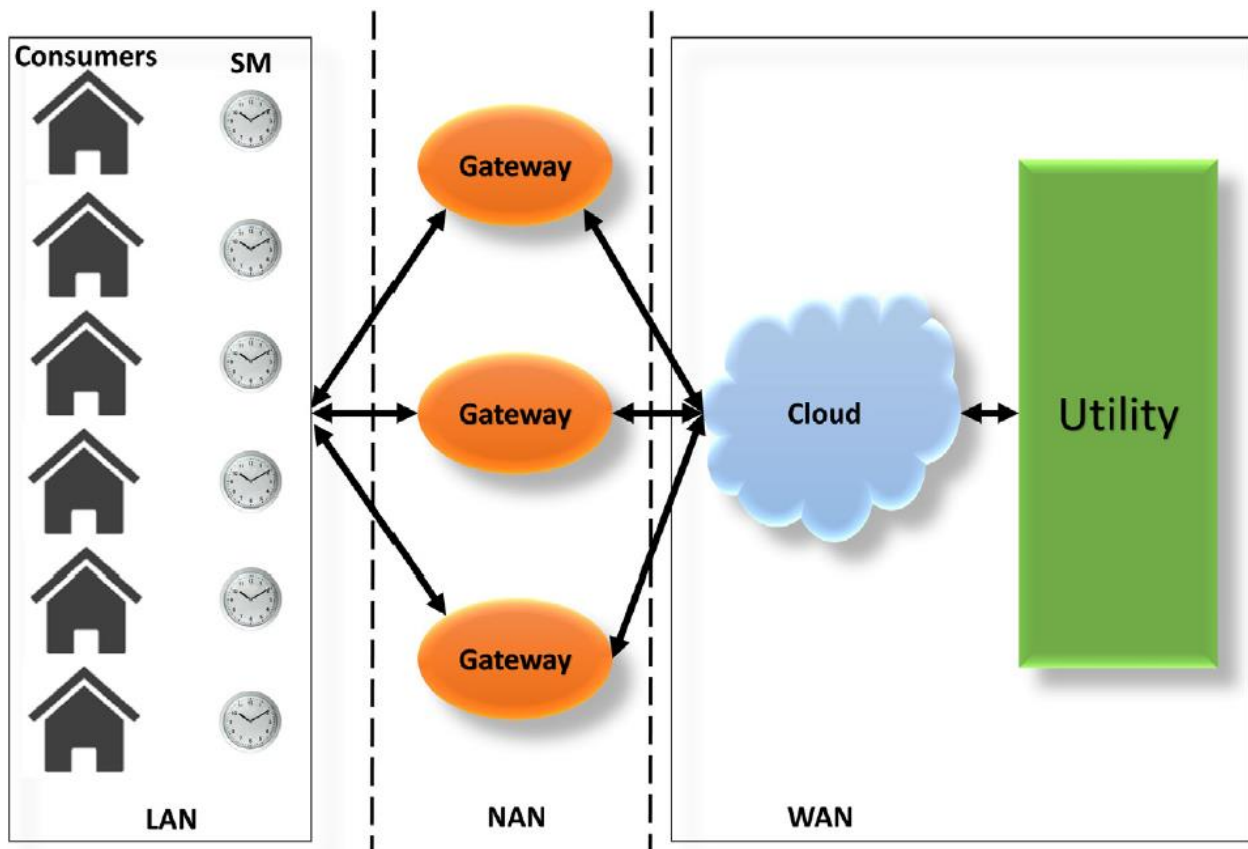
Η ασύρματη τεχνολογία 5G προβλέπεται ότι θα φέρει επανάσταση στην ανάπτυξη πυκνά δομημένων συστημάτων IoT και επικοινωνιών M2M (Machine to Machine). Το URLLC είναι μια από τις κατηγορίες των υπηρεσιών επικοινωνίας 5G, η οποίες προϋποθέτουν δύο αυστηρές απαιτήσεις, την υψηλή αξιοπιστία και την χαμηλή καθυστέρηση. Εξ αιτίας αυτού, καθίσταται σημαντικό στο φυσικό επίπεδο, ότι ο μηχανισμός ανάκτησης σήματος θα πρέπει να εγγυάται χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή ακρίβεια. Επιπρόσθετα, το 5G υποστηρίζει πολλαπλή είσοδο και έξοδο (Multiple Input Multiple Output - MIMO). Οι Guo et al. [99] πρότειναν το Gaussian Message Passing (GMP) για MIMO. Το προτεινόμενο σύστημα συνδυάζει GMP με βαθιά νευρωνικά δίκτυα (Deep Neural Network – DNN) για να αντιμετωπίσουν την ανάκτηση σήματος στο URLLC. Το προτεινόμενο σύστημα συγκλίνει πολύ γρήγορα συγκριτικά με το κλασικό GMP.

Η θεώρηση των σημάτων είναι Gaussian και για να κατασκευαστεί ένα DNN για ένα GMP, ο τύπος των μηνυμάτων μετατρέπεται από επικεντρωμένος στους κόμβους σε επικεντρωμένος στα άκρα. Τα σήματα Gauss ανιχνεύονται από τις τιμές διακύμανσης και τη μέση τιμή. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης αποκαλύπτουν ότι ο αλγόριθμος απεικονίζεται με πιο γρήγορη σύγκλιση αλλά πρέπει να έχει εκ των προτέρων πληροφορίες. Έτσι, επηρεάζεται η δυνατότητα και η σιβαρότητα της εφαρμογής σε

περιορισμένες συσκευές. Τα αποτελέσματα ωστόσο, δείχνουν ότι το προτεινόμενο σχήμα είναι κατάλληλο για αναπτύξεις μεγάλης κλίμακας.

### Έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα

Οι ανησυχίες σχετικά με την ποιότητα ισχύος και την αξιοπιστία είναι σημαντικές προκλήσεις τόσο στους παρόχους υπηρεσιών, όσο και στους καταναλωτές στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Μια πολλά υποσχόμενη λύση σε αυτές τις προκλήσεις είναι το Smart Grid (SG), που οδηγήθηκε από τις εξελίξεις στο IoT. Το συμβατικό ηλεκτρικό δίκτυο μεταμορφώθηκε με τις τεχνολογίες Προηγμένης Υποδομής Μετρήσεων (AMI – Advanced Metering Infrastructure) και Smart Metering (SM).



Εικόνα 4.3 Επικοινωνίες στα έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα [100]

Το σχήμα αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ των επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας και των καταναλωτών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συναλλαγής ρεύματος, επέτρεψε στην SM και την AMI να αποκαλύψουν τις κρυφές λεπτομέρειες της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Turjman et al. [100] επανεξέτασαν την αποτελεσματικότητα των SM και AMI, ενώ

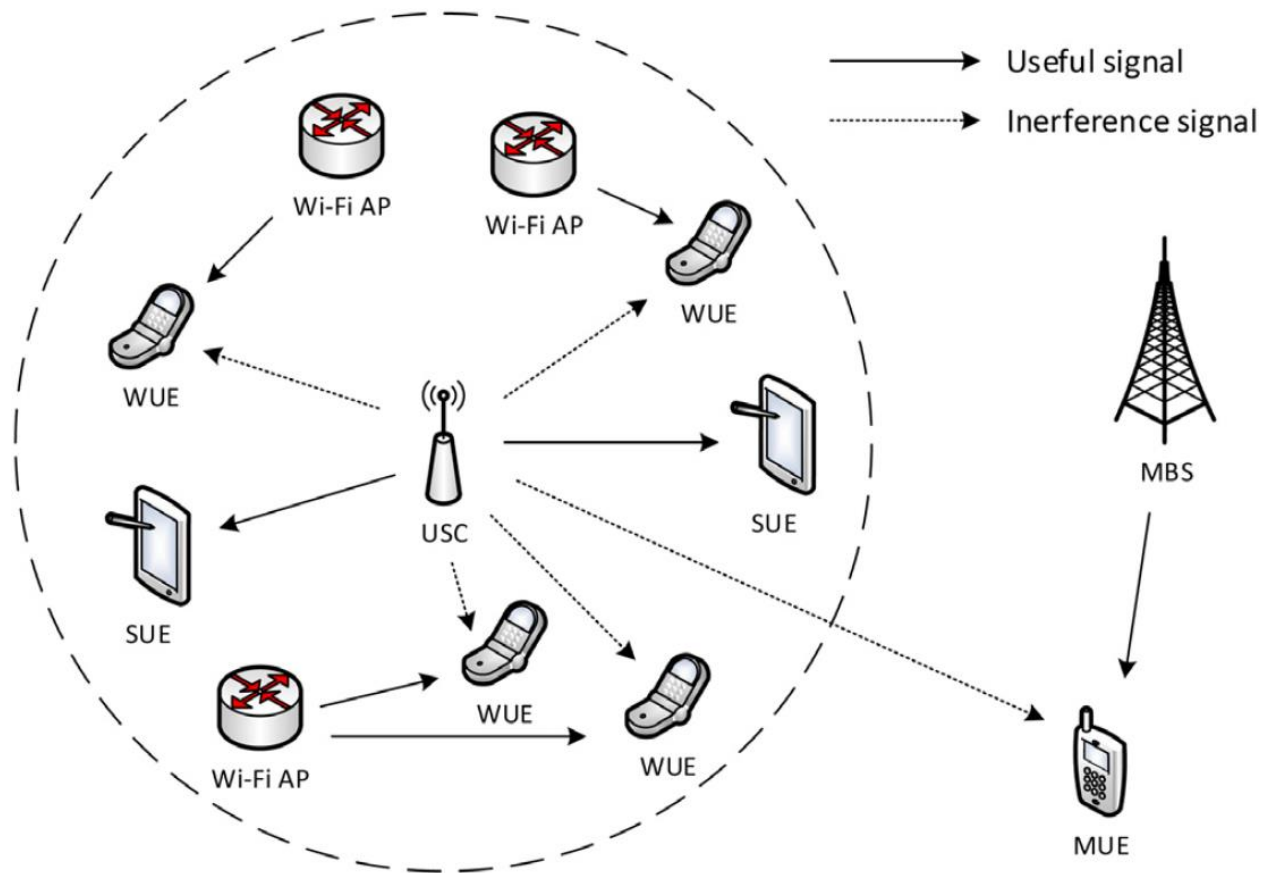
εξέτασαν και τη δομή τους, μαζί με πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας και αλγόριθμους δρομολόγησης. Η έρευνα αποκαλύπτει ότι απαιτείται περισσότερη προσοχή στα ακόλουθα θέματα: στην ανάπτυξη συνεργατικών ολοκληρωμένων μοντέλων, στους αλγόριθμους ενσωματωμένους σε SM, στην ανάπτυξη πολυλειτουργικών SM, στα σχήματα διαχείρισης Big Data, στις τεχνικές για την ανίχνευση προσφοράς/ζήτησης σύντομου χρόνου, στην βέλτιστη αναδιαμόρφωση της δομής των υποδομών επικοινωνίας και στην ανάπτυξη αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

### **IoV (Internet of Vehicles) συστήματα**

Οι Xu et al. [101] επικεντρώθηκαν στο IoV για να συλλέξουν τις συνθήκες κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο στο πλαίσιο των συστημάτων ελέγχου μεταφορών, και πρότειναν μια μέθοδο εκφόρτωσης υπολογισμού (computation offloading) με δυνατότητα EC (edge computing-enabled) και προστασία της ιδιωτικότητας. με το όνομα ECO. Επιπρόσθετα, η δρομολόγηση βάσει επικοινωνίας V2V σχεδιάστηκε για να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και το χρόνο σύγκλισης με χρήση τεχνολογίας βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, ιδιαίτερος τον γενετικό αλγόριθμο Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGA-II). Επίσης αναλύονται και συζητούνται τα ληφθέντα αποτελέσματα του προτεινόμενου σχήματος.

### **Απτικές επικοινωνίες σε LTE και Wi-Fi**

Οι Su et al. [102] πρότειναν ένα σύστημα εξισορρόπησης της κυκλοφορίας, που χρησιμοποιεί το Long Term Evolution (LTE) σε ζώνες χωρίς άδεια (LTE U) για απτικές επικοινωνίες στο TI, με το όνομα TAC-U. Παρουσίασαν την ιδέα της αξιοποίησης της τεχνολογίας LTE-U για απτικές επικοινωνίες στο TI συνυπάρχουσα με χρήστες κινητής τηλεφωνίας (MUE) και Wi-Fi (WUE) σε ζώνες χωρίς άδεια.



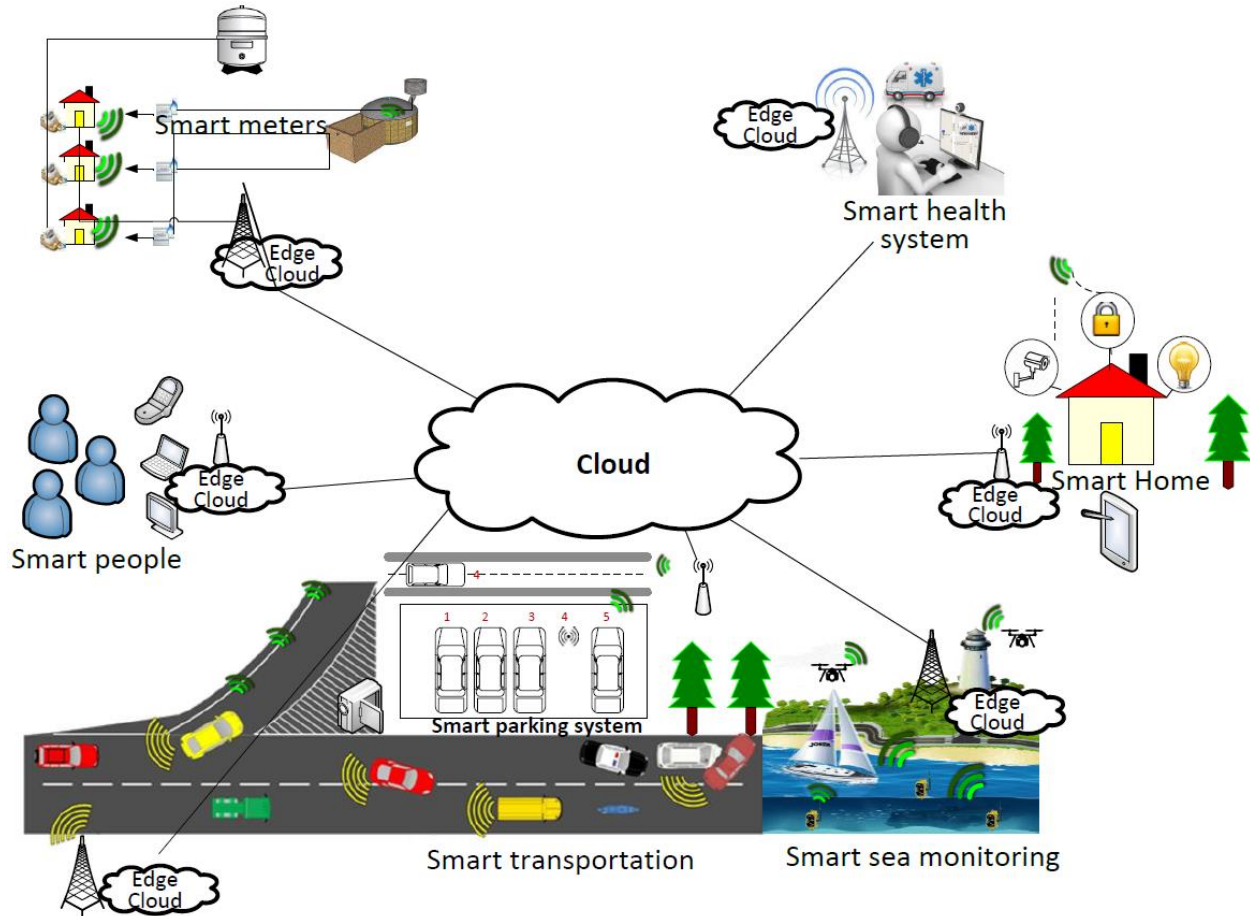
**Εικόνα 4.4** Σύστημα εξισορρόπησης της κυκλοφορίας, με χρήση (LTE) σε ζώνες χωρίς άδεια (LTE U) για απτικές επικοινωνίες στο TI (TAC-U) [102]

Για να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός των χρηστών απτικών αισθητήρων (SUE) σε ζώνες χωρίς άδεια και για να εξισορροπηθεί η κυκλοφορία, διαμορφώθηκε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με σκοπό να μεγιστοποιηθεί ο αριθμός χρηστών Wi-Fi σε ζώνες χωρίς άδεια, και να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση για τις απτικές και Wi-Fi επικοινωνίες. Το πρόβλημα αυτό έχει στόχο τη βελτιστοποίηση της κατανομής χρόνου και ισχύος μεταξύ μη αδειοδοτημένων και αδειοδοτημένων συγκροτημάτων. Για την επίλυση του διαμορφωμένου προβλήματος, χρησιμοποιείται ένας αλγόριθμος πλήρωσης νερού (water filling algorithm). Η αξιολόγηση της απόδοσης δείχνει ότι το προτεινόμενο σχήμα έχει τη δυνατότητα αποτελεσματικής αύξησης της χρησιμότητας του μέσου χρήστη.

### Cloud και edge computing

Οι υπολογιστικές απαιτήσεις σε σενάρια με περιορισμένους πόρους εκπληρώνονται εν μέρει από το cloud computing. Ωστόσο στις λύσεις που βασίζονται στο cloud, υπάρχει

ένα κόστος όσον αφορά την κινητικότητα και την καθυστέρηση. Αυτές οι απαιτήσεις πληρούνται από το EC (Edge Computing) φέρνοντας τους υπολογιστικούς πόρους στην άκρη του δικτύου.



**Εικόνα 4.5** Εφαρμογές Υπολογιστικής Άκρων (Edge Computing) [103]

Για την παροχή των πλεονεκτημάτων του EC μέσω MEC (Multi-access Edge Computing) που εισήγαγε το ETSI (European Telecommunications Standards Institute), υπάρχουν κάποιες λύσεις. Το FC (Fog Computing) με τη χρήση Cloudlets προτείνεται από την Cisco. Το MEC επιτρέπει να χρησιμοποιούνται οι κοινόχρηστοι πόροι σε όλο το δίκτυο. Το Fog επιτρέπει να εκτελούνται οι εφαρμογές στην άκρη του δικτύου. Τα Cloudlet παρέχουν υπηρεσίες cloud στην άκρη του δικτύου ενώ παίζουν ρόλο στη μείωση του λανθάνοντος χρόνου. Το EC επιτρέπει την πυκνή ανάπτυξη σε περιορισμένη γεωγραφική θέση. Τα άλλα χαρακτηριστικά που προσφέρονται από το EC επιτρέπουν στους κόμβους

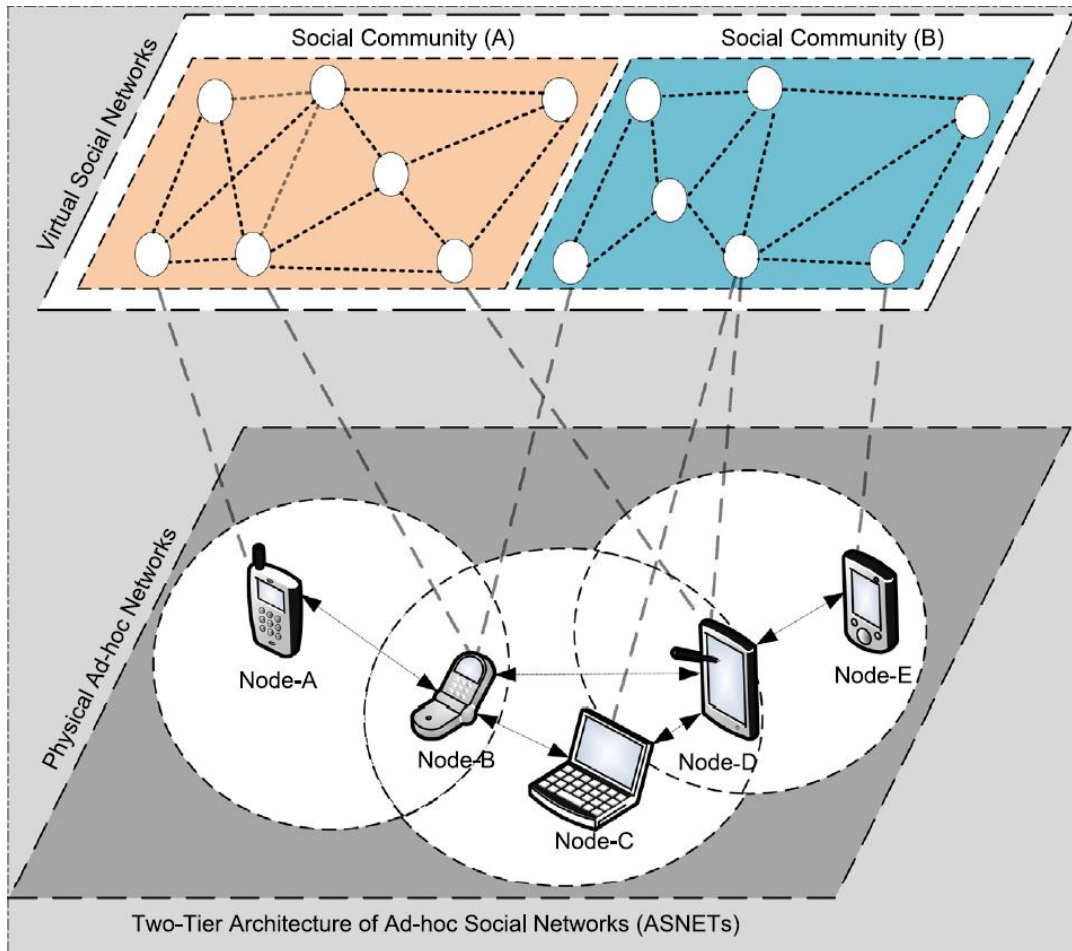
να έχουν επίγνωση περιβάλλοντος και τοποθεσίας, υποστήριξη για την ετερογένεια και χαμηλό λανθάνον χρόνο.

Οι Khan et al. [103] μελέτησαν την εφαρμογή των προαναφερόμενων λύσεων EC, και παρείχαν πληροφορίες για την απόκτηση τάσεων και γνώσεων ως προς την ενίσχυση της ασφάλειας, τη βελτίωση της ιδιωτικής ζωής, την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και την ελαχιστοποίηση του λανθάνοντος χρόνου. Επίσης διερευνήθηκαν οι απαιτήσεις και οι πιθανές προκλήσεις για την εφαρμογή των EC συστημάτων.

### **Κοινωνικά δίκτυα και αποδοτικότερη χρήση των πόρων**

Οι εφαρμογές κοινωνικής δικτύωσης αποτελούν αναπόσπαστο μέρος της κοινωνίας σε αυτήν την εποχή. Έχουν ήδη συμβάλει στους τομείς της ψυχαγωγίας, της επικοινωνίας, των επιχειρήσεων και της εκπαίδευσης. Οι κοινωνικές ιδιότητες των χρηστών όπως οι κοινωνικοί δεσμοί, οι ομοιότητες και τα ανθρώπινα μοτίβα κινητικότητας μπορούν να βοηθήσουν στην αποτελεσματική χρήση των υποκείμενων πόρων.





**Εικόνα 4.6** Αρχιτεκτονική Ad hoc Κοινωνικών Δικτύων (Ad-hoc Social Network - ASNET) [104]

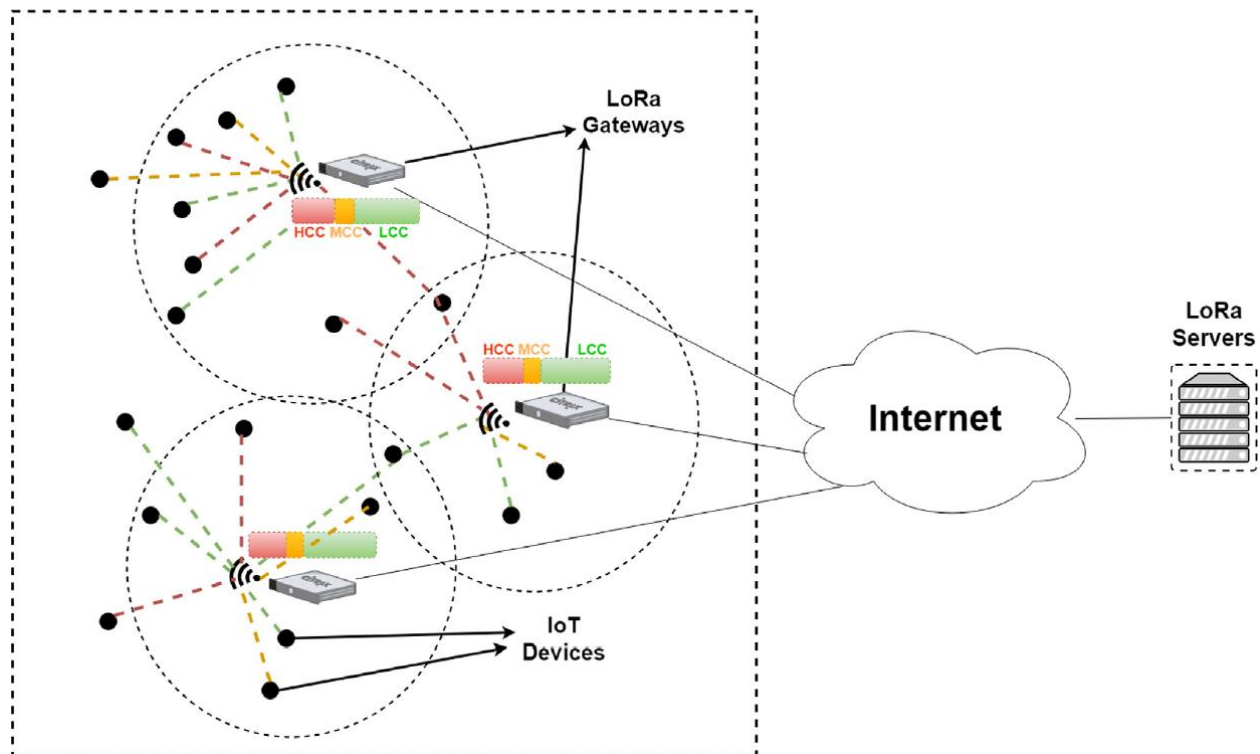
Το Ad hoc Κοινωνικό Δίκτυο (Ad-hoc Social Network - ASNET) χωρίζει τα δεδομένα σε δύο τύπους: σε δεδομένα εφαρμογής και σε κοινωνικά μεταδεδομένα. Τα δεδομένα εφαρμογής αποτελούν τη ραχοκοκαλιά για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των κοινωνικών εφαρμογών. Τα κοινωνικά μεταδεδομένα βοηθούν να συνδεθούν οι κόμβοι με παρόμοια ενδιαφέροντα. Για αναγνώριση του ενός με τον άλλον, κατά τη διάρκεια του μηνύματος χειραψίας, οι κόμβοι ανταλλάσσουν πλήρη ή μερικά κοινωνικά προφίλ, ανάλογα με το πόσο άλλαξαν από την τελευταία επαφή. Λόγω αυτών των επιπλέον δεδομένων που ανταλλάσσονται κατά την επικοινωνία, ένα ασύρματο δίκτυο μπορεί να αντιμετωπίσει πρόβλημα συμφόρησης.

Οι Liaqat et al. [104] εξέτασαν τους μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης και τις υπάρχουσες λύσεις σε ad-hoc δίκτυα. Βρήκαν ότι οι υπάρχουσες λύσεις δεν επικεντρώνουν αρκετά στις κοινωνικές πτυχές. Επομένως, απαιτείται βελτιστοποίηση σε

τομείς όπως: η αξιοπιστία της επικοινωνίας, το απόρρητο και η ασφάλεια, η καθυστέρηση στην επικοινωνία, η διαχείριση της μνήμης, οι αρχιτεκτονικές πολλαπλών επιπέδων και η εξόρυξη δεδομένων.

## 5G και IoT

Το IoT υποστηρίζει μια ποικιλία εφαρμογών και υπηρεσιών. Η μέθοδος του network slicing μπορεί να αποτελέσει μία λύση για την απομόνωσή του δικτύου 5G μέσω ενός κοινού φυσικού δικτύου με ποικίλες απαιτήσεις υπηρεσιών.



**Εικόνα 4.7** Αρχιτεκτονική IoT network slicing σε δίκτυα LoRa [105]

Οι Dawaliby et al. [105] πρότείνουν έναν αλγόριθμο δυναμικής δέσμευσης πόρων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι βασισμένος στην εκτίμηση της μέγιστης πιθανότητας. Αυτή η εκτίμηση πιθανότητας βοηθά να εξαλειφθεί η έλλειψη των πόρων, δίνοντας προτεραιότητα σε ένα κομμάτι (slice) του δικτύου έναντι του άλλου, με βάση τον επείγοντα χαρακτήρα και την αξιοπιστία του. Επιπλέον, ενσωματώνεται ένας αλγόριθμος intra-slicing, ενισχύοντας την κατανομή των πόρων προς εκπλήρωση των απαιτήσεων QoS για κάθε κομμάτι. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερτερεί της δυναμικής και στατικής προσέγγισης κατακερματισμού (slicing). Επίσης ενισχύει την

αποτελεσματικότητα των LongRange (LoRa) συσκευών όσον αφορά την αξιοπιστία, το ποσοστό ικανοποιημένων συσκευών και την κατανάλωση ενέργειας. Ο αλγόριθμος μπορεί να παρουσιάσει περαιτέρω βελτίωση όσον αφορά την αξιοπιστία και κατανάλωση ενέργειας, βελτιστοποιώντας τη διαμόρφωση των παραμέτρων, αλλά όχι σε κόστος της απόδοσης QoS του δικτύου.

Μια άλλη τεχνολογία που θεωρείται ότι θα προσφέρει βελτίωση στις επιδόσεις του 5G είναι τα Cloud Radio Access Networks (CRANs). Το εύρος ζώνης fronthaul είναι περιορισμένο στο 5G για την υποστήριξη πάρα πολύ υψηλού ρυθμού δεδομένων. Έτσι κάποια μπλοκ επεξεργασίας ψηφιακού baseband μετακινούνται από την κεντρική μονάδα (Central Unit - CU) στις απομακρυσμένες κεφαλές ραδιοφώνου (Remote Radio Heads - RRH).

Οι Yu et al. [106] λαμβάνουν υπόψη τη συμπίεση fronthaul και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του χρήστη, βασισμένοι σε μια θεωρία ρυθμού παραμόρφωσης. Ο ρυθμός συμπίεσης του σήματος διατυπώνει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για να αντιμετωπιστεί η εύρεση των βέλτιστων διακυμάνσεων παραμόρφωσης και η ανταλλαγή για τα πιλοτικά σήματα και τα δεδομένα, κάτω από υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR).

### **4.3 Σύνοψη**

Σε αυτή την ενότητα αναφέρθηκαν συνοπτικά οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και στη συνέχεια παρατέθηκαν ορισμένες δοκιμαστικές πλατφόρμες TI και τα αποτελέσματα που είχαν αυτές οι δοκιμές. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί μία συνολική αρχιτεκτονική για το TI, η οποία έχει προταθεί με σκοπό την αντιμετώπιση των προκλήσεων που έχουν αναφερθεί έως τώρα.

## 5 ΕΥΕΛΙΚΤΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΤΙ

Οι εφαρμογές ΤΙ που είδαμε στα προηγούμενα κεφάλαια αναμένεται να φέρουν επανάσταση σε τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες, η υγεία, η εκπαίδευση, ο πολιτισμός το εμπόριο και τα παιχνίδια. Δυστυχώς η μαζική διάδοση αυτών των εφαρμογών καθυστερεί καθώς η τωρινή δομή του internet δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις τους ως προς την απόδοση, την αξιοπιστία και την διαθεσιμότητα. Η μη ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων οδηγεί σε χαμηλή απόδοση και κακή εμπειρία χρήστη.

Η ανάγκη να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί, καθώς και η ανάδυση και η εδραίωση νέων δικτυακών τεχνολογιών όπως η εικονοικοποίηση, τα δίκτυα ορισμένα από λογισμικό (SDN – Software Defined Network) και η δυνατότητα προγραμματισμού του δικτύου, ωθούν την έρευνα σε νέες κατευθύνσεις. Υπάρχει μία προσπάθεια να επαναπροσδιοριστεί η αρχιτεκτονική του διαδικτύου και να σχεδιαστούν καινοτόμα επικοινωνιακά πρωτόκολλα και δικτυακές υπηρεσίες. Ο σκοπός είναι να γίνει εφικτό το Tactile Internet νέας γενιάς το οποίο θα προσφέρει πολύ χαμηλή καθυστέρηση με υψηλά επίπεδα επιδόσεων, διαθεσιμότητας, ανθεκτικότητας και ασφάλειας [39].

Μία από τις αρχιτεκτονικές που προτείνεται είναι η FlexNGIA (Flexible Next-Generation Internet Architecture) [107], η οποία περιλαμβάνει υποδείξεις για τις μελλοντικές υποδομές, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το επιχειρηματικό μοντέλο που θα μπορούσε να ακολουθηθεί. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθεί αυτή η αρχιτεκτονική.

### 5.1 Εισαγωγή στην αρχιτεκτονική FlexNGIA

Η αρχιτεκτονική FlexNGIA έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά.

Χαρακτηριστικό FlexNGIA	Περιγραφή
Επιχειρηματικό μοντέλο και υπηρεσίες	Προσδιορίζονται οι υπηρεσίες που θα πρέπει να προσφέρονται από μελλοντικούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύου (πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου) και καθορίζονται οι διαφορετικοί φορείς που θα συμμετέχουν στο μελλοντικό διαδίκτυο.
Υπολογιστικές δυνατότητες εντός δικτύου	Πρωθείται η ανάπτυξη υπολογιστικών πόρων από άκρη σε άκρη, αλλά και στον πυρήνα του δικτύου.
Βασικές και εξελιγμένες λειτουργίες δικτύου	Προσφορά ενός ευρέος φάσματος λειτουργιών οι οποίες περιλαμβάνουν βασικές λειτουργίες, πιο προηγμένες λειτουργίες για υποστήριξη των εφαρμογών (π.χ. επεξεργασία ολογραμμάτων και βίντεο, συμπύεση

	δεδομένων) αλλά και λειτουργίες επιπέδου μεταφοράς (π.χ. περικοπή βίντεο, έλεγχος συμφόρησης).
Σχεδιασμός πρωτοκόλλου δικτύου διαστρωματικών επιπέδων	Η αρχιτεκτονική προτείνει τον συνδυασμό των επιπέδων δικτύου και μεταφοράς έχοντας στόχο τη διασφάλιση του καλύτερου ελέγχου των υπηρεσιών των επιπέδων 3 (network layer) και 4 (transport layer) βελτιώνοντας περαιτέρω την αποτελεσματικότητά τους.
Δικτύωση με επίγνωση των εφαρμογών	Ο σχεδιασμός είναι τέτοιος που επιτρέπει στο δίκτυο να έχει επίγνωση των εφαρμογών, έτσι ώστε το δίκτυο να γνωρίζει ποιες ροές χρησιμοποιούνται από την ίδια εφαρμογή, ακόμα κι αν η εφαρμογή στέλνει δεδομένα τα οποία διανέμονται σε διαφορετικούς προορισμούς από διαφορετικές πηγές.
Ευέλικτη σχεδίαση εφαρμογών και μηχανική κυκλοφορίας δεδομένων	Η αρχιτεκτονική επιτρέπει να προσαρμοστεί η αλυσίδα λειτουργιών υπηρεσίας (SFC) από τον σχεδιαστή της εφαρμογής σε καθεμία από τις αναπτυγμένες εφαρμογές, καθορίζοντας την κατάλληλη στρατηγική δρομολόγησης εντός της αλυσίδας.
Απλοποιημένη εικονικοποίηση του επιπέδου δικτύου	Η αρχιτεκτονική είναι βασισμένη σε μια εικονικοποίηση του επιπέδου δικτύου (network layer), επιτρέποντας τον εύκολο διαχωρισμό της κίνησης των διαφορετικών εφαρμογών δικτύου.
Πλήρως ευέλικτη μορφή κεφαλίδας πακέτου προσαρμόσιμη σε κάθε εφαρμογή	Πρωθείται μια εντελώς ευέλικτη κεφαλίδα για τα ανώτερα επίπεδα του TCP/IP (δηλαδή επίπεδο 3 και άνω) η οποία θα μπορούσε να οριστεί από τον σχεδιαστή της εφαρμογής ανάλογα με τις απαιτήσεις και τον τύπο της εφαρμογής

**Πίνακας 5.1** Χαρακτηριστικά αρχιτεκτονικής FlexNGIA

### Επιχειρηματικό μοντέλο και υπηρεσίες

Προσδιορίζονται οι υπηρεσίες που θα πρέπει να προσφέρονται από μελλοντικούς φορείς εκμετάλλευσης δικτύου (πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου) και καθορίζονται οι διαφορετικοί φορείς που θα συμμετέχουν στο μελλοντικό διαδίκτυο. Τα μελλοντικά δίκτυα δεν πρέπει να προσφέρουν μόνο υπηρεσίες παράδοσης δεδομένων αλλά και Service Functions Chains (SFCs) δομές οι οποίες είναι σε θέση να μεταφέρουν την κίνηση μεταξύ πολλών και διαφορετικών πηγών δεδομένων σε πολλούς προορισμούς, προσφέροντας έτσι λειτουργίες δικτύου που είναι προσαρμοσμένες στις ανάγκες της κάθε εφαρμογής. Θα πρέπει επίσης να είναι προσαρμόσιμες έτσι ώστε να μπορούν να προσφέρουν εγγυήσεις αξιοπιστίας, διαθεσιμότητας και διαφορετικά επίπεδα απόδοσης, προσαρμόσιμα στις απαιτήσεις των εφαρμογών.

Υπολογιστικές δυνατότητες εντός δικτύου (In-network computing)

Προωθείται η ανάπτυξη υπολογιστικών πόρων από άκρη σε άκρη, αλλά και στον πυρήνα του δικτύου. Αυτό επιτρέπει την δυνατότητα πλήρους προγραμματισμού του δικτύου και μεγάλη ευελιξία στην ανάπτυξη δικτυακών λειτουργιών.

#### Βασικές και εξελιγμένες λειτουργίες δικτύου

Με την βοήθεια της χρήσης των υπολογιστικών πόρων εντός δικτύου, το FlexNGIA μπορεί να προσφέρει ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών οι οποίες περιλαμβάνουν βασικές λειτουργίες (π.χ. τείχος προστασίας, δρομολόγηση, προώθηση πακέτων), πιο προηγμένες λειτουργίες για υποστήριξη των εφαρμογών (π.χ. επεξεργασία ολογραμμάτων και βίντεο, συμπίεση δεδομένων) αλλά και λειτουργίες επιπέδου μεταφοράς (transport layer) (π.χ. περικοπή βίντεο, έλεγχος συμφόρησης). Αυτό απαιτεί να διευρυνθεί η έννοια της δικτύωσης που είναι καθορισμένη από το λογισμικό, για να παρέχει όχι μόνο προγραμματισμό επιπέδου δεδομένων (π.χ. P4 [108]) ή πρωτόκολλα και API για τον καθορισμό βασικών κανόνων προώθησης (π.χ. OpenFlow [109]) αλλά και πρωτόκολλα και API για τον έλεγχο της λειτουργίας των προαναφερθέντων προηγμένων λειτουργιών δικτύου.

#### Σχεδιασμός πρωτοκόλλου δικτύου διαστρωματικών επιπέδων

Η αρχιτεκτονική FlexNGIA προτείνει τον συνδυασμό των επιπέδων δικτύου και μεταφοράς έχοντας στόχο τη διασφάλιση του καλύτερου ελέγχου των υπηρεσιών των επιπέδων 3 (network layer) και 4 (transport layer) βελτιώνοντας περαιτέρω την αποτελεσματικότητά τους. Το συνδυασμένο επίπεδο που προτείνει το FlexNGIA, σπάει την αρχή end-to-end που διέπει το σημερινό internet. Ωστόσο, αυτό επιτρέπει στο δίκτυο να προσφέρει υπηρεσίες όπως ο έλεγχος συμφόρησης και η αξιοπιστία δεδομένων (π.χ. αναμετάδοση και ανίχνευση απώλειας πακέτων), έχοντας στόχο τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης όσον αφορά την απώλεια πακέτων, το εύρος ζώνης και την καθυστέρηση.

#### Δικτύωση με επίγνωση των εφαρμογών

Ο σχεδιασμός του FlexNGIA είναι τέτοιος που επιτρέπει στο δίκτυο να έχει επίγνωση των εφαρμογών. Συνεπώς, το δίκτυο γνωρίζει ποιες ροές χρησιμοποιούνται από την ίδια εφαρμογή, ακόμα κι αν η εφαρμογή στέλνει δεδομένα τα οποία διανέμονται σε διαφορετικούς προορισμούς από διαφορετικές πηγές. Το δίκτυο έχει επίγνωση για τις

μεταβαλλόμενες απαιτήσεις κάθε ροής όσον αφορά τη διαθεσιμότητα, την αξιοπιστία και την απόδοση. Γνωρίζει επίσης, το είδος των δεδομένων που μεταδίδονται και θα μπορούσε να λάβει αποφάσεις, λαμβάνοντας υπόψη το πλαίσιο της εφαρμογής και τη συμπεριφορά χρήστη εντός της εφαρμογής (π.χ. περικοπή ενός βίντεο για να εμφανιστούν μόνο τα σημαντικά αντικείμενα ενός ολογράμματος ή βίντεο).

Ευέλικτη σχεδίαση εφαρμογών και μηχανική κυκλοφορίας δεδομένων

Η αρχιτεκτονική FlexNGIA επιτρέπει να προσαρμοστεί η αλυσίδα λειτουργιών υπηρεσίας (SFC) από τον σχεδιαστή της εφαρμογής σε καθεμία από τις αναπτυγμένες εφαρμογές, καθορίζοντας την κατάλληλη στρατηγική δρομολόγησης εντός της αλυσίδας. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει στρατηγικές όπως το Segment Routing [110] όπου τα πακέτα περιέχουν διαφορετικού είδους οδηγίες (συμπεριλαμβανομένων των οδηγιών προώθησης) ή δρομολόγηση που θα μπορούσε να εκτελεστεί με κεντρικό τρόπο όπως σε δίκτυα που ορίζονται από λογισμικό.

Απλοποιημένη εικονικοποίηση του επιπέδου δικτύου

Η αρχιτεκτονική FlexNGIA είναι βασισμένη σε μια εικονικοποίηση του επιπέδου δικτύου (network layer), επιτρέποντας τον εύκολο διαχωρισμό της κίνησης των διαφορετικών εφαρμογών δικτύου. Αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί επέκταση της τεχνολογίας VLAN, η οποία θα επέτρεπε την ταυτοποίηση κάθε εφαρμογής του δικτύου, με ένα μοναδικό αναγνωριστικό το οποίο παραμένει έγκυρο, ακόμη και όταν τα πακέτα ταξιδεύουν μέσω πολλών δικτύων που διαχειρίζονται από διαφορετικούς φορείς.

Πλήρως ευέλικτη μορφή κεφαλίδας πακέτου προσαρμόσιμη σε κάθε εφαρμογή

Το FlexNGIA προωθεί μια εντελώς ευέλικτη κεφαλίδα για τα ανώτερα επίπεδα του TCP/IP (δηλαδή επίπεδο 3 και άνω) η οποία θα μπορούσε να οριστεί από τον σχεδιαστή της εφαρμογής ανάλογα με τις απαιτήσεις και τον τύπο της εφαρμογής. Οι κεφαλίδες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν μεταδεδομένα ή εντολές για να εκτελεστούν από το πλαίσιο διαχείρισης του δικτύου.

## 5.2 Παραδείγματα μελλοντικών εφαρμογών

Παρακάτω περιγράφονται μερικές πιθανές εφαρμογές δικτύου που θα είναι συνηθείς στο μέλλον.

Μελλοντική εφαρμογή	Περιγραφή
Τηλεπαρουσία	Αυτή η εφαρμογή επιτρέπει στον χρήστη να περιηγηθεί σε διάφορα περιβάλλοντα (π.χ. δρόμους, κτίρια) να συναντήσει άλλα άτομα και να εκτελέσει εργασίες υψηλής ακρίβειας εξ' αποστάσεως με την βοήθεια ενός ρομπότ
Εικονική πραγματικότητα	Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει στον χρήστη την πλοήγηση σε ένα εικονικό περιβάλλον και την αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα.
Holoportation	Είναι ολογράμματα τα οποία αναφέρονται σε υψηλής ποιότητας τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων ή και ανθρώπων, τα οποία μπορούν να συμπιεστούν, να συλληφθούν, και μετέπειτα να ανακατασκευαστούν και να μεταδοθούν σε πραγματικό χρόνο σε μια μακρινή τοποθεσία
Επαυξημένη πραγματικότητα	Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την υπέρθεση αντικειμένων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από υπολογιστή στο οπτικό πεδίο του χρήστη στον πραγματικό κόσμο.
Συνδυασμός των ανωτέρω	Συγχώνευση του ψηφιακού με τον φυσικό κόσμο, όπου το πραγματικό και το εικονικό γίνονται μέρος του περιβάλλοντος, και ενσωματώνουν εκτός από την όραση και την ακρόαση, τις αισθήσεις της όσφρησης και της γεύσης αλλά και απτικές επικοινωνίες.

Πίνακας 5.2 Παραδείγματα μελλοντικών εφαρμογών

### Τηλεπαρουσία

Αυτή η εφαρμογή επιτρέπει στον χρήστη να περιηγηθεί σε διάφορα περιβάλλοντα (π.χ. δρόμους, κτίρια) να συναντήσει άλλα άτομα και να εκτελέσει εργασίες υψηλής ακρίβειας εξ' αποστάσεως με την βοήθεια ενός ρομπότ. Αυτό προϋποθέτει ότι ο χρήστης θα μπορεί να ελέγξει με ακρίβεια το ρομπότ, και ότι θα έχει μια υψηλής ποιότητας αναμετάδοση του τρισδιάστατου οπτικού αλλά και ακουστικού περιβάλλοντος που βρίσκεται το ρομπότ. Επίσης μπορούν να υπάρχουν και κιναισθητικές αλληλεπιδράσεις, με χρήση απτικών τεχνολογιών που αναδημιουργούν στον χρήστη την αίσθηση της αφής που αντιλαμβάνεται το απομακρυσμένο ρομπότ. Η τηλεχειρουργική είναι ένα παράδειγμα τέτοιας εφαρμογής που απαιτεί υψηλό επίπεδο απόδοσης (υψηλή ταχύτητα, μικρό χρόνο καθυστέρησης) και μεγάλη αξιοπιστία.

### Εικονική πραγματικότητα



Η εφαρμογή αυτή επιτρέπει στον χρήστη την πλοήγηση σε ένα εικονικό περιβάλλον και την αλληλεπίδραση με εικονικά αντικείμενα. Παρόμοια με την τηλεπαρουσία, απαιτείται η αναδημιουργία αυτού του περιβάλλοντος το οποίο περιλαμβάνει απτικές αισθήσεις, ήχο και τρισδιάστατη απεικόνιση.

#### Holoportation

Είναι ολογράμματα τα οποία αναφέρονται σε υψηλής ποιότητας τρισδιάστατα μοντέλα αντικειμένων ή και ανθρώπων. Ορίζεται ως η τεχνολογία η οποία επιτρέπει στα ολογράμματα να συμπιεστούν, να συλληφθούν, και μετέπειτα να ανακατασκευαστούν και να μεταδοθούν σε πραγματικό χρόνο σε μια μακρινή τοποθεσία. Η εφαρμογή θα επιτρέπει στο μεταφερόμενο ολόγραμμα να ενσωματωθεί σε πραγματικό ή εικονικό περιβάλλον και να αλληλεπιδρά με ανθρώπους και αντικείμενα που βρίσκονται σε αυτό το περιβάλλον

#### Επαυξημένη πραγματικότητα

Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την υπέρθεση αντικειμένων τα οποία έχουν δημιουργηθεί από υπολογιστή στο οπτικό πεδίο του χρήστη στον πραγματικό κόσμο. Αυτά μπορεί να είναι ολογράμματα, βίντεο, εικόνες, κείμενο ή αποτελέσματα κάποιας ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε στο φυσικό περιβάλλον του χρήστη. Το τελευταίο ενέχει την πρόκληση της αποτύπωσης του πραγματικού περιβάλλοντος του χρήστη, την ανάλυσή του και την αποτύπωση του αποτελέσματος σε πραγματικό χρόνο.

Μελλοντικά υπάρχει η πιθανότητα οι προαναφερόμενες εφαρμογές να συνδυαστούν και να συγχωνευθεί με αυτό τον τρόπο ο ψηφιακός με τον φυσικό κόσμο, όπου το πραγματικό και το εικονικό γίνονται μέρος του περιβάλλοντος. Αυτές οι εφαρμογές αναμένεται επίσης να ενσωματώνουν εκτός από την όραση και την ακρόαση, τις αισθήσεις της όσφρησης και της γεύσης αλλά και απτικές επικοινωνίες [111].

Ένα παράδειγμα εφαρμογής που θα μπορούσε να συνδυάσει όλα τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά, θα μπορούσε να είναι μία εικονική καφετέρια όπου οι χρήστες θα μπορούσαν να αλληλοεπιδράσουν μεταξύ τους, μέσω των ολογραμμάτων τους. Επίσης στην αλληλεπίδραση αυτή θα μπορούσαν να συμμετάσχουν και με τις 5 ανθρώπινες αισθήσεις (όραση, ακοή, αφή, γεύση, όσφρηση)

### 5.3 Απαιτήσεις μελλοντικών εφαρμογών

Οι προαναφερθείσες εφαρμογές έχουν απαιτήσεις αξιοπιστίας και απόδοσης που μπορεί να διαφέρουν μεταξύ των εφαρμογών. Συνοπτικά οι απαιτήσεις αυτές είναι οι ακόλουθες.

Απαίτηση	Περιγραφή
Εύρος ζώνης	Τεράστιος όγκος μεταδιδόμενων δεδομένων μεγέθους δεκάδων terabyte ανά δευτερόλεπτο. Επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν υποδομές υψηλού εύρους ζώνης.
Επεξεργαστική ισχύς	Μεγάλος όγκος δεδομένων που πρέπει να επεξεργαστεί πριν, μετά ή και κατά την διάρκεια της μετάδοσης
Καθυστέρηση	Απαιτείται εξαιρετικά χαμηλή και προβλέψιμη καθυστέρηση καθώς και υψηλή ακρίβεια. Οι απτικές ενέργειες που χρησιμοποιούν τα άκρα του ανθρώπου απαιτούν στιγμιαία ακουστική και οπτική ανατροφοδότηση με καθυστέρηση 1ms.
Αξιοπιστία	Εγγύηση της παράδοσης των μεταδιδόμενων δεδομένων, τα δεδομένα πρέπει απαραίτητα να ληφθούν από τον προορισμό και δεν μπορούν να χαθούν
Διαθεσιμότητα	Το χρονικό διάστημα για το οποίο η εφαρμογή είναι διαθέσιμη. Πολλές από τις μελλοντικές εφαρμογές απαιτούν εξαιρετικά υψηλή διαθεσιμότητα (μεγαλύτερη του 99,999% που αντιστοιχούν στα σημερινά δίκτυα) .

Πίνακας 5.3 Απαιτήσεις μελλοντικών εφαρμογών

#### Εύρος ζώνης

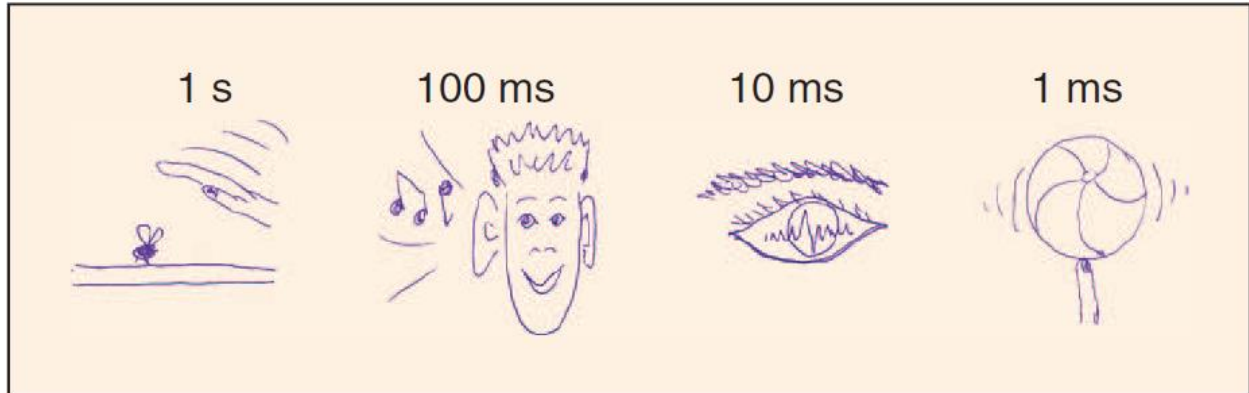
Οι εφαρμογές αυτές πρέπει να μεταδίδουν τεράστιο όγκο δεδομένων ο οποίος μπορεί να φτάσει, ανά δευτερόλεπτο, από μερικές δεκάδες megabyte σε terabyte δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο, υπάρχει επιτακτική ανάγκη να αναπτυχθούν υποδομές υψηλού εύρους ζώνης.

#### Επεξεργαστική ισχύς

Οι εφαρμογές αυτές παράγουν και καταναλώνουν μεγάλο όγκο δεδομένων ο οποίος αναλόγως της εφαρμογής πρέπει να επεξεργαστεί πριν, μετά ή και κατά την διάρκεια της μετάδοσης. Ο τρόπος επεξεργασίας εξαρτάται από τον τύπο της εφαρμογής (π.χ. κρυπτογράφηση, απόδοση και χειρισμός βίντεο, εξόρυξη και συμπίεση δεδομένων, ανίχνευση κίνησης και αναγνώριση αντικειμένων).

#### Καθυστέρηση

Οι μελλοντικές εφαρμογές εξαιτίας της διαδραστικότητάς τους απαιτούν εξαιρετικά χαμηλή και προβλέψιμη καθυστέρηση καθώς και υψηλή ακρίβεια.



**Εικόνα 5.1** Ανθρώπινες αισθήσεις και χρόνοι αντίδρασης [2]

Η καθυστέρηση μπορεί να κυμαίνεται από 1 ms σε 1 δευτερόλεπτο ανάλογα με την ανθρώπινη αίσθηση που συμμετέχει και τη διαδραστικότητα της εφαρμογής [112], [113] (Εικόνα 5.1). Σύμφωνα με τους Fettweis et al. [112], η αίσθηση αφής του ανθρώπου έχει χρόνο αντίδρασης μεταξύ 100 ms και 1 δευτερόλεπτο ανάλογα με την προετοιμασία του χρήστη (δηλαδή, εάν ο χρήστης περιμένει ότι θα αγγίξει ένα αντικείμενο, ο χρόνος αντίδρασης είναι περίπου 100 ms). Ο χρόνος ακουστικής αντίδρασης είναι μεταξύ 70ms και 100ms. Η οπτική αίσθηση απαιτεί λιγότερο από 10 ms καθυστέρησης μεταξύ των διαδοχικών εικόνων. Οι απτικές ενέργειες που χρησιμοποιούν τα άκρα του ανθρώπου απαιτούν στιγμιαία ακουστική και οπτική ανατροφοδότηση με καθυστέρηση 1ms. Αυτή θα αποτελούσε και την απόλυτη περίπτωση χρήσης, όπου ο χρήστης χειρίζεται αντικείμενα από απόσταση με τη βοήθεια ρομπότ ή σε εικονικό περιβάλλον.

### Αξιοπιστία

Η αξιοπιστία αναφέρεται στην εγγύηση της παράδοσης των μεταδιδόμενων δεδομένων. Κάποιες μελλοντικές εφαρμογές ίσως να μην ανέχονται απώλεια πακέτων κάτι που μπορεί να απαιτεί υψηλή αξιοπιστία. Αυτό σημαίνει ότι τα δεδομένα πρέπει απαραίτητα να ληφθούν από τον προορισμό και δεν μπορούν να χαθούν. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα ορισμένες εφαρμογές να απαιτούν μερική αξιοπιστία, κάτι που σημαίνει ότι απαιτείται αξιόπιστη μεταφορά μόνο για κάποιο χρονικό διάστημα ή μόνο για ορισμένα μεταδιδόμενα δεδομένα.

### Διαθεσιμότητα

Αναφέρεται στο χρονικό διάστημα για το οποίο η εφαρμογή είναι διαθέσιμη. Πολλές από τις μελλοντικές εφαρμογές απαιτούν εξαιρετικά υψηλή διαθεσιμότητα [114] (Το 99,99% και το 99,999% αντιστοιχούν σε χρόνους διακοπής λειτουργίας 360 ms και 4 ms ανά ώρα, αντίστοιχα). Τα τέσσερα ή και πέντε εννιάρια που προσφέρουν τα σημερινά δίκτυα, δεν είναι αποδεκτά για πολλές εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση και η τηλεχειρουργική, όπου ένας χρόνος διακοπής λειτουργίας 4 ms θα μπορούσε να είναι θανατηφόρος. Η υψηλή διαθεσιμότητα επιτυγχάνεται με την υψηλή ανθεκτικότητα της υποδομής και των υπηρεσιών δικτύου, δηλαδή την απρόσκοπτη ικανότητα ανάκτησης από πιθανές αστοχίες υλικού και λογισμικού.

#### 5.4 Χαρακτηριστικά Μελλοντικών Εφαρμογών

Τα χαρακτηριστικά που μοιράζονται οι εφαρμογές που προαναφέρθηκαν μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

Χαρακτηριστικά Μελλοντικών Εφαρμογών	Περιγραφή
Εφαρμογές που μοιάζουν με χταπόδι	Οι εφαρμογές του μέλλοντος έχουν την απαίτηση ανοίγματος μεγάλου αριθμού ροών κυκλοφορίας από πολλαπλές πηγές (π.χ. αντικείμενα, αισθητήρες) σε πολλούς προορισμούς
Αλλαγή απαιτήσεων	Με την πάροδο του χρόνου, ανάλογα με το πώς εξελίσσεται το πλαίσιο της εφαρμογής, οι απαιτήσεις απόδοσης των ροών που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες/αντικείμενα ενδέχεται να αλλάξουν.

Πίνακας 5.4 Χαρακτηριστικά μελλοντικών εφαρμογών

##### Εφαρμογές που μοιάζουν με χταπόδι

Οι εφαρμογές του μέλλοντος έχουν την απαίτηση ανοίγματος μεγάλου αριθμού ροών κυκλοφορίας από πολλαπλές πηγές σε πολλούς προορισμούς. Συνήθως οι ροές αυτές προέρχονται από διαφορετικά αντικείμενα ή αισθητήρες με κατεύθυνση προς πολλούς προορισμούς. Επιπρόσθετα, καθεμία από αυτές τις ροές είναι πιθανόν να έχει διαφορετικές απαιτήσεις απόδοσης αναφορικά με τον λανθάνοντα χρόνο (συγχρονισμός χρόνου και από άκρο σε άκρο καθυστέρηση), την απόδοση και την απώλεια πακέτων. Ένα τυπικό παράδειγμα εφαρμογής που μοιάζει με χταπόδι θα ήταν μία εφαρμογή εικονικής καφετέριας, όπου θα υπάρχει ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας και τα ολογράμματα των χρηστών θα μεταδίδονται σε κάθε χρήστη σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτή την εφαρμογή, κάθε χρήστης αποτελεί μια πηγή ροής δεδομένων προς τους άλλους,

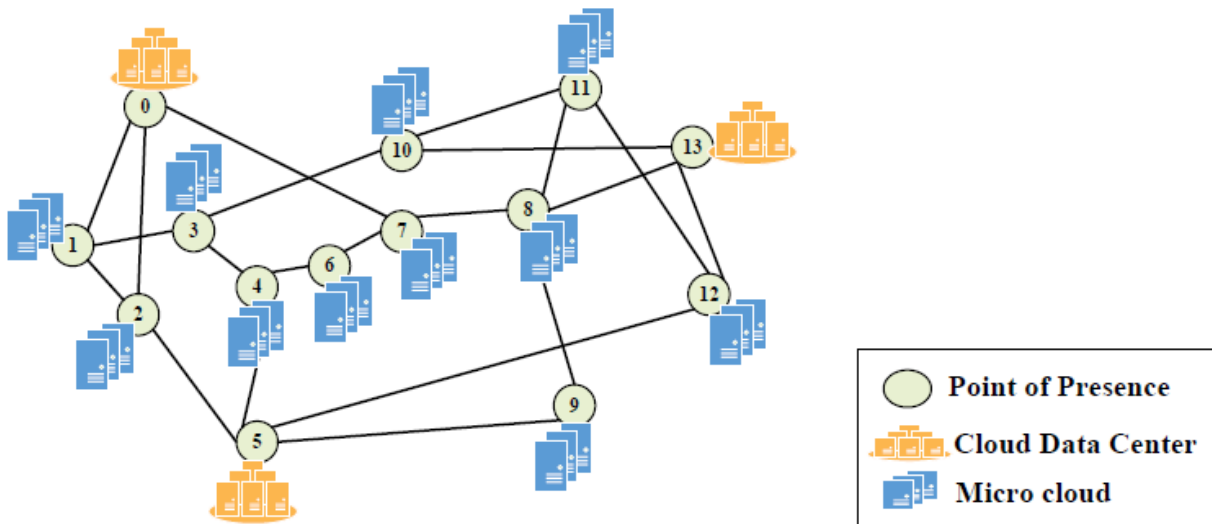
έχοντας στόχο να μεταδώσει το δικό του ολόγραμμα. Ταυτόχρονα, αποτελεί τον προορισμό πολλαπλών ροών, οι οποίες προέρχονται από τους άλλους χρήστες. Αποτέλεσμα αυτού είναι μια εφαρμογή που μοιάζει με χταπόδι (έχει δηλαδή πολλαπλούς βραχίονες που συνδέουν πολλά τελικά σημεία).

#### Αλλαγή απαιτήσεων

Κάθε ροή κυκλοφορίας είναι πιθανό να σχετίζεται με ένα αισθητήρα ή ένα αντικείμενο. Με την πάροδο του χρόνου, ανάλογα με το πώς εξελίσσεται το πλαίσιο της εφαρμογής, οι απαιτήσεις απόδοσης των ροών που προέρχονται από διαφορετικούς αισθητήρες/αντικείμενα ενδέχεται να αλλάξουν. Για παράδειγμα, η ροή μπορεί σε κάποιο χρονικό σημείο να έχει αυστηρές απαιτήσεις ως προς την καθυστέρηση με ελάχιστη απώλεια πακέτων. Υπάρχει όμως η πιθανότητα να γίνουν ανεκτές πιο χαλαρές απαιτήσεις σε κάποια άλλη χρονική στιγμή, δηλαδή υψηλότερη απώλεια πακέτων και καθυστέρηση. Για παράδειγμα, στο εικονικό καφενείο, υποθέτοντας ότι ένας χρήστης Α αλληλεπιδρά (π.χ. μιλάει) με τον χρήστη Β εντός του περιβάλλοντος εικονικής πραγματικότητας. Σε αυτήν την περίπτωση οι ροές κίνησης μεταξύ χρήστη Α προς χρήστη Β θα πρέπει να έχουν αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την απώλεια πακέτων, την καθυστέρηση, το εύρος ζώνης και την αξιοπιστία. Εάν, κάποια στιγμή, ο χρήστης Α σταματήσει να αλληλεπιδρά με τον χρήστη Β, αυτές οι απαιτήσεις θα μπορούσαν να χαλαρώσουν.

Η Ευέλικτη Αρχιτεκτονική Διαδικτύου επόμενης γενιάς προσαρμοσμένη στο TI (FlexNGIA) περιγράφεται παρακάτω, και παρέχει τα βασικά αρχιτεκτονικά της στοιχεία σε επίπεδο δικτύου στοίβας πρωτοκόλλου και κεφαλίδων υποδομών, πλαισίου διαχείρισης και υπηρεσιών, και περιγράφει το δυναμικό επιχειρηματικό μοντέλο προσαρμοσμένο σε αυτή τη νέα αρχιτεκτονική.

## 5.5 Δικτυακή Υποδομή



Εικόνα 5.2 Υποδομή δικτύου FlexNGIA [107].

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των μελλοντικών δικτυακών υποδομών, αποτελεί η διαθεσιμότητα πλήρως προγραμματιζόμενων δικτυακών και υπολογιστικών πόρων όχι μόνο στην άκρη του δικτύου αλλά και στον πυρήνα όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Οι βασικοί κόμβοι του δικτύου είναι Σημεία Παρουσίας (POP) που αποτελούνται από υπολογιστικούς πόρους (π.χ. διακομιστές, GPU, NPU), διακόπτες και δρομολογητές. Τα κύρια χαρακτηριστικά των μελλοντικών υποδομών θα μπορούσαν να συνοψιστούν ως εξής:

Χαρακτηριστικά μελλοντικής δικτυακής υποδομής	Περιγραφή
Edge to edge υποδομές	Οι πάροχοι cloud χτίζουν υποδομές (cloud data centers, micro clouds) καθ' όλο το μήκος του δικτύου, από τον πυρήνα μέχρι τα άκρα του δικτύου.
Υπολογιστικοί πόροι που υπάρχουν παντού	Η διαθεσιμότητα των υπολογιστικών πόρων θα πρέπει να είναι σε όλη την υποδομή, συμπεριλαμβανομένων των άκρων του δικτύου και του πυρήνα, επιτρέποντας το In-Network Computing.
Προγραμματισμός και προηγμένες λειτουργίες δικτύου	Αυτή η δυνατότητα υλοποιείται μέσω πολλών τεχνολογιών, όπως η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου και η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό, επιτρέποντας το διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου δικτύου από το επίπεδο δεδομένων.

Λειτουργίες του δικτύου	Θα πρέπει να υπερβαίνουν την παραδοσιακή προώθηση πακέτων και να περιλαμβάνουν πιο προηγμένες λειτουργίες όπως επεξεργασία και συγκέντρωση δεδομένων εφαρμογών, έλεγχο συμφόρησης, κωδικοποίηση και συμπίεση βίντεο
-------------------------	---

Πίνακας 5.5 Χαρακτηριστικά μελλοντικών δικτυακών υποδομών

### Edge to edge υποδομές

Οι σημερινοί πάροχοι cloud χτίζουν υποδομές καθ' όλο το μήκος του δικτύου, από τον πυρήνα μέχρι τα άκρα του δικτύου. Η κατασκευή τέτοιων υποδομών γίνεται από cloud data centers με πολλούς πόρους και πληθώρα micro cloud και με δυνητικά λιγότερους υπολογιστικούς πόρους στις άκρες [115], [116], [117].

### Υπολογιστικοί πόροι που υπάρχουν παντού

Στις μελλοντικές υποδομές, η διαθεσιμότητα των υπολογιστικών πόρων θα πρέπει να είναι σε όλη την υποδομή, συμπεριλαμβανομένων των άκρων του δικτύου και του πυρήνα. Αξίζει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η ποσότητα των υπολογιστικών πόρων ενδέχεται να ποικίλλει ανάλογα με την τοποθεσία. Αυτοί οι πόροι θα μπορούσαν να είναι δυνατοί διακομιστές με προηγμένη δυνατότητα επεξεργασίας όπως Network Processing Units (NPU) και Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) ή απλώς κλασικοί διακομιστές με βασικές δυνατότητες. Ένας τέτοιος εξοπλισμός επιτρέπει να εκτελεστεί οποιαδήποτε εργασία ή λειτουργία δικτύου σε οποιονδήποτε κόμβο του. Αυτό επιτρέπει το In-Network Computing, που αποτελεί μια σημαντική αλλαγή συγκριτικά με τα παραδοσιακά δίκτυα. Αυτό παρέχει το πλεονέκτημα να εξαιρεθεί οποιαδήποτε καθυστέρηση με την επεξεργασία δεδομένων, στους κόμβους του δικτύου που βρίσκονται στην πορεία προς τον προορισμό

### Προγραμματισμός και προηγμένες λειτουργίες δικτύου

Αυτή η δυνατότητα υλοποιείται μέσω πολλών τεχνολογιών, όπως η εικονικοποίηση λειτουργιών δικτύου και η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό. Η δικτύωση που ορίζεται από λογισμικό επιτρέπει το διαχωρισμό του επιπέδου ελέγχου δικτύου από το επίπεδο δεδομένων. Προωθεί την ιδέα ότι το επίπεδο ελέγχου θα πρέπει να έχει την μορφή ενός κεντρικού controller που θα διαθέτει στα switches, τους κανόνες προώθησης για τη διαχείριση της κυκλοφορίας των δεδομένων. Ταυτόχρονα, η εικονικοποίηση λειτουργίας δικτύου υποστηρίζει την εκτέλεση παραδοσιακών λειτουργιών (π.χ. ανίχνευση εισβολής,

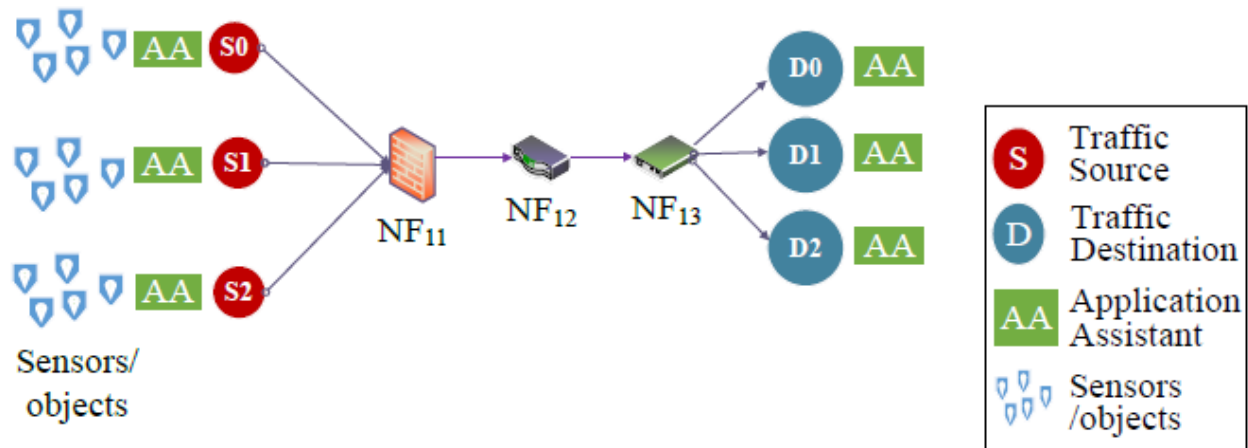
τείχος προστασίας, δρομολόγηση) σε κοντέινερ ή εικονικές μηχανές όπου φιλοξενείται σε κλασικούς διακομιστές.

Ενώ αυτές οι τεχνολογίες αλλάζουν ριζικά τον τρόπο που διαμορφώνεται το δίκτυο και οι παρεχόμενες λειτουργίες του, μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να εξελίξουν το δίκτυο σε νέες κατευθύνσεις. Οι μελλοντικές λειτουργίες του δικτύου θα πρέπει να υπερβαίνουν την παραδοσιακή προώθηση πακέτων και να περιλαμβάνουν πιο προηγμένες λειτουργίες όπως επεξεργασία και συγκέντρωση δεδομένων εφαρμογών, έλεγχο συμφόρησης, κωδικοποίηση και συμπίεση βίντεο. Η σημερινή τάση είναι ότι οι εταιρίες και οι πάροχοι cloud χρησιμοποιούν και δημιουργούν τα δικά τους backbones ιδιωτικής μεταφοράς και όχι τα δημόσια. Αρκετές μεγάλες εταιρείες όπως η Amazon, το Facebook και η Google, έχουν ήδη αρχίσει να δημιουργούν ατελείωτες ιδιωτικές υποδομές (π.χ. Google Cloud Infrastructure). Ένα βασικό πλεονέκτημα της ύπαρξης ενός τέτοιου ιδιωτικού παγκόσμιου δικτύου είναι ότι ο ιδιοκτήτης της υποδομής έχει τον πλήρη έλεγχο όλων των πόρων από άκρη σε άκρη, και ως εκ τούτου, έχει την πλήρη δυνατότητα και ευελιξία να προγραμματίσει και να διαμορφώσει τους υπολογιστικούς πόρους και το δίκτυο, προκειμένου να εγγυηθούν καλύτερα οι επιδιωκόμενοι στόχοι απόδοσης.

## **5.6 Υπηρεσίες Δικτύου**

Τα μελλοντικά δίκτυα θα πρέπει να προσφέρουν προηγμένες υπηρεσίες όπως προσαρμοσμένες στις εφαρμογές υπηρεσίες και αξιοπιστία και όχι μόνο υπηρεσίες παράδοσης δεδομένων. Χάρη σε τεχνολογίες όπως η εικονικοποίηση και η δικτύωση που καθορίζεται από λογισμικό, το δίκτυο θα επιτρέψει δυναμική παροχή υπηρεσιών μέσω Αλυσίδων Λειτουργιών Υπηρεσίας (Service Function Chains - SFC) που θα προσαρμόζονται σε κάθε εφαρμογή.





**Εικόνα 5.3** Παράδειγμα ενός Service Function Chain που σχετίζεται με μια εφαρμογή [107]

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5.3), ένα SFC κατασκευάζεται από Εικονικές Λειτουργίες Δικτύου (Virtual Network Functions - VNF) οι οποίες συνδέονται μέσω εικονικών συνδέσμων. Τα VNF και οι Service Function Chains που συνθέτουν, θα μπορούσαν να προσαρμοστούν με βάση τις απαιτήσεις και τις ανάγκες απόδοσης της εφαρμογής. Όπως φαίνεται στην εικόνα, μια Service Function Chain υποστηρίζει τη μετάδοση δεδομένων από πολλαπλές πηγές προς πολλαπλούς προορισμούς, κάτι που επιτρέπει να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των μελλοντικών εφαρμογών που προσομοιάζουν σε χταπόδι και συνδέουν πολλούς χρήστες ταυτόχρονα (π.χ. μία εικονική καφετέρια).

Σε κάθε τελικό σημείο (δηλαδή προορισμό ή πηγή), μια ειδική λειτουργία δικτύου με την ονομασία Application Assistant (AA) αναπτύσσεται για να λαμβάνει την εξερχόμενη ή εισερχόμενη κίνηση από τους προορισμούς και τις πηγές αντίστοιχα. Η AA λειτουργεί στο επίπεδο εφαρμογής και είναι υπεύθυνη για τη συγκέντρωση της κίνησης που προέρχεται από διαφορετικούς αισθητήρες/αντικείμενα, για την επεξεργασία, την προσθήκη ετικέτας ή το φιλτράρισμα βάσει των απαιτήσεων και του περιβάλλοντος της εφαρμογής (π.χ. προτεραιότητα ροής, συνάφεια δεδομένων, ζητούμενη απόδοση).

Με το σχεδιασμό της αλυσίδας λειτουργίας υπηρεσιών, θα πρέπει να οριστούν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Πηγές και προορισμοί της κίνησης.

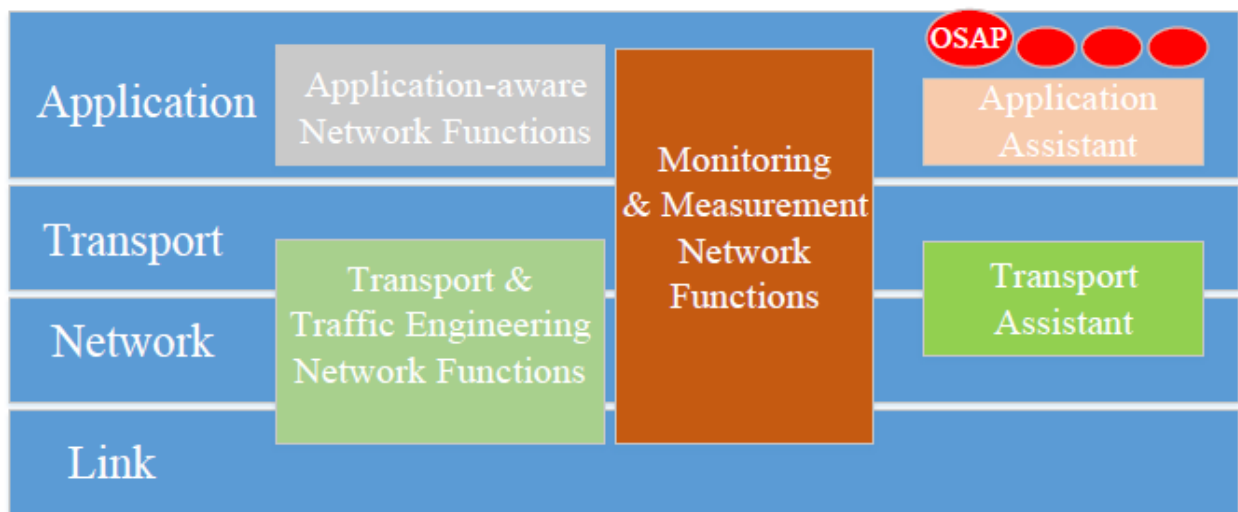
- Οι τύποι καθεμιάς από τις λειτουργίες του δικτύου με πληροφορίες για την απόδοση (π.χ. καθυστέρηση επεξεργασίας, ρυθμός επεξεργασίας πακέτων), τις απαιτήσεις τους όσον αφορά το υλικό και τους πόρους (π.χ. μνήμη και δίσκος, CPU, NPU, GPU) την υλοποίησή τους και τη μορφή του πακέτου εισόδου και του πακέτου εξόδου.
- Η συνολική ζητούμενη απόδοση της αλυσίδας (π.χ. ρυθμός επεξεργασίας πακέτων, καθυστέρηση από άκρο σε άκρο)
- Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που πρέπει να αναπτυχθούν για τη διασφάλιση της επικοινωνίας μεταξύ των τελικών σημείων της Service Function Chain και των συγγενών λειτουργιών του δικτύου.

### 5.7 Λειτουργίες δικτύου και στοίβα πρωτοκόλλου

Με το FlexNGIA, ορίζονται δύο τύποι λειτουργιών που θα μπορούσαν να παρέχονται σε μελλοντικά δίκτυα:

Βασικές λειτουργίες δικτύου

Το δίκτυο θα προσφέρει κλασική παράδοση δεδομένων μέσω παραδοσιακών λειτουργιών δικτύου, όπως η προώθηση πακέτων και η δρομολόγηση, τα συστήματα ανίχνευσης εισβολής και τα τείχη προστασίας.



Εικόνα 5.4 Κατηγορίες προηγμένων λειτουργιών στο FlexNGIA και τα επίπεδα λειτουργίας τους [107]

### Προηγμένες λειτουργίες δικτύου

Τα μελλοντικά δίκτυα θα προσφέρουν υπολογιστικούς πόρους σε όλη την υποδομή (π.χ. NPU, GPU, FPGA, κλασικούς διακομιστές αλλά και εξειδικευμένο υλικό δικτύου), και θα μπορούν να κάνουν τους υπολογιστές εντός δικτύου να υποστηρίζουν τις εφαρμογές. Ανάλογα με την εφαρμογή, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν δυναμικά προηγμένες λειτουργίες, σχετικές με την εφαρμογή. Παραδείγματα τέτοιων λειτουργιών θα μπορούσαν να είναι η προσωρινή αποθήκευση δεδομένων, η ενσωμάτωση δεδομένων σε ροές (π.χ. προσθήκη αντικειμένων για επαυξημένη πραγματικότητα ή υποτιπλισμός για βίντεο, συγχώνευση), η πολυπλεξία ροών, η απόδοση αντικειμένων (object rendering), η συμπίεση και επεξεργασία δεδομένων, και η μηχανική μάθηση. Τέτοιες λειτουργίες μπορούν να λειτουργούν σε διαφορετικά επίπεδα (π.χ. επίπεδο OSI 1 έως επίπεδο 7). Η έννοια της δικτύωσης που καθορίζεται από λογισμικό θα πρέπει να υπερβαίνει τη διαμόρφωση κανόνων προώθησης, έτσι ώστε να επιτρέψει τη δυναμική διαμόρφωση αυτών των προηγμένων λειτουργιών (π.χ. τι είδους επεξεργασία θα πρέπει να εφαρμόσει το δίκτυο σε μία ροή βίντεο).

### 5.8 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύθηκε η FlexNGIA, μία προτεινόμενη ευέλικτη αρχιτεκτονική διαδικτύου για χρήση με το TI. Αρχικά παρατέθηκαν τα χαρακτηριστικά της και στη συνέχεια αναφέρθηκαν παραδείγματα μελλοντικών εφαρμογών και εντοπίστηκαν οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά που θα έχουν αυτές. Τέλος έγινε αναφορά στα τεχνικά στοιχεία της αρχιτεκτονικής FlexNGIA, όπως η δικτυακή υποδομή, οι υπηρεσίες και οι λειτουργίες δικτύου. Στο επόμενο τελευταίο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα συνολικά συμπεράσματα αυτής της έρευνας.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ΤΙ θα φέρει επανάσταση στον τρόπο επικοινωνίας των ανθρώπων μόλις γίνει πραγματικότητα. Οι κύριες προκλήσεις είναι οι απαιτήσεις για εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση. Ωστόσο, το ΤΙ είναι ακόμα στα σπάργανα. Απαιτείται ακόμη αρκετή έρευνα για όλες τις πτυχές του, έτσι ώστε να ξεπεραστούν οι μοναδικές του προκλήσεις. Αυτή η εργασία παρέχει μια έρευνα των προκλήσεων και των λύσεων που προτείνονται μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία, για αυτό το θέμα. Αρχικά αναφέρεται σε κάποιες γενικές έννοιες, τους τομείς εφαρμογής, τις προκλήσεις και το όραμα για το ΤΙ. Στη συνέχεια συζητά τις τεχνολογίες και ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης, σε τρεις διαφορετικούς τομείς εφαρμογής (θεραπεία εξ αποστάσεως φοβίας, αυτόνομης οδήγησης και απομακρυσμένης ρομποτικής χειρουργικής), για να οριστεί ένα σύνολο κριτηρίων αξιολόγησης για το ΤΙ. Βασισμένοι σε αυτά τα κριτήρια αξιολόγησης, οι λύσεις που καλύπτουν οι αλγόριθμοι, η έξυπνη πρόβλεψη, τα πρωτόκολλα και οι αρχιτεκτονικές, έπρεπε να επανεξεταστούν. Επιπλέον, προέκυψαν διδάγματα και πληροφορίες από την εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση. Επίσης, συζητήθηκαν οι εναπομείνουσες προκλήσεις και πολλά υποσχόμενες ερευνητικές κατευθύνσεις σε αυτό το θέμα, βασισμένοι στα διδάγματά μας.

Μία από τις τεχνολογίες που θα δώσουν ώθηση στο ΤΙ, είναι τα δίκτυα 5G and Beyond (B5G) (δηλαδή τα δίκτυα 5ης γενιάς και οι επόμενες γενιές που θα ακολουθήσουν) τα οποία αναμένεται να υποστηρίξουν μια ευρεία ποικιλία αναδυόμενων εφαρμογών ΤΙ με διάφορες απαιτήσεις QoS. Για αυτό, προέκυψαν αρκετές μη συμβατικές προκλήσεις, λόγω της ανάγκης επικοινωνίας των απτικών πληροφοριών, επιπλέον των συμβατικών οπτικών και ακουστικών, και όλες αυτές με τη χρήση ασύρματων μέσων. Οι κύριες τεχνικές απαιτήσεις από αυτή την άποψη περιλαμβάνουν την εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, ενεργειακή απόδοση, πολύ υψηλό ρυθμό δεδομένων και φασματική απόδοση δικτύου. Το υλικό έρευνας είχε διάφορες κατευθύνσεις και κάλυπτε έρευνες που αφορούν στο απτικό Διαδίκτυο για συστήματα 5G στο φυσικό επίπεδο αλλά και σε υπηρεσίες και εφαρμογές, π.χ. έξυπνο σπίτι, έξυπνο δίκτυο και Διαδίκτυο των πραγμάτων.

Ακόμα, αναλύθηκαν οι απαιτήσεις και τα χαρακτηριστικά των μελλοντικών εφαρμογών δικτύωσης. Τονίστηκαν επίσης οι περιορισμοί των σημερινών πρωτοκόλλων και αρχιτεκτονικής δικτύου και της αδυναμίας τους να καλύψουν αυτές τις απαιτήσεις. Προωθήθηκε, λοιπόν, μια Ευέλικτη Αρχιτεκτονική Διαδικτύου επόμενης γενιάς προσαρμοσμένη στο TI (που ονομάζεται FlexNGIA) που θα μπορούσε να απευθύνεται σε αυτούς τους περιορισμούς. Το FlexNGIA ορίζει μια νέα αρχιτεκτονική Διαδικτύου που αξιοποιεί τη διαθεσιμότητα των υπολογιστικών πόρων σε όλο το μήκος των μελλοντικών δικτυακών υποδομών, για να επιτραπεί ο υπολογισμός εντός δικτύου. Αυτό επιτρέπει τη φιλοξενία στο δίκτυο προχωρημένων λειτουργιών δικτύου, που θα μπορούσαν να υποστηρίξουν τις εφαρμογές του TI.

Το FlexNGIA ορίζει επίσης ένα επιχειρηματικό μοντέλο όπου οι φορείς εκμετάλλευσης δικτύου θα μπορούσαν να προσφέρουν αλυσίδες λειτουργιών εξυπηρέτησης (Service Function Chains - SFC), με αυστηρές απαιτήσεις όσον αφορά την αξιοπιστία, την απόδοση και τη διαθεσιμότητα, αλλά επίσης και την κλασσική παράδοση δεδομένων. Ένα άλλο σχετικό χαρακτηριστικό του FlexNGIA είναι ότι υποστηρίζει τον συνδυασμό επιπέδων δικτύου και μεταφοράς, που επιτρέπει στο δίκτυο να προσφέρει καλύτερη αξιοπιστία και έλεγχο συμφόρησης, επιτρέποντας σε προηγμένες λειτουργίες εντός του δικτύου να γνωρίζουν τις ροές που ανήκουν στην ίδια εφαρμογή και τις απαιτήσεις καθεμιάς από αυτές. Η FlexNGIA θεωρεί επίσης πλήρως ευέλικτες κεφαλίδες πακέτων, οι οποίες θα έχουν την ικανότητα να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Το FlexNGIA παρέχει μόνο τα πιθανά δομικά στοιχεία της μελλοντικής Αρχιτεκτονικής Διαδικτύου, που απαιτεί υψηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης, εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση, ανθεκτικότητα, διαθεσιμότητα και υψηλή αξιοπιστία,. Ωστόσο, για την κάλυψη αυτών των απαιτήσεων, πρέπει να αντιμετωπιστούν πολλές προκλήσεις που σχετίζονται με το FlexNGIA, συμπεριλαμβανομένης της σηματοδότησης, της κατανομής πόρων, της ανοχής σε σφάλματα, του σχεδιασμού των αλυσίδων λειτουργιών υπηρεσίας (Service Function Chains - SFCs), της απόδοσης, της παρακολούθησης, της τιμολόγησης και της ασφάλειας.

Τελικά, ξεκινώντας με το όραμα του TI και τις πρόσφατες εξελίξεις, αυτή η έρευνα παρουσίασε ένα γενικευμένο πλαίσιο για το ασύρματο TI που περιλαμβάνει τις

τεχνολογίες που θα το κάνουν εφικτό, τις κύριες τεχνικές απαιτήσεις, τις κύριες περιοχές των εφαρμογών και μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική TI, ενώ έχει παράσχει μια εκτεταμένη επισκόπηση των ερευνητικών άρθρων για τις διάφορες πτυχές του ασύρματου TI.

## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Fettweis G et al., “The Tactile Internet”, ITU, Geneva, Switzerland, Aug. 2014.
- [2] G. P. Fettweis, “The tactile internet: Applications and challenges,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, 2014.
- [3] O. Holland, E. Steinbach, R. V. Prasad, Q. Liu, Z. Dawy, A. Aijaz, N. Pappas, K. Chandra, V. S. Rao, S. Oteafy, M. Eid, M. Luden, A. Bhardwaj, X. Liu, J. Sachs, and J. Araujo, “The IEEE 1918.1 ‘Tactile internet’ standards working group and its standards,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 256–279, 2019.
- [4] M. Maier, M. Chowdhury, B. P. Rimal, and D. P. Van, “The tactile internet: Vision, recent progress, and open challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 138–145, 2016.
- [5] K. S. Kim, D. K. Kim, C.-B. Chae, S. Choi, Y.-C. Ko, J. Kim, Y.-G. Lim, M. Yang, S. Kim, B. Lim, K. Lee, and K. L. Ryu, “Ultrareliable and low-latency communication techniques for tactile internet services,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 376–393, 2019.
- [6] *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, ITU-R Recommendation M.2083- 0, Sep. 2015.
- [7] N. A. Mohammed, A. M. Mansoor, and R. B. Ahmad, “Mission-critical machine-type communication: An overview and perspectives towards 5G,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127198–127216, 2019.
- [8] Qualcomm. “Augmented and virtual reality: The first wave of 5G killer apps.” [Online]. Available: <https://www.qualcomm.com/content/dam/qcomm-martech/dm-assets/documents/cr-qcom-140.pdf>. [Accessed: 15-Jul-2022].
- [9] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, and J. C. Zhang, “What will 5G be?,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.

- [10] K. Antonakoglou, X. Xu, E. Steinbach, T. Mahmoodi, and M. Dohler, "Toward haptic communications over the 5G tactile internet," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3034–3059, 2018.
- [11] A. Aijaz, "Towards 5G-enabled tactile internet: Radio Resource Allocation for haptic communications," *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2016.
- [12] O. Holland, S. Wong, V. Friderikos, Z. Qin, and Y. Gao, "Virtualized sub-ghz transmission paired with mobile access for the tactile internet," *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2016.
- [13] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, "5G-enabled tactile internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 460–473, 2016.
- [14] D. Van Den Berg, R. Glans, D. De Koning, F. A. Kuipers, J. Lugtenburg, K. Polachan, P. T. Venkata, C. Singh, B. Turkovic, and B. Van Wijk, "Challenges in haptic communications over the tactile internet," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23502–23518, 2017.
- [15] S. M. Oteafy and H. S. Hassanein, "Leveraging tactile internet cognizance and Operation Via IOT and Edge Technologies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 364–375, 2019.
- [16] M. Dohler, T. Mahmoodi, M. A. Lema, M. Condoluci, F. Sardis, K. Antonakoglou, and H. Aghvami, "Internet of skills, where robotics meets AI, 5G and the tactile internet," *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2017.
- [17] E. Steinbach, M. Strese, M. Eid, X. Liu, A. Bhardwaj, Q. Liu, M. Al-Ja'afreh, T. Mahmoodi, R. Hassen, A. El Saddik, and O. Holland, "Haptic codecs for the tactile internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 447–470, 2019.
- [18] A. Aijaz, M. Dohler, A. H. Aghvami, V. Friderikos, and M. Frodigh, "Realizing the tactile internet: Haptic communications over Next Generation 5G Cellular Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 82–89, 2017.



- [19] M. Maier, "The tactile internet: Where do we go from here?," *2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*, 2018.
- [20] C. Li, C.-P. Li, K. Hosseini, S. B. Lee, J. Jiang, W. Chen, G. Horn, T. Ji, J. E. Smee, and J. Li, "5G-based systems design for tactile internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 307–324, 2019.
- [21] S. K. Sharma, I. Woungang, A. Anpalagan, and S. Chatzinotas, "Toward tactile internet in beyond 5G era: Recent advances, current issues, and Future Directions," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56948–56991, 2020.
- [22] R. Gupta, S. Tanwar, S. Tyagi, and N. Kumar, "Tactile internet and its applications in 5G Era: A comprehensive review," *International Journal of Communication Systems*, vol. 32, no. 14, 2019.
- [23] E. Steinbach, S. Hirche, M. Ernst, F. Brandi, R. Chaudhari, J. Kammerl, and I. Vittorias, "Haptic Communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 4, pp. 937–956, 2012.
- [24] E. Steinbach, S. Hirche, J. Kammerl, I. Vittorias, and R. Chaudhari, "Haptic data compression and communication," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, no. 1, pp. 87–96, 2011.
- [25] I. Budhiraja, S. Tyagi, S. Tanwar, N. Kumar, and J. J. Rodrigues, "Tactile internet for smart communities in 5G: An insight for NOMA-based solutions," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3104–3112, 2019.
- [26] J. Sachs, L. A. Andersson, J. Araujo, C. Curescu, J. Lundsjo, G. Rune, E. Steinbach, and G. Wikstrom, "Adaptive 5G low-latency communication for tactile internet services," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 325–349, 2019.
- [27] X. Jiang, H. Shokri-Ghadikolaei, G. Fodor, E. Modiano, Z. Pang, M. Zorzi, and C. Fischione, "Low-latency networking: Where latency lurks and how to tame it," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 280–306, 2019.

- [28] Y. Miao, Y. Jiang, L. Peng, M. S. Hossain, and G. Muhammad, "Telesurgery robot based on 5G tactile internet," *Mobile Networks and Applications*, vol. 23, no. 6, pp. 1645–1654, 2018.
- [29] R. Gupta, S. Tanwar, S. Tyagi, and N. Kumar, "Tactile-internet-based telesurgery system for healthcare 4.0: An Architecture, research challenges, and Future Directions," *IEEE Network*, vol. 33, no. 6, pp. 22–29, 2019.
- [30] S. Haddadin, L. Johannsmeier, and F. Diaz Ledezma, "Tactile robots as a central embodiment of the tactile internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 471–487, 2019.
- [31] A. Aijaz and M. Sooriyabandara, "The tactile internet for industries: A Review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 414–435, 2019.
- [32] F. Dressler, F. Klingler, M. Segata, and R. L. Cigno, "Cooperative driving and the tactile internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 436–446, 2019.
- [33] A. A. Ateya, A. Muthanna, A. Vybornova, I. Gudkova, Y. Gaidamaka, A. Abuarqoub, A. D. Algarni, and A. Koucheryavy, "Model mediation to overcome light limitations—toward a secure tactile internet system," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 8, no. 1, p. 6, 2019.
- [34] T. H. Szymanski, "Securing the industrial-tactile internet of things with deterministic silicon photonics switches," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 8236–8249, 2016.
- [35] J. A. Cabrera, R.-S. Schmoll, G. T. Nguyen, S. Pandi, and F. H. Fitzek, "Softwarization and network coding in the mobile edge cloud for the tactile internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 107, no. 2, pp. 350–363, 2019.
- [36] S. Sukhmani, M. Sadeghi, M. Erol-Kantarci, and A. El Saddik, "Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile internet," *IEEE MultiMedia*, vol. 26, no. 1, pp. 21–30, 2019.
- [37] S. Aggarwal and N. Kumar, "Fog computing for 5G-enabled tactile internet: Research issues, challenges, and future research directions," *Mobile Networks and Applications*, 2019.

[38] E. Bastug, M. Bennis, M. Medard, and M. Debbah, "Toward interconnected virtual reality: Opportunities, challenges, and enablers," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 110–117, 2017.

[39] "The tactile internet - ITU." [Online]. Available: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/23/01/T23010000230001PDFE.pdf). [Accessed: 18-Jul-2022].

[40] L. Zou, C. Ge, Z. Wang, E. Cretu, and X. Li, "Novel tactile sensor technology and smart tactile sensing systems: A Review," *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2653, 2017.

[41] O'Halloran, D.; Kvochko, E. Industrial Internet of Things: Unleashing the Potential of Connected. WEFUSA Industrial Internet Report. 2015. Available: <https://www.weforum.org/press/2015/01/industrial-internet-of-things-unleashing-the-potential-of-connected-products-and-services/>

[42] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2020.

[43] M. Maier and A. Ebrahimzadeh, "Towards immersive tactile internet experiences: Low-latency FiWi enhanced mobile networks with Edge Intelligence [invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 11, no. 4, 2019.

[44] M. Maier, A. Ebrahimzadeh, and M. Chowdhury, "The tactile internet: Automation or augmentation of the human?," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 41607–41618, 2018.

[45] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, "Toward 6G networks: Use cases and technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.

[46] S. Mondal, L. Ruan, M. Maier, D. Larrabeiti, G. Das, and E. Wong, "Enabling remote human-to-machine applications with AI-enhanced servers over Access Networks," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 889–899, 2020.

[47] L. Ruan, M. P. Dias, and E. Wong, "Achieving low-latency human-to-machine (H2M) applications: An understanding of H2M traffic for AI-facilitated bandwidth allocation," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 626–635, 2021.

- [48] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [49] B. Yi, X. Wang, K. Li, S. k. Das, and M. Huang, "A comprehensive survey of Network Function Virtualization," *Computer Networks*, vol. 133, pp. 212–262, 2018.
- [50] D. Kreutz, F. M. Ramos, P. Esteves Verissimo, C. Esteve Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2015.
- [51] S. Wang, X. Zhang, Y. Zhang, L. Wang, J. YANG, and W. Wang, "A survey on mobile edge networks: Convergence of computing, Caching and Communications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 6757–6779, 2017.
- [52] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, and K. B. Letaief, "A survey on Mobile Edge Computing: The communication perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358, 2017.
- [53] A. C. Baktir, A. Ozgovde, and C. Ersoy, "How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey, use cases, and future directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2359–2391, 2017.
- [54] S. K. Routray and K. P. Sharmila, "Software defined networking for 5G," *2017 4th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2017.
- [55] N. Promwongsa, A. Ebrahimzadeh, D. Naboulsi, S. Kianpisheh, F. Belqasmi, R. Glitho, N. Crespi, and O. Alfandi, "A comprehensive survey of the tactile internet: State-of-the-art and Research Directions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 1, pp. 472–523, 2021.
- [56] H. S. Varsha and K. P. Shashikala, "The tactile internet," *2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, 2017.
- [57] P. J. Choi, R. J. Oskouian, and R. S. Tubbs, "Telesurgery: Past, present, and future," *Cureus*, 2018.

- [58] M. Ghodoussi, S. E. Butner, and Y. Wang, "Robotic surgery—the transatlantic case," in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, May 2002, pp. 1882–1888
- [59] A. Aijaz, M. Dohler, A. H. Aghvami, V. Friderikos, and M. Frodigh, "Realizing the tactile internet: Haptic communications over Next Generation 5G Cellular Networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 2, pp. 82–89, 2017.
- [60] C. Mouradian, D. Naboulsi, S. Yangui, R. H. Glitho, M. J. Morrow, and P. A. Polakos, "A comprehensive survey on Fog Computing: State-of-the-art and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 1, pp. 416–464, 2018.
- [61] V. Vitiello, Su-Lin Lee, T. P. Cundy, and Guang-Zhong Yang, "Emerging robotic platforms for minimally invasive surgery," *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 6, pp. 111–126, 2013.
- [62] Y. Gao, S. S. Vedula, C. E. Reiley, N. Ahmidi, B. Varadarajan, H. C. Lin, L. Tao, L. Zappella, B. Bejar, D. D. Yuh, et al. "Jhu-isi gesture and skill assessment working set (jigsaws): A surgical activity dataset for human motion modeling." *MICCAI workshop: M2cai*, Vol. 3, No. 3, p. 3, 2014.
- [63] J. Wang, J. Liu, and N. Kato, "Networking and communications in Autonomous Driving: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 2, pp. 1243–1274, 2019.
- [64] S. Pendleton, H. Andersen, X. Du, X. Shen, M. Meghjani, Y. Eng, D. Rus, and M. Ang, "Perception, planning, control, and coordination for Autonomous Vehicles," *Machines*, vol. 5, no. 1, p. 6, 2017.
- [65] H. Cao, S. Gangakhedkar, A. R. Ali, M. Gharba, and J. Eichinger, "A 5G V2X testbed for Cooperative Automated Driving," *2016 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2016.
- [66] S. Pandi, F. H. Fitzek, C. Lehmann, D. Nophut, D. Kiss, V. Kovacs, A. Nagy, G. Csorvasi, M. Toth, T. Rajacsis, H. Charaf, and R. Liebhart, "Joint Design of Communication and control for connected cars in 5G Communication Systems," *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2016.

- [67] C. Botella, J. Breton-López, S. Quero, R. M. Baños, A. García-Palacios, I. Zaragoza, and M. Alcaniz, "Treating cockroach phobia using a serious game on a mobile phone and Augmented Reality Exposure: A single case study," *Computers in Human Behavior*, vol. 27, no. 1, pp. 217–227, 2011.
- [68] M. Wrzesien, C. Botella, J. Bretón-López, E. del Río González, J.-M. Burkhardt, M. Alcañiz, and M. Á. Pérez-Ara, "Treating small animal phobias using a projective-augmented reality system: A single-case study," *Computers in Human Behavior*, vol. 49, pp. 343–353, 2015.
- [69] D. L. Chambless, W. C. Sanderson, V. Shoham, S. B. Johnson, K. S. Pope, P. Crits-Christoph, M. Baker, B. Johnson, S. R. Woody, S. Sue, L. Beutler, D. A. Williams, and S. McCurry, "An update on empirically validated therapies," *PsycEXTRA Dataset*, 1996.
- [70] D. Coyle, G. Doherty, M. Matthews, and J. Sharry, "Computers in talk-based mental health interventions," *Interacting with Computers*, vol. 19, no. 4, pp. 545–562, 2007.
- [71] A. S. Carlin, H. G. Hoffman, and S. Weghorst, "Virtual reality and tactile augmentation in the treatment of Spider Phobia: A case report," *Behaviour Research and Therapy*, vol. 35, no. 2, pp. 153–158, 1997.
- [72] A. A. Ateya, A. Vybornova, R. Kirichek, and A. Koucheryavy, "Multilevel Cloud based tactile internet system," *2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, 2017.
- [73] A. A. Ateya, A. Muthanna, I. Gudkova, A. Vybornova, and A. Koucheryavy, "Intelligent Core Network for tactile internet system," *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems*, 2017.
- [74] A. S. Shafigh, S. Glisic, and B. Lorenzo, "Dynamic network slicing for flexible radio access in tactile internet," *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017.
- [75] Z. Xiang, F. Gabriel, E. Urbano, G. T. Nguyen, M. Reisslein, and F. H. Fitzek, "Reducing latency in virtual machines: Enabling tactile internet for human-machine co-

working,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 1098–1116, 2019.

[76] H. Beyranvand, M. Levesque, M. Maier, J. A. Salehi, C. Verikoukis, and D. Tipper, “Toward 5G: FiWi enhanced LTE-a hetnets with reliable low-latency fiber backhaul sharing and WIFI offloading,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 25, no. 2, pp. 690–707, 2017.

[77] J. Neaime and A. R. Dhaini, “Resource management in cloud and tactile-capable next-generation Optical Access Networks,” *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, no. 11, p. 902, 2018.

[78] M. S. Elbamby, C. Perfecto, M. Bennis, and K. Doppler, “Toward low-latency and ultra-reliable virtual reality,” *IEEE Network*, vol. 32, no. 2, pp. 78–84, 2018.

[79] Y. Jebbar, F. Belqasmi, R. Glitho, and O. Alfandi, “A fog-based architecture for remote phobia treatment,” *2019 IEEE International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)*, 2019.

[80] C. Grasso and G. Schembra, “Design of a UAV-based Videosurveillance system with tactile internet constraints in a 5G ecosystem,” *2018 4th IEEE Conference on Network Softwarization and Workshops (NetSoft)*, 2018.

[81] P.-V. Mekikis, K. Ramantas, A. Antonopoulos, E. Kartsakli, L. Sanabria-Russo, J. Serra, D. Pubill, and C. Verikoukis, “NFV-enabled experimental platform for 5G tactile internet support in industrial environments,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 3, pp. 1895–1903, 2020.

[82] X. Wei, Q. Duan, and L. Zhou, “A qoe-driven tactile internet architecture for Smart City,” *IEEE Network*, vol. 34, no. 1, pp. 130–136, 2020.

[83] E. Wong, M. Pubudini Imali Dias, and L. Ruan, “Predictive resource allocation for tactile internet capable passive optical lans,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 13, pp. 2629–2641, 2017.

[84] “Semiotics - smart end-to-end massive IOT interoperability, connectivity and security,” *Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)*. [Online].

Available: <https://www.cttc.cat/project/smart-end-to-end-massive-iot-interoperability-connectivity-and-security/>. [Accessed: 15-Sep-2022].

[85] M. K. Afzal, Y. B. Zikria, S. Mumtaz, A. Rayes, A. Al-Dulaimi, and M. Guizani, "Unlocking 5G spectrum potential for intelligent IOT: Opportunities, challenges, and solutions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 10, pp. 92–93, 2018.

[86] Y. Zikria, S. Kim, M. Afzal, H. Wang, and M. Rehmani, "5G mobile services and scenarios: Challenges and solutions," *Sustainability*, vol. 10, no. 10, p. 3626, 2018.

[87] H. Yu, H. Lee, and H. Jeon, "What is 5G? emerging 5G Mobile Services and network requirements," *Sustainability*, vol. 9, no. 10, p. 1848, 2017.

[88] M. Belotti, N. Bozic, G. Pujolle, and S. Secci, "A Vademecum on blockchain technologies: When, which, and how," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3796–3838, 2019.

[89] "Guest editorial 5G tactile internet: An application for Industrial Automation," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 2992–2994, 2019.

[90] N. Abbas, Y. Zhang, A. Taherkordi, and T. Skeie, "Mobile edge computing: A survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 450–465, 2018.

[91] M. K. Afzal, M. H. Rehmani, Y. B. Zikria, and Q. Ni, "Data-driven intelligence in wireless networks: Issues, challenges, and solution," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 30, no. 8, 2019.

[92] Y. B. Zikria, H. Yu, M. K. Afzal, M. H. Rehmani, and O. Hahm, "Internet of things (IOT): Operating system, applications and protocols design, and Validation Techniques," *Future Generation Computer Systems*, vol. 88, pp. 699–706, 2018.

[93] Y. B. Zikria, S. W. Kim, O. Hahm, M. K. Afzal, and M. Y. Aalsalem, "Internet of things (IOT) operating systems management: Opportunities, challenges, and solution," *Sensors*, vol. 19, no. 8, p. 1793, 2019.



- [94] H. Yu, M. K. Afzal, Y. B. Zikria, A. Rachedi, and F. H. P. Fitzek, "Tactile internet: Technologies, test platforms, trials, and applications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 106, pp. 685–688, 2020.
- [95] K. Matsui, "An information provision system to promote energy conservation and maintain indoor comfort in smart homes using sensed data by IOT sensors," *Future Generation Computer Systems*, vol. 82, pp. 388–394, 2018.
- [96] N. Nesa, T. Ghosh, and I. Banerjee, "Non-parametric sequence-based learning approach for outlier detection in IOT," *Future Generation Computer Systems*, vol. 82, pp. 412–421, 2018.
- [97] J. Arshad, M. A. Azad, K. Salah, R. Iqbal, M. I. Tariq, and T. Umer, "Performance analysis of content discovery for ad-hoc tactile networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 94, pp. 726–739, 2019.
- [98] L. Feng, A. Ali, H. B. Liaqat, M. A. Iftikhar, A. K. Bashir, and S. Pack, "Stochastic game-based dynamic information delivery system for Wireless Cooperative Networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 95, pp. 277–291, 2019.
- [99] J. Guo, B. Song, Y. Chi, L. Jayasinghe, C. Yuen, Y. L. Guan, X. Du, and M. Guizani, "Deep neural network-aided gaussian message passing detection for ultra-reliable low-latency communications," *Future Generation Computer Systems*, vol. 95, pp. 629–638, 2019.
- [100] F. Al-Turjman and M. Abujubbeh, "IoT-enabled Smart Grid via SM: An overview," *Future Generation Computer Systems*, vol. 96, pp. 579–590, 2019.
- [101] X. Xu, Y. Xue, L. Qi, Y. Yuan, X. Zhang, T. Umer, and S. Wan, "An edge computing-enabled computation offloading method with privacy preservation for internet of connected vehicles," *Future Generation Computer Systems*, vol. 96, pp. 89–100, 2019.
- [102] Y. Su, X. Lu, L. Huang, X. Du, and M. Guizani, "Tac-U: A traffic balancing scheme over licensed and unlicensed bands for tactile internet," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 41–49, 2019.

- [103] W. Z. Khan, E. Ahmed, S. Hakak, I. Yaqoob, and A. Ahmed, "Edge computing: A survey," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 219–235, 2019.
- [104] H. B. Liaqat, A. Ali, J. Qadir, A. K. Bashir, M. Bilal, and F. Majeed, "Socially-aware congestion control in ad-hoc networks: Current status and the way forward," *Future Generation Computer Systems*, vol. 97, pp. 634–660, 2019.
- [105] S. Dawaliby, A. Bradai, and Y. Pousset, "Adaptive Dynamic Network slicing in Lora Networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 98, pp. 697–707, 2019.
- [106] H. Yu and T. Kim, "Optimization of uplink rate and fronthaul compression in Cloud Radio Access Networks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 102, pp. 465–471, 2020.
- [107] M. F. Zhani and H. ElBakoury, "Flexngia: A flexible internet architecture for the next-generation tactile internet," *Journal of Network and Systems Management*, vol. 28, no. 4, pp. 751–795, 2020.
- [108] P. Bosshart, D. Daly, G. Gibb, M. Izzard, N. McKeown, J. Rexford, C. Schlesinger, D. Talayco, A. Vahdat, G. Varghese, and D. Walker, "P4," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 44, no. 3, pp. 87–95, 2014.
- [109] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, 2008.
- [110] L. Ginsberg, B. Decraene, S. Litkowski, and R. Shakir, "Segment routing architecture," 2018.
- [111] M. Obrist, C. Velasco, C. T. Vi, N. Ranasinghe, A. Israr, A. D. Cheok, C. Spence, and P. Gopalakrishnakone, "Touch, taste, & smell user interfaces," *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2016.
- [112] G. Fettweis and S. Alamouti, "5G: Personal mobile internet beyond what cellular did to telephony," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 140–145, 2014.

- [113] M. T. Vega, T. Mehmlı, J. van der Hooft, T. Wauters, and F. D. Turck, “Enabling Virtual Reality for the Tactile Internet: Hurdles and Opportunities,” *IEEE/IFIP/ACM International Workshop on High-Precision Networks Operations and Control (HiPNet)*, 2018.
- [114] “Establish 99.99% availability for dedicated interconnect | google cloud,” *Google*. [Online]. Available: <https://cloud.google.com/network-connectivity/docs/interconnect/tutorials/dedicated-creating-9999-availability>. [Accessed: 15-Oct-2022].
- [115] M. F. Bari, R. Boutaba, R. Esteves, L. Z. Granville, M. Podlesny, M. G. Rabbani, Q. Zhang, and M. F. Zhani, “Data Center Network Virtualization: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 2, pp. 909–928, 2013.
- [116] Y. Elkhatib, B. Porter, H. B. Ribeiro, M. F. Zhani, J. Qadir, and E. Riviere, “On using micro-clouds to deliver the fog,” *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 2, pp. 8–15, 2017.
- [117] R. Olaniyan, O. Fadahunsi, M. Maheswaran, and M. F. Zhani, “Opportunistic edge computing: Concepts, opportunities and research challenges,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 89, pp. 633–645, 2018.