

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Μελέτη της Προτυποποίησης για 6G Ρομποτικές
Υπηρεσίες»



Του φοιτητή
Μπαγιώτα Γέωργιου
Αρ. Μητρώου: 19/2024

Επιβλέπων
Ονοματεπώνυμο
Περικλής Χατζημίσιος
Βαθμίδα Διδάκτωρ

Ημερομηνία 14/06/2026

Τίτλος Δ.Ε. Μελέτη της Προτυποποίησης για 6G Ρομποτικές Υπηρεσίες

Κωδικός Δ.Ε. 23253

Ονοματεπώνυμο φοιτητή Γεώργιος Μπαγιώτας

Ονοματεπώνυμο εισηγητή Περικλής Χατζημίσσιος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 30/08/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε. 14/06/2026

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Μπαγιώτα Γεώργιου που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

«Αφιέρωση»

Στην οικογένεια μου που με στήριξε και με στηρίζει στην πορεία μου

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος. Το κίνητρο για την επιλογή του συγκεκριμένου αντικειμένου πηγάζει από τη διαρκή μου επιθυμία για εμβάθυνση στις τεχνολογίες αιχμής, αλλά κυρίως από τη δεκαετή επαγγελματική μου πορεία και ενασχόληση στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών.

Έχοντας ζήσει εκ των έσω τη μετάβαση και την ωρίμανση των δικτύων τέταρτης και πέμπτης γενιάς (4G/5G) , η σύγκλιση των επικοινωνιών Έκτης Γενιάς (6G) με τη συνεργατική ρομποτική αποτέλεσε για μένα μια φυσική αλλά και εξαιρετικά προκλητική εξέλιξη.

Μέσα από τη συστηματική χαρτογράφηση και ανάλυση του διεπιστημονικού τοπίου της προτυποποίησης, η εργασία αυτή επιχειρεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ των τηλεπικοινωνιακών προδιαγραφών και των αυστηρών λειτουργικών απαιτήσεων της ρομποτικής. Το μεγαλύτερο όφελος από αυτή την ερευνητική πορεία ήταν η απόκτηση μιας σφαιρικής και ρεαλιστικής ματιάς στο πώς η παγκόσμια βιομηχανία σχεδιάζει τον ενιαίο ψηφιακό ιστό της επόμενης δεκαετίας.

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η συστηματική μελέτη και χαρτογράφηση του τοπίου προτυποποίησης που διαμορφώνεται κατά τη σύγκλιση της Ρομποτικής και των τηλεπικοινωνιακών δικτύων Έκτης Γενιάς (6G). Σκοπός της εργασίας είναι να αναδείξει πώς οι αυστηρές λειτουργικές απαιτήσεις των αυτόνομων συστημάτων πολλαπλών ρομπότ (MRS) μεταφράζονται σε προδιαγραφές και δείκτες απόδοσης (KPIs) εντός των υπό ανάπτυξη διεθνών προτύπων.

Η μεθοδολογική προσέγγιση βασίστηκε σε εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση τεχνικών αναφορών και Λευκών Βιβλίων (White Papers) από τους κυριότερους Οργανισμούς Ανάπτυξης Προτύπων (SDOs), όπως οι 3GPP, ETSI, IEEE, ITU και ISO. Για την αξιολόγηση της πρακτικής εφαρμογής και την θεωρητική ανάλυση, εξετάστηκε το εξαιρετικά απαιτητικό επιχειρησιακό σενάριο των αποστολών Έρευνας και Διάσωσης (SAR). Στο πλαίσιο αυτό, αναλύθηκαν τρεις κρίσιμοι άξονες: ο εντοπισμός θυμάτων κάτω από συντρίμια, ο χρονοπρογραμματισμός ζεύξεων επικοινωνίας για τον σχεδιασμό κίνησης σμηνών και η ασφαλής φυσική αλληλεπίδραση (HRI) ανθρώπου-ρομπότ.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αναδεικνύουν τον διακριτό και συμπληρωματικό ρόλο των οργανισμών, καθώς και τα κυρίαρχα μοτίβα τυποποίησης. Παράλληλα, εντοπίζονται σημαντικά κανονιστικά κενά, όπως η απουσία ενιαίων ευρωπαϊκών προτύπων για την αρχιτεκτονική της απτικής ανατροφοδότησης (Haptic Feedback). Συμπερασματικά, η εργασία αποδεικνύει ότι η πλήρης αυτονομία των ρομπότ εξαρτάται από ένα κοινό κανονιστικό πλαίσιο, όπου τεχνολογίες-κλειδιά του 6G, όπως η Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC), η τρισδιάστατη κάλυψη SAGIN, η επικοινωνία ρομπότ-ρομπότ(R2R) και ο Υπολογισμός στο Άκρο (MEC), συνδυάζονται για να λειτουργήσουν ως ένα ενιαίο, αξιόπιστο και ασφαλές "νευρικό σύστημα".

«A Study on Standardisation for 6G Robotic Services»

«Georgios Bagiotas»

Abstract

The subject of this thesis is the systematic study and mapping of the standardisation landscape emerging at the convergence of Robotics and Sixth Generation (6G) telecommunication networks within the context of the communications. The objective of this work is to highlight how the stringent operational requirements of autonomous multi-robot systems (MRS) are translated into specifications and Key Performance Indicators (KPIs) within under-development international standards.

The methodological approach relied on an extensive literature review and analysis of technical reports and White Papers from major Standards Development Organizations (SDOs), such as 3GPP, ETSI, IEEE, ITU, and ISO. To evaluate practical implementation and theoretical analysis, the highly demanding operational scenario of Search and Rescue (SAR) missions was examined. Within this framework, three critical axes were analyzed: casualty detection under debris, link scheduling for communication-aware motion planning of swarms, and safe human-robot physical interaction (HRI). The results of the thesis underscore the distinct and complementary roles of SDOs, as well as the dominant standardisation patterns. Concurrently, significant regulatory gaps are identified, such as the total absence of unified European standards regarding haptic feedback architecture. In conclusion, this work demonstrates that full robotic autonomy depends on a common regulatory framework, where key 6G technologies—including Integrated Sensing and Communication (ISAC), SAGIN 3D coverage, Sidelink (R2R) communication, and Mobile Edge Computing (MEC)—merge to function as a unified, reliable, and secure "nervous system".

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίησή της.

Ιδιαίτερα, ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει στην οικογένειά μου, για την αμέριστη συμπαράσταση, την κατανόηση και την υπομονή που επέδειξαν, στηρίζοντας την προσπάθειά μου να ισορροπήσω ανάμεσα στις απαιτήσεις της επαγγελματικής μου πορείας και των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επίσης, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Περικλή Χατζημίσιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου αυτό το εξαιρετικά ενδιαφέρον και επίκαιρο αντικείμενο και για την πολύτιμη επιστημονική του καθοδήγηση.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	v
Περίληψη.....	vi
Abstract	vii
Ευχαριστίες	viii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Εικόνων	xii
Κατάλογος Πινάκων.....	xiii
Συντομογραφίες.....	xiv
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή	1
1.1 Γενικό Τεχνολογικό Πλαίσιο: Η Εποχή της Διασυνδεδεμένης Νοημοσύνης	1
1.2 Το Διαδίκτυο των Ρομποτικών Πραγμάτων.....	2
1.3 Αντικείμενο, Σκοπός και Κίνητρο της Διπλωματικής Εργασίας	3
1.4 Συνεισφορά της Εργασίας	3
1.5 Διάρθρωση της Εργασίας.....	4
Κεφάλαιο 2ο: Ρομποτική	5
2.1 Εισαγωγή στη Σύγχρονη Ρομποτική και την Αυτονομία	5
2.2 Συστήματα πολλαπλών ρομπότ (MRS) και Ρομποτική σμήνους (Swarm Robotics).....	5
2.3 Αρχιτεκτονικές Διαμοιρασμού: Ρομποτική νέφους και επεξεργασίας στο άκρο (Cloud Robotics και Edge Robotics).....	7
2.4 Λειτουργικά Συστήματα Ρομπότ και Πλαίσια Ελέγχου: Από το λειτουργικό σύστημα ROS στο ROS2	8
2.5 Κατανεμημένος Έλεγχος, Βελτιστοποίηση και Φυσική Αλληλεπίδραση.....	9
2.6 Κατανομή Εργασιών (Task Allocation) σε Περιορισμένα Περιβάλλοντα.....	11
2.7 Συμπεράσματα και το Τοπίο Προτυποποίησης (Standardisation Landscape)	12
Κεφάλαιο 3ο: 5G/6G Τεχνολογία	13
3.1 Η Εξέλιξη προς την Κινητή Νοημοσύνη.....	13
3.2 Θεμελιώδεις Τεχνολογίες του 5G και οι Περιορισμοί τους	13
3.3 Απαιτήσεις και Δείκτες Απόδοσης (KPIs) του 6G.....	14
3.3.1 Επικοινωνίες Terahertz (THz) και Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες (OWC).....	14
3.3.2 Υπερ-Μαζικό MIMO (umMIMO) και Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS). 15	
3.3.3 Νέες Κυματομορφές, Διαμόρφωση και NOMA.....	15
3.4 Αρχιτεκτονική Τρισδιάστατης Κάλυψης: Δίκτυα SAGIN.....	16

3.5	Η Κρισιμότητα της Προτυποποίησης (Standardisation) στο 5G και 6G και Συμπεράσματα	17
Κεφάλαιο 4ο: Search And Rescue		19
4.1	Εισαγωγή: Η Κρισιμότητα των Επιχειρήσεων SAR	19
4.2	Ετερογενείς Πλατφόρμες και Περιβάλλοντα Λειτουργίας	19
4.3	Αρχιτεκτονική Πέντε Επιπέδων στα Συστήματα SAR	20
4.4	Προηγμένος Εντοπισμός και Αντίληψη Θυμάτων	21
4.5	Η Πρόκληση της Εξαγωγής Θυμάτων (Casualty Extraction)	22
4.6	Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ και ο ρόλος της Προτυποποίησης (Standardisation)	23
Κεφάλαιο 5ο: Πρότυπα Ρομποτικής		24
5.1	Τοπίο προτυποποίησης	24
5.2	Κατηγοριοποίηση προτύπων	31
5.2.1	Τεχνολογία ISAC	31
5.2.2	Τεχνολογίες Επικοινωνίας	35
5.2.3	Τεχνολογίες Δικτύου	39
5.2.4	Τεχνολογία Υπολογισμού στο Άκρο (Edge computing)	42
5.2.5	Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ, Μετάδοση Εικόνας, Κινητικότητα και Απτικό Feedback	45
5.3	Αντιστοίχιση προτύπων	49
5.3.1	Ο Διακριτός και Συμπληρωματικός Ρόλος των Οργανισμών	49
5.3.2	Μοτίβα Προτυποποίησης	50
5.3.3	Εντοπισμός Κενών και Ασυμμετριών	51
5.4	Σύνοψη	51
Κεφάλαιο 6ο: Περιπτώσεις Χρήσης		53
6.1	Εισαγωγή	53
6.2	Χρήση του 6G για εντοπισμό ανθρώπινων θυμάτων	54
6.2.1	Περιγραφή της Περίπτωσης Χρήσης	54
6.2.2	Προϋποθέσεις Λειτουργίας και Αρχιτεκτονική	55
6.2.3	Αναλυτική Ροή Υπηρεσιών (Service Flows)	55
6.2.4	Τεχνολογικοί Πυλώνες: ISAC, Sensor Fusion και AI/ML	58
6.2.5	Παράμετροι Επικοινωνίας και Αντίληψης (Communication parameters)	59
6.2.6	Ηθικές Διαστάσεις, Ιδιωτικότητα και Κοινωνικός Αντίκτυπος	60
6.2.7	Περαιτέρω Μελέτη: Αναγνώριση Βιολογικών Χαρακτηριστικών	60
6.3	Χρονοπρογραμματισμός ζεύξεων για τον σχεδιασμό κίνησης σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης	60
6.3.1	Εισαγωγή: Το Όραμα για τα Σμήνη Διάσωσης	60

6.3.2	Ταξινόμηση Κινήσεων (Motion Components) βάσει του one6G.....	61
6.3.3	Τύποι Συνδέσμων (Link Types) στο 6G.....	63
6.3.4	Εξοικονόμηση Πόρων (Resource Conservation).....	64
6.3.5	Η Αρχιτεκτονική του Task Handler και ο Υπολογισμός στο Άκρο (Edge)	65
6.4	Φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ συνεργατικών ρομπότ	66
6.4.1	Εισαγωγή: Από την Ανεξάρτητη Πλοήγηση στη Συνεργατική Επαφή.....	66
6.4.2	Αρχιτεκτονική και Ροή Εργασιών στη Συνεργατική Μεταφορά (R2R Physical Interaction) 67	
6.4.3	Προσύλληψη (Pre-Grasp) και Αντίληψη Εγγύτητας (Proximity Perception)	68
6.4.4	Η Συμβίωση Ανθρώπου-Ρομπότ: Το Μοντέλο "Dual User Shared Task" (DUST)	70
6.4.5	Πολυτροπική Επικοινωνία, Τηλεχειρισμός και Απτικό Διαδίκτυο	71
6.4.6	Ασφάλεια, Δυναμικές Ζώνες και Κανονιστική Συμμόρφωση.....	72
6.4.7	Συμπεράσματα.....	73
Κεφάλαιο 7ο:	Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα.....	74
7.1	Γενικά Συμπεράσματα.....	74
7.2	Ανοιχτές Προκλήσεις.....	74
7.3	Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας	75
7.3.1	Εξέλιξη Αρχιτεκτονικών SAGIN και Μη-Επίγειων Δικτύων (NTN)	75
7.3.2	Ψηφιακά Δίδυμα Δικτύου (Network Digital Twins - NDTs)	75
7.3.3	Πράσινα Δίκτυα και Ενεργειακή Αειφορία	75
7.3.4	Συνεχής Προσπάθεια Προτυποποίησης.....	75
7.4	Επίλογος.....	76
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		77

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1 Η εξέλιξη από το 1G ως το 6G [3]	1
Εικόνα 1-2 Η δομή του 6G συμπεριλαμβάνει IoT, MRS & edge computing [3]	2
Εικόνα 2-1 Ρομπότ σμήνους: A) Jasmine, B) Alice, C) Kilobots, D) E-pucks E,F) Swarmanoid [8]	6
Εικόνα 2-2 Το πλαίσιο συμπεριφοράς ρομπότ σε περιβάλλον SAR [11]	7
Εικόνα 2-3 Χρήση ROS σε SAR εφαρμογή [11]	8
Εικόνα 2-4 Βελτιστοποίηση θέσης με κατανομή της πληροφορίας. Αριστερά: λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες από ένα ρομπότ. Δεξιά: λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες από πολλαπλά ρομπότ [13].	10
Εικόνα 2-5 Σχέδιο μεταφοράς αντικειμένου από τέσσερα ρομπότ με έναν βαθμό ελευθερίας [14]	10
Εικόνα 2-6 Σενάριο ανάθεσης εργασιών σε πολλαπλά ρομπότ [15]	11
Εικόνα 3-1 End to end επικοινωνία με χρήση CUPS [3]	14
Εικόνα 3-2 Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες [18]	15
Εικόνα 3-3 Δίκτυο SAGIN [19]	17
Εικόνα 4-1 UAVs σε διάταξη α) Κεντρική διάταξη και β) Κατανεμημένη διάταξη [22]	19
Εικόνα 4-2 UGVs που εμπλέκονται σε SAR εφαρμογές [23]	20
Εικόνα 4-3 Ανίχνευση αντικειμένων με αρχιτεκτονική EfficientDET [26]	21
Εικόνα 4-4 Ρομπότ ιμάντα για την μεταφορά θύματος [20]	22
Εικόνα 5-1 Οργανισμοί Προτυποποίησης	24
Εικόνα 5-2 Πορεία προτυποποίησης 3GPP [29]	25
Εικόνα 5-3 Προτυποποίηση ETSI & 3GPP για προηγμένες λειτουργίες [36]	26
Εικόνα 5-4 Το πλαίσιο της ITU για το IMT-2030 [38]	27
Εικόνα 5-5 Καταμερισμός εργασίας IEEE σε τομείς [42]	30
Εικόνα 5-6 Επισκόπηση των δικτύων 6G με δυνατότητα ISAC [44]	31
Εικόνα 5-7 Αρχιτεκτονική Monostatic / Bistatic / Multistatic [45]	32
Εικόνα 5-8 Ανίχνευση ISAC [44]	33
Εικόνα 5-9 Ζεύξη ανόδου(uplink) και ζεύξη καθόδου(downlink) [54]	36
Εικόνα 5-10 Τρόποι sidelink επικοινωνίας [55]	37
Εικόνα 5-11 Επικοινωνία Sidelink [56]	37
Εικόνα 5-12 Επισκόπηση δικτυακών τεχνολογιών για 6G ρομποτικές εφαρμογές [62]	40
Εικόνα 5-13 TSN τεχνολογία [64]	41
Εικόνα 5-14 Η δομή του edge computing [69]	43
Εικόνα 5-15 Το Edge Computing και η χρησιμότητα του στις επικοινωνίες [68]	44
Εικόνα 5-16 Σχεδιάγραμμα κινητικότητας – επικοινωνίας HRI [77]	47
Εικόνα 6-1 Αναγνώριση θυμάτων σε περιβάλλον καταστροφής [2]	54
Εικόνα 6-2 Χαρτογράφηση με χρήση UAV [86]	56
Εικόνα 6-3 ISAC σε περιβάλλον δικτύου [84]	56
Εικόνα 6-4 Αναγνώριση αντικειμένων – θυμάτων [87]	57
Εικόνα 6-5 Χάρτης αναγνώρισης προβληματικών υποδομών και αντικειμένων – θυμάτων [88]	58
Εικόνα 6-6 Ενδεικτικό σενάριο πλοήγησης ρομπότ [2]	61
Εικόνα 6-7 Ενδεικτική ρομποτική πλατφόρμα για λεπτό χειρισμό αντικειμένων [89]	62
Εικόνα 6-8 Προγραμματισμός ζεύξεων [2]	64
Εικόνα 6-9 Υπολογισμός στο άκρο [18]	65
Εικόνα 6-10 Συνεργατικά ρομπότ [2]	68

Εικόνα 6-11 Οι φάσεις αναγνώρισης αντικειμένου: (1) Αναγνώριση μέσω όρασης (2) Αναγνώριση μέσω των αισθητήρων (3) Αναγνώριση μέσω επαφής με το αντικείμενο [91].....	69
Εικόνα 6-12 Συνεργατική μεταφορά φορτίου/φορείου μεταξύ ανθρώπου και ρομποτικού συστήματος [12]	70
Εικόνα 6-13 Βασικές λειτουργίες αντίληψης μικρο-μεταβολών [93].....	71
Εικόνα 6-14 Εικονικές ζώνες Αλληλεπίδρασης [12]	72

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 5-1: Αντιστοίχιση προτύπων SDO - ISAC	35
Πίνακας 5-2 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – Τεχνολογίες Επικοινωνίας.....	38
Πίνακας 5-3 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – Networking Τεχνολογιών	42
Πίνακας 5-4 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – Edge Τεχνολογιών.....	45
Πίνακας 5-5 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – HRI.....	48
Πίνακας 5-6 Αντιστοίχιση απαιτήσεων - πρότυπων	49
Πίνακας 6-1 Αντιστοίχιση προτύπων - σενάριου χρήσης	59
Πίνακας 6-2 Παράμετροι επικοινωνίας.....	61
Πίνακας 6-3 Αντιστοίχιση προτύπων – σενάριου χρήσης	66
Πίνακας 6-4 Αντιστοίχιση προτύπων – σενάριου χρήσης	73

Σύντομογραφίες

eMBB	Enhanced Mobile Broadband
AI	Artificial Intelligence – Τεχνητή Νοημοσύνη
5G	Fifth Generation of mobile communication technologies
6G	Sixth Generation of mobile communication technologies
IORT	Internet Of Robotic Things
COBOT	Cooperation Robot
SDOs	Standards Development Organizations
mMTC	Massive Machine Type Communication
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications
ISAC	Integrated Sensing and Communication
AMR	Autonomous Mobile Robots
IoT	Internet of Things
RAS	Robotic Autonomous Systems
SAR	Search And Rescue
HRLLC	Hyper-Reliable Low-Latency Communications
KPIs	Key Performance Indicators
MRS	Multi-Robot Systems
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UGV	Unmanned Ground Vehicle
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
M2M	Machine-to-Machine
PSO	Particle Swarm Optimization
MEC	Multi-access Edge Computing
ROS	Robot Operating System
DDS	Data Distribution Service
OMG	Object Management Group
RTOS	Real Time Operating System
DGD	Distributed Gradient Descent
ADMM	Alternating Direction Method of Multipliers
NMPC	Nonlinear Model Predictive Control
MRTA	Multi-Robot Task Allocation

DRL	Deep Reinforcement Learning
HGAT	Heterogeneous Graph Attention Networks
CoLoSSI	Connectivity-aware Localized Swarm Scheduling and Interaction
MIMO	Multiple Inputs Multiple Outputs
CUPS	Control Plane and User Plane Separation
OWC	Optical Wireless Communications
RIS	Reconfigurable Intelligent Surfaces
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OTFS	Orthogonal Time Frequency Space
ISLs	Inter-Satellite Links
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
SAGIN	Space-Air-Ground Integrated Networks
GEO	Geostationary Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
LEO	Low Earth Orbit
HAPs	High Altitude Platforms
LAPs	Low Altitude Platforms
ABS	Aerial Base Stations
MANETs	Mesh Ad-hoc Networks
NSD	Neck Securing Devices
3GPP	3rd Generation Partnership Project
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
RAN	Radio Access Network
QoS	Quality Of Service
ITU	International Telecommunication Union
ISO	International Organization for Standardisation
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ADRA	Artificial Intelligence Data and Robotics Association
IFR	International Federation of Robotics
RAN	Radio Access Network
V2X	Vehicle To Everything
HRI	Human Robot Interaction
PFL	Power and Force Limiting

TSN	Time Sensitive Network
COPAAN	Common Operational Principles for Autonomic/Autonomous Networks
RF	Radio Frequency
TOF	Time Of Flight
AOA	Angle Of Arrival
UE	User Equipment
API	Application Programming Interface
SLPP	Sidelink Protection Protocol
R2R	Robot To Robot
MAC	Media Access Control
IP	Internet Protocol
SNR	Single-to-Noise Ratio
TS	Technical Specification
TR	Technical Report
PHY	Physical Layer
HEVC	High Efficiency Video Coding
VQA	Video Quality Assessment
ZSM	Zero-touch network and Service Management
UHR	Ultra High Reliability
WI-FI	Wireless Fidelity
IT	Information Technology
SSM	Speed and Separation Monitoring
GOSPA	Generalized Optimal Sub-Pattern Assignment
RTT	Round Trip Time
NLoS	Non-Line-of-Sight
NR	New Radio
DRUs	Distributed Resource Units
NPCA	Non-Primary Channel Access
SWaP	Size, Weight and Power
LiDAR	Light Detection and Ranging
SOBOT	Service Robots with Ambient Intelligence
RaaS	Robotics-as-a-Service

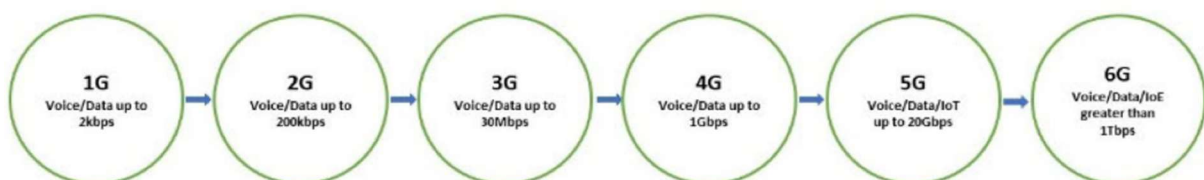
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

1.1 Γενικό Τεχνολογικό Πλαίσιο: Η Εποχή της Διασυνδεδεμένης Νοημοσύνης

Βρισκόμαστε στο κατώφλι μιας ριζικής τεχνολογικής μεταμόρφωσης, η οποία χαρακτηρίζεται από τη σύγκλιση του φυσικού, του ψηφιακού και του βιολογικού κόσμου. Ιστορικά, η εξέλιξη των ασύρματων τηλεπικοινωνιακών δικτύων αποτέλεσε τον κύριο καταλύτη για τον μετασχηματισμό των ανθρώπινων αλληλεπιδράσεων και της βιομηχανικής παραγωγής. Ξεκινώντας από την πρώτη γενιά (1G) που εισήγαγε την αναλογική φωνή, μέχρι την τέταρτη γενιά (4G) (Εικόνα 1-1) που κατέστησε το κινητό διαδίκτυο παγκόσμιο πρότυπο, ο πρωταρχικός στόχος ήταν η διασύνδεση των ανθρώπων. Η έλευση του 5G σηματοδότησε μια κομβική αλλαγή παραδείγματος, στρέφοντας την προσοχή από τον άνθρωπο στις μηχανές, μέσω της εισαγωγής σεναρίων χρήσης όπως η Ενισχυμένη Κινητή Ευρυζωνικότητα (Enhanced Mobile Broadband - eMBB), οι Μαζικές Επικοινωνίες Μηχανής προς Μηχανή (Massive Machine Type Communication - mMTC) και οι Υπερ-αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστερήσης (Ultra-Reliable Low-Latency Communications - URLLC) [1].

Παρά τα τεράστια άλματα, το 5G αντιμετωπίζει ήδη περιορισμούς στην κάλυψη των αναγκών των αναδυόμενων, υπερ-απαιτητικών εφαρμογών. Υπηρεσίες όπως η ολογραφική τηλεπαρουσία, ο ακαριαίος έλεγχος αυτόνομων ρομποτικών σιμίων και η δημιουργία ψηφιακών διδύμων (Digital Twins) σε πραγματικό χρόνο, απαιτούν ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων της τάξης του 1 Terabit ανά δευτερόλεπτο, καθυστερήσεις μικρότερες του 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου, και αξιοπιστία που αγγίζει το 99.99999%. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών, η ακαδημαϊκή κοινότητα και η βιομηχανία προετοιμάζουν ήδη το έδαφος για τα δίκτυα Έκτης Γενιάς (6G), τα οποία αναμένεται να αναπτυχθούν εμπορικά γύρω στο 2030 [1].

Το 6G δεν αποτελεί απλώς μια γραμμική βελτίωση του 5G. Σύμφωνα με το όραμα της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union - ITU) και πρωτοβουλιών όπως το ευρωπαϊκό έργο Hexa-X (συμβολική γραφή από το ελληνικό "έξι" και το "X" από την συντομογραφία του Xplore), και η ένωση one6G, το 6G θα μετεξελιχθεί σε ένα "Έξυπνο Δίκτυο των Πάντων". Βασικοί πυλώνες του αποτελούν η εγγενής Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI), η οποία θα διαπερνά ολόκληρη την αρχιτεκτονική του δικτύου, και η Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (Integrated Sensing and Communication - ISAC), μετατρέποντας το ραδιοδίκτυο όχι μόνο σε αγωγό μεταφοράς πληροφοριών, αλλά και σε έναν παγκόσμιο, πανταχού παρόντα αισθητήρα [2].

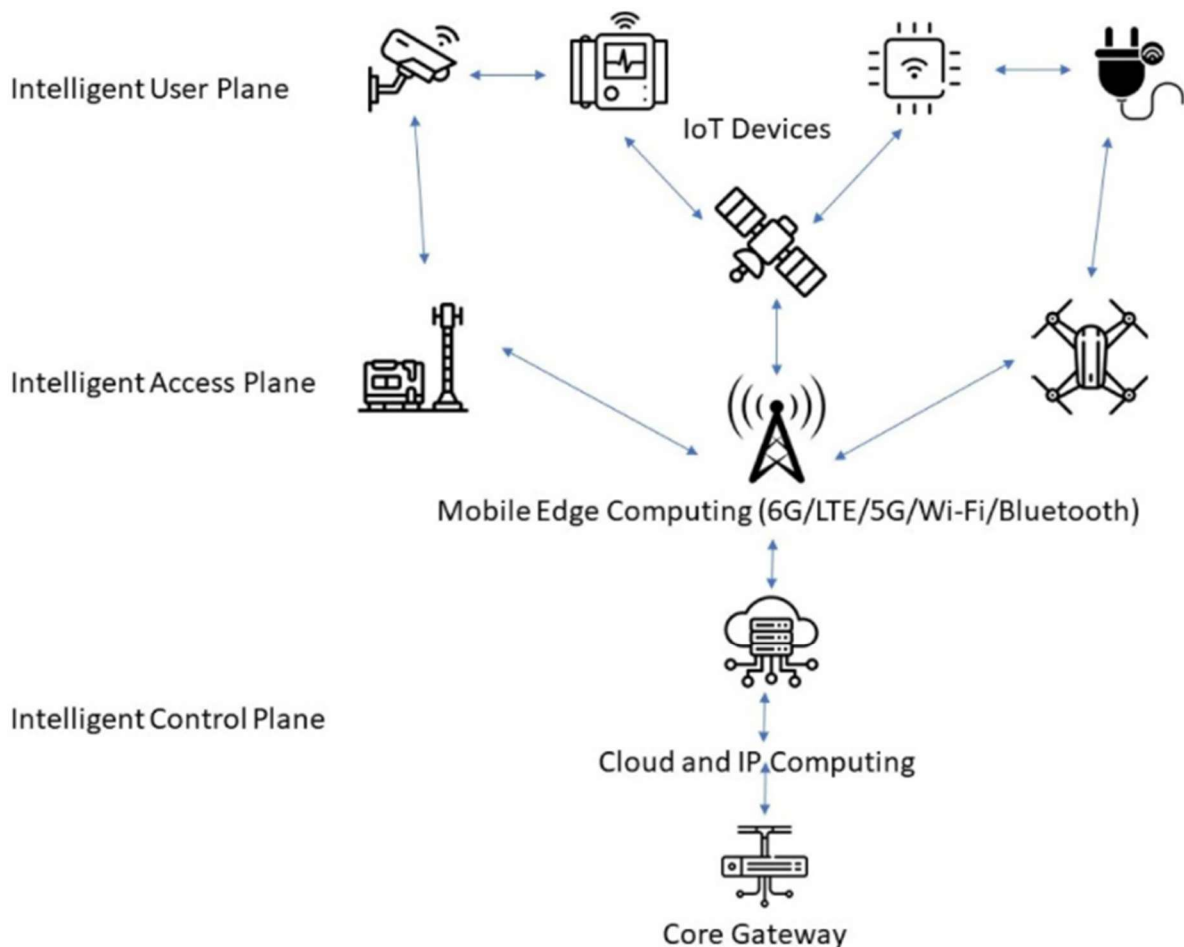


Εικόνα 1-1 Η εξέλιξη από το 1G ως το 6G [3]

1.2 Το Διαδίκτυο των Ρομποτικών Πραγμάτων

Μέσα σε αυτό το ταχύτατα εξελισσόμενο τηλεπικοινωνιακό τοπίο, ο τομέας της Ρομποτικής βιώνει τη δική του επανάσταση. Παραδοσιακά, τα ρομπότ λειτουργούσαν ως απομονωμένες (stand-alone) μηχανές, περιορισμένες σε αυστηρά δομημένα βιομηχανικά περιβάλλοντα και συχνά κλεισμένα μέσα σε κλουβιά ασφαλείας, εκτελώντας επαναλαμβανόμενες εργασίες. Η πρόοδος στην τεχνητή νοημοσύνη, την επιστήμη των υλικών και κυρίως τη δικτύωση, οδήγησε στην εμφάνιση των Συνεργατικών Ρομπότ (Cooperation Robot – CoBot) και των Αυτόνομων Κινητών Ρομπότ (Autonomous Mobile Robots - AMRs), τα οποία αλληλεπιδρούν ελεύθερα με τον άνθρωπο και τον χώρο γύρω τους.

Η σύγκλιση της Ρομποτικής με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) έχει γεννήσει μια νέα επιστημονική περιοχή: το Διαδίκτυο των Ρομποτικών Πραγμάτων (Internet of Robotic Things - IoRT). Στο πλαίσιο αυτό (IoRT), τα ρομπότ δεν αποτελούν απλώς εκτελεστικά όργανα, αλλά ευφυείς κόμβους ενός ευρύτερου δικτύου. Μπορούν να αντλούν δεδομένα από καταναμημένους αισθητήρες στο περιβάλλον, να αναθέτουν πολύπλοκους αλγόριθμους (όπως ο σχεδιασμός διαδρομής και η αναγνώριση αντικειμένων) σε υποδομές νέφους (Cloud) και Υπολογισμό στο Άκρο (Edge Computing), και να συντονίζονται με άλλες μηχανές για την επίλυση προβλημάτων που υπερβαίνουν τις δυνατότητες ενός μεμονωμένου πράκτορα (Εικόνα 1-2). Ωστόσο, η πραγματική αυτονομία αυτών των πολυπράκτορων συστημάτων απαιτεί αδιάλειπτη, υψηλού εύρους ζώνης και υπερ-χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία, καθιστώντας την εξάρτησή τους από τα δίκτυα 5G και 6G απολύτως απαραίτητη [4].



Εικόνα 1-2 Η δομή του 6G συμπεριλαμβάνει IoT, MRS & edge computing [3]

1.3 Αντικείμενο, Σκοπός και Κίνητρο της Διπλωματικής Εργασίας

Το βασικό κίνητρο πίσω από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εις βάθος μελέτη του τοπίου προτυποποίησης (Standardisation Landscape) κατά τη σύγκλιση της Ρομποτικής με τα δίκτυα 6G. Καθώς τα ρομποτικά συστήματα εξελίσσονται από τηλεχειριζόμενες μονάδες σε πλήρως διασυνδεδεμένα, συνεργατικά σμήνη που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος και την τεχνητή νοημοσύνη, η ανάγκη για κοινά τεχνολογικά πρότυπα καθίσταται επιτακτική [5].

Ωστόσο, παρατηρείται ένα σημαντικό χάσμα στη διεπιστημονική προτυποποίηση. Οι Οργανισμοί Ανάπτυξης Προτύπων (Standards Developing Organisations - SDOs) λειτουργούν συχνά απομονωμένα: οργανισμοί όπως η 3GPP, το ETSI και η ITU εστιάζουν κυρίως στις τηλεπικοινωνίες, ενώ οργανισμοί όπως ο ISO και το IEEE, επικεντρώνονται στα Συστήματα Ρομποτικής και Αυτοματισμού (Robotic Autonomous Systems - RAS). Η επιτυχής ανάπτυξη του 6G απαιτεί τον συν-σχεδιασμό και την εναρμόνιση αυτών των προτύπων, ώστε καινοτομίες όπως η Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC) ή ο Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing) να ενσωματωθούν επίσημα και με ασφάλεια στις ρομποτικές λειτουργίες [5].

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως κύριο σκοπό τη συστηματική χαρτογράφηση και ανάλυση αυτών των προτύπων, εξετάζοντας πώς οι αυστηρές ρομποτικές απαιτήσεις εισέρχονται στις προδιαγραφές του 6G (όπως για παράδειγμα στο πρότυπο IEEE P1955 "Standard for 6G Empowering Robotics" ή στις τεχνικές αναφορές 3GPP TR 22.837 και 22.104).

Για να γίνει κατανοητή η πρακτική εφαρμογή αυτής της προτυποποίησης, η εργασία χρησιμοποιεί ως βασικό παράδειγμα (use case) τις επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (Search And Rescue - SAR). Οι επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (SAR) αποτελούν το απόλυτο, πιο απαιτητικό πεδίο αξιολόγησης των προτύπων, καθώς συγκεντρώνει ακραίες προδιαγραφές: απαιτεί την ακαριαία μεταφορά δεδομένων (URLLC/Hyper-Reliable Low-Latency Communication – HRLLC) για τον έλεγχο των συνεργατικών ρομπότ, τη χρήση της ISAC (βάσει του ETSI GR ISC 001) για τον εντοπισμό θυμάτων μέσω ραδιοκυμάτων, και την αξιόπιστη λειτουργία σε περιβάλλοντα όπου η υποδομή έχει καταρρεύσει [2].

Ειδικότερα, η εργασία στοχεύει να αναδείξει την προτυποποίηση μεταξύ των βιομηχανιών τηλεπικοινωνιών και ρομποτικής και πιθανά κενά, να αναλύσει πώς οι προδιαγραφές των υπό ανάπτυξη προτύπων μεταφράζονται σε Βασικούς Δείκτες Απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs) για τα συνεργατικά ρομπότ, και να αποδείξει την αναγκαιότητά τους μέσα από την αυστηρή αξιολόγηση των ακραίων επιχειρησιακών σεναρίων SAR.

1.4 Συνεισφορά της Εργασίας

Η επιστημονική συνεισφορά της παρούσας μελέτης έγκειται στην προσέγγιση ενός εξαιρετικά σύγχρονου και διεπιστημονικού θέματος. Ενώ η υπάρχουσα βιβλιογραφία συχνά αντιμετωπίζει τις τηλεπικοινωνίες (ως κλάδο της μηχανικής υπολογιστών και δικτύων) και τη ρομποτική (ως κλάδο της μηχανικής) ως δύο διακριτούς τομείς, η παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρεί να γεφυρώσει αυτό το χάσμα.

Μέσα από μια εκτενή ανασκόπηση της πλέον πρόσφατης βιβλιογραφίας (συμπεριλαμβανομένων Λευκών Βιβλίων (White Papers) από οργανισμούς όπως το one6G, NGMN, 3GPP, IEEE και Hexa-X) η εργασία αναλύει τον τρόπο με τον οποίο προδιαγραφές υλικού, δικτυακά πρωτόκολλα, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης, και απαιτήσεις μηχανικής ελέγχου, συγχωνεύονται σε ένα ενιαίο, διαλειτουργικό σύστημα. Επιπροσθέτως, η ανάλυση του τοπίου προτυποποίησης (Standardisation) προσφέρει μια ρεαλιστική ματιά στο πώς η βιομηχανία σχεδιάζει τα πρότυπα που θα διέπουν τις έξυπνες μηχανές της

επόμενης δεκαετίας, παρέχοντας έτσι ένα πολύτιμο σημείο αναφοράς για μελλοντικούς ερευνητές και μηχανικούς.

1.5 Διάρθρωση της Εργασίας

Για την ομαλή, λογική και εις βάθος παρουσίαση των παραπάνω θεματικών, η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη σε έξι (6) κύρια κεφάλαια και ένα κεφάλαιο με τα συμπεράσματα της εργασίας, η αλληλουχία των οποίων έχει σχεδιαστεί ώστε να καθοδηγεί τον αναγνώστη από τις βασικές αρχές στις πλέον προηγμένες εφαρμογές. Συγκεκριμένα:

- Το Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή), το οποίο αποτελεί το παρόν κείμενο, παρουσιάζει το γενικό τεχνολογικό πλαίσιο, εισάγει το πρόβλημα και τις έννοιες του IoRT και οριοθετεί το πεδίο, τον σκοπό και τη συνεισφορά της έρευνας.
- Το Κεφάλαιο 2 (Ρομποτική) εξετάζει την εξέλιξη από τα αυτόνομα κινητά ρομπότ στα Συστήματα Πολλαπλών Ρομπότ (Multi-Robot Systems - MRS) και στα ρομποτικά σμήνη (Swarms). Αναλύονται οι αρχιτεκτονικές νέφους και υπολογισμού στο άκρο (Cloud και Edge Robotics), τα πρωτόκολλα λειτουργίας, καθώς και οι μηχανισμοί πλοήγησης, αντίληψης και ελέγχου.
- Το Κεφάλαιο 3 (Τηλεπικοινωνίες 5G και 6G) αναλύει το "νευρικό σύστημα" των παραπάνω εφαρμογών. Παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και οι περιορισμοί του 5G, και αναλύεται διεξοδικά το όραμα του 6G (IMT-2030). Εξετάζονται κρίσιμες τεχνολογίες-κλειδιά, όπως οι Υπερ-Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστέρησης (URLLC), η Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC), ο Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing) και η εγγενής ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης στο δίκτυο (AI-native networks).
- Το Κεφάλαιο 4 (Έρευνα και Διάσωση - SAR) συνδυάζει τις γνώσεις των Κεφαλαίων 2 και 3, εφαρμόζοντάς τες στο απαιτητικό πεδίο διαχείρισης καταστροφών. Αναλύονται οι ιδιαιτερότητες των επιχειρήσεων SAR, οι προκλήσεις των ακραίων περιβαλλόντων (harsh environments) και ο τρόπος με τον οποίο ετερογενή σμήνη ρομπότ (Unmanned Aerial Vehicles – UAVs και Unmanned Ground Vehicles – UGVs) μπορούν να εγκαθιδρύσουν δίκτυα ad-hoc, εξασφαλίζοντας την ανθεκτικότητα και τη συνέχιση της σωστικής επιχείρησης.
- Το Κεφάλαιο 5 (Πρότυπα και Τυποποίηση - Standardisation) εξετάζει το κανονιστικό και τεχνικό τοπίο. Αναλύονται οι ρόλοι των μεγαλύτερων Οργανισμών Προτυποποίησης (3GPP, ETSI, IEEE, ITU, ISO) και παρουσιάζεται μια χαρτογράφηση, που συνδέει τις ρομποτικές ανάγκες με τα υφιστάμενα και υπό ανάπτυξη τηλεπικοινωνιακά πρότυπα.
- Τέλος, το Κεφάλαιο 6 (Περιπτώσεις Χρήσης - Use Cases) εστιάζει στην πρακτική εφαρμογή, παρουσιάζοντας αναλυτικά σενάρια επιχειρήσεων. Το κεφάλαιο διερευνά σε βάθος τη χρήση της 6G ISAC για τον εντοπισμό ανθρώπινων θυμάτων, τον χρονοπρογραμματισμό ζεύξεων (link scheduling) για τον σχεδιασμό κίνησης με επίγνωση επικοινωνίας, καθώς και την πολυπλοκότητα της συνεργατικής φυσικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ρομπότ.

Κεφάλαιο 2ο: Ρομποτική

2.1 Εισαγωγή στη Σύγχρονη Ρομποτική και την Αυτονομία

Η επιστήμη της ρομποτικής έχει διανύσει τεράστια απόσταση από την εποχή των πρώτων βιομηχανικών βραχιόνων, οι οποίοι ήταν αυστηρά προγραμματισμένοι να εκτελούν επαναλαμβανόμενες εργασίες, πλήρως απομονωμένοι μέσα σε προστατευτικά κλουβιά (caged environments) για λόγους ασφαλείας. Σήμερα, η έρευνα και η βιομηχανία επικεντρώνονται στα Αυτόνομα Κινητά Ρομπότ (AMRs) και στα Συνεργατικά Ρομπότ (Cobots), τα οποία διαθέτουν την ικανότητα να πλοηγούνται, να αντιλαμβάνονται και να αλληλεπιδρούν με μη-δομημένα, δυναμικά περιβάλλοντα, καθώς και άμεσα με τον άνθρωπο. Η επίτευξη αυτού του επιπέδου αυτονομίας προϋποθέτει την ταυτόχρονη, απρόσκοπτη λειτουργία πολλαπλών υποσυστημάτων, όπως η σύντηξη αισθητήριων (sensor fusion), ο Σχεδιασμός και Έλεγχος Κίνησης (Motion Planning & Control), και ο Ταυτόχρονος Εντοπισμός και Χαρτογράφηση (Simultaneous Localization and Mapping - SLAM) [6].

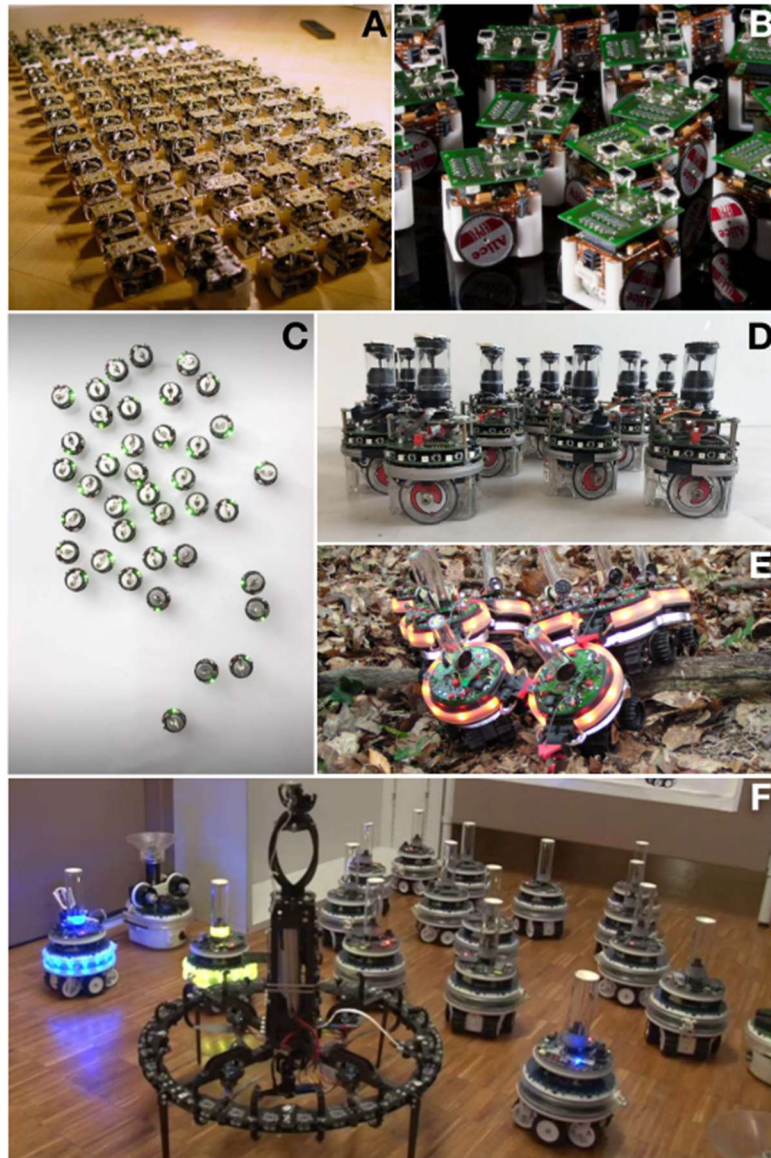
Ωστόσο, η μεγαλύτερη επανάσταση στη σύγχρονη ρομποτική προήλθε μέσω της σύγκλισής της με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Η σύγκλιση αυτή δημιούργησε το νέο, ραγδαία αναπτυσσόμενο επιστημονικό πεδίο, γνωστό ως Διαδίκτυο των Ρομποτικών Πραγμάτων (IoRT). Στο πλαίσιο του IoRT, τα ρομπότ δεν νοούνται πλέον ως μεμονωμένες, κλειστές υπολογιστικές νησίδες. Αντιθέτως, λειτουργούν ως "έξυπνοι κόμβοι" (intelligent nodes) ενός ευρύτερου δικτύου, ικανοί να επικοινωνούν μέσω πρωτοκόλλων Μηχανή σε Μηχανή (Machine-to-Machine - M2M). Μπορούν να συλλέγουν πολυτροπικά δεδομένα από κατανεμημένους αισθητήρες του περιβάλλοντος (π.χ. κάμερες υποδομής, αισθητήρες θερμοκρασίας), να επεξεργάζονται πληροφορίες τοπικά και να αλληλοεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο με άλλες μηχανές. Η αρχιτεκτονική του IoRT επιτρέπει στις ρομποτικές μονάδες να αποκτούν "περιβαλλοντική επίγνωση" (contextual awareness) που ξεπερνά την εμβέλεια των δικών τους φυσικών αισθητήρων, μετασχηματίζοντας τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνονται και εκτελούν πολύπλοκες εργασίες [6].

2.2 Συστήματα πολλαπλών ρομπότ (MRS) και Ρομποτική σμήνους (Swarm Robotics)

Καθώς οι εφαρμογές της ρομποτικής επεκτείνονται σε τομείς μεγάλης κλίμακας—όπως η εφοδιαστική αλυσίδα, η γεωργία ακριβείας και πρωτίστως οι αποστολές Έρευνας και Διάσωσης (SAR)—καθίσταται σαφές ότι ένα μεμονωμένο ρομπότ συχνά αδυνατεί να φέρει εις πέρας την αποστολή. Η διαπίστωση αυτή οδήγησε στη συστηματική ανάπτυξη των MRS. Ένα MRS αποτελείται από πολλαπλά, συχνά ετερογενή ρομπότ (π.χ. συνδυασμός UAVs και UGVs) τα οποία συνεργάζονται στενά [7].

Μια εξειδικευμένη υποκατηγορία των MRS είναι η Ρομποτική σμήνους (Swarm Robotics). Εμπνευσμένη άμεσα από τη συλλογική συμπεριφορά κοινωνικών εντόμων και ζωικών οργανισμών (όπως τα σμήνη μελισσών, οι αποικίες μυρμηγκιών και τα κοπάδια πουλιών), η ρομποτική σμήνους εστιάζει στον συντονισμό τεράστιου αριθμού απλών και φθηνών ρομποτικών μονάδων (Εικόνα 2-1). Η αρχιτεκτονική ενός ρομποτικού σμήνους διέπεται από τρία θεμελιώδη χαρακτηριστικά [8]:

- **Αποκέντρωση (Decentralization):** Δεν υπάρχει κανένας κεντρικός υπολογιστής ("εγκέφαλος") που να καθοδηγεί το σμήνος. Η συνολική ευφυΐα αναδύεται (emergent behavior) από τις τοπικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ίδιων των ρομπότ και του περιβάλλοντός τους.



Εικόνα 2-1 Ρομπότ σμήνους: A) Jasmine, B) Alice, C) Kilobots, D) E-pucks E,F) Swarmanoid [8]

- **Επεκτασιμότητα (Scalability):** Το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει εξίσου καλά είτε αποτελείται από 10 είτε από 1.000 ρομπότ.
- **Ανθεκτικότητα (Robustness):** Λόγω της απουσίας κεντρικού ελέγχου (single point of failure), εάν ένα ή περισσότερα ρομπότ καταστραφούν (π.χ. σε μια επιχείρηση διάσωσης), το σμήνος αναδιοργανώνεται αυτόματα και συνεχίζει την αποστολή.

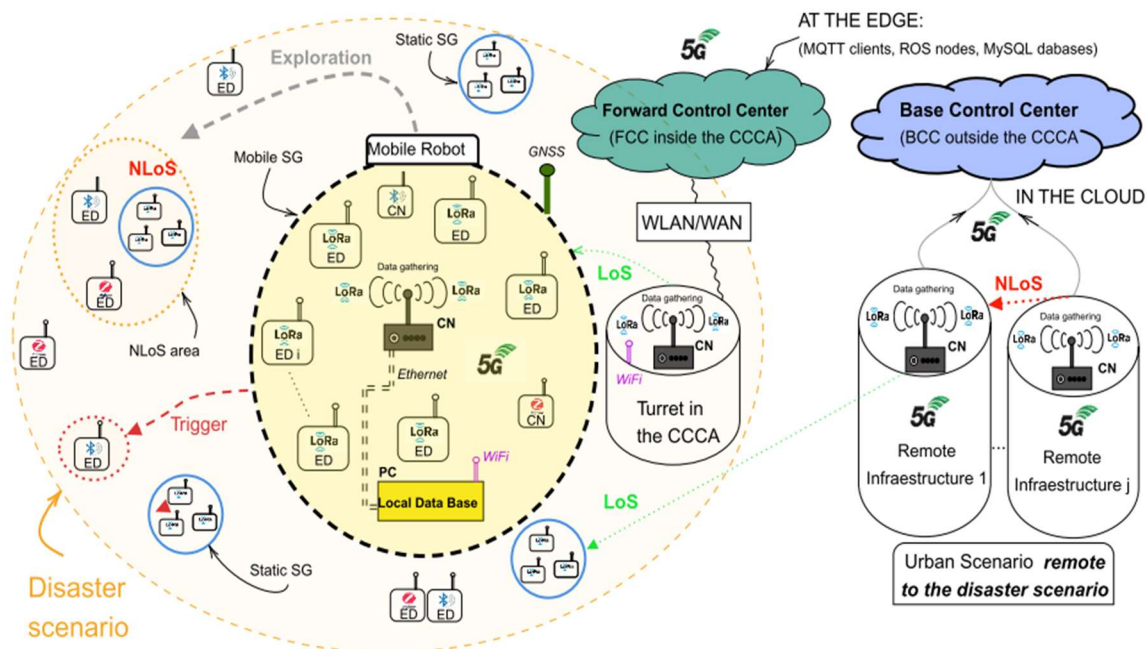
Η συμπεριφορά αυτών των συστημάτων βασίζεται σε πολύπλοκους μαθηματικούς αλγόριθμους, όπως η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO), συμπεριφορά αποικιών μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization – ACO) και αλγόριθμους αγέλης λύκων (Wolf Pack Algorithm – WPA) [9].

2.3 Αρχιτεκτονικές Διαμοιρασμού: Ρομποτική νέφους και επεξεργασίας στο άκρο (Cloud Robotics και Edge Robotics)

Όσο τα αυτόνομα συστήματα καλούνται να εκτελέσουν πιο απαιτητικές διεργασίες—όπως η ανάλυση ογκομετρικού βίντεο, η ταυτόχρονη χαρτογράφηση θέσης και περιοχής (SLAM) και η μηχανική μάθηση—ο υπολογιστικός φόρτος προσκρούει στους αυστηρούς φυσικούς περιορισμούς των κινητών πλατφορμών. Η τοποθέτηση υπερ-υπολογιστών στο σώμα ενός ρομπότ αυξάνει το βάρος του και εξαντλεί την μπαταρία του σε ελάχιστο χρόνο.

Ιστορικά, η λύση σε αυτό το αδιέξοδο δόθηκε με την εισαγωγή της Ρομποτικής Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Robotics). Μέσω αυτής της αρχιτεκτονικής, αναπτύχθηκαν πλαίσια που επιτρέπουν στις μηχανές να "εκφορτώνουν" (offload) τα βαριά υπολογιστικά τους καθήκοντα σε απομακρυσμένους διακομιστές νέφους. Η βιβλιογραφία, αναλύοντας την αρχιτεκτονική των MRS, ταξινομεί τα μοντέλα δικτύωσης και επικοινωνίας αυτών των σχηματισμών σε τρεις βασικές δομές: Κεντρικοποιημένη (Centralized), Αποκεντρωμένη (Decentralized) και Ιεραρχική (Hierarchical) [10].

Ωστόσο, το αμιγώς κεντροποιημένο μοντέλο (Cloud Robotics) πάσχει από ένα δομικό μειονέκτημα: την τηλεπικοινωνιακή καθυστέρηση (latency). Η μεταφορά τεράστιου όγκου δεδομένων σε ένα απομακρυσμένο data center καθιστά αδύνατη την πλοήγηση ή τον έλεγχο κλειστού βρόχου σε πραγματικό χρόνο. Ως απάντηση, η σύγχρονη ρομποτική έρευνα έχει στραφεί δυναμικά στην Υπολογιστική στην Άκρη του Δικτύου (Mobile Edge Computing - MEC). Τοποθετώντας τους υπολογιστικούς πόρους στις κεραίες του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, η "Ευφυΐα στα Άκρα" (Edge Intelligence) εκμηδενίζει τον χρόνο διάδοσης.



Εικόνα 2-2 Το πλαίσιο συμπεριφοράς ρομπότ σε περιβάλλον SAR [11]

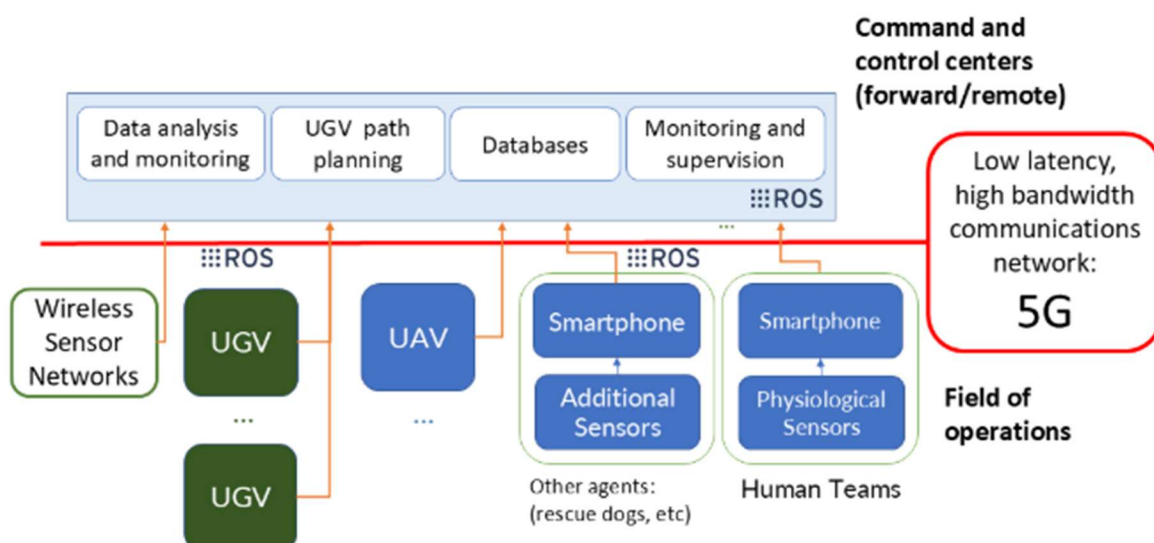
Η πλέον σύγχρονη προσέγγιση, η οποία καλύπτει ιδανικά τις ανάγκες των αποστολών διάσωσης, ονομάζεται "Συνεχές Νέφους-Άκρου-ΙoT" (Cloud-to-Edge-to-IoT Continuum). Αυτό το συνεχές επιτρέπει τη δυναμική και ιεραρχική κατανομή των διεργασιών. Για παράδειγμα, οι άμεσες αντιδράσεις ενός ρομπότ, όπως η αποφυγή εμποδίων, υπολογίζονται ακαριαία στο άκρο του δικτύου, ενώ εργασίες που απαιτούν τεράστια επεξεργαστική ισχύ, όπως η συνένωση (aggregation) μοντέλων Ομοσπονδιακής Μάθησης (Federated Learning) από πολλαπλά ρομπότ, δρομολογούνται ψηλότερα στο νέφος (Cloud) [11](Εικόνα 2-2).

Επιπρόσθετα, στα χαοτικά περιβάλλοντα που συνθέτουν το IoRT, η αρχιτεκτονική αυτή υποστηρίζεται πλέον και από Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs). Τα UAVs δεν λειτουργούν μόνο ως συλλέκτες δεδομένων, αλλά παρέχουν την υπηρεσία ενσωμάτωσης της τεχνητής νοημοσύνης στα UAV (UAV-enhanced Edge Intelligence), λειτουργώντας τα ίδια ως ιπτάμενοι διακομιστές (Edge servers) που αναλαμβάνουν τον υπολογιστικό φόρτο και τη δρομολόγηση για τα επίγεια ρομπότ (UGVs) που κινούνται στα συντρίμια.

2.4 Λειτουργικά Συστήματα Ρομπότ και Πλαίσια Ελέγχου: Από το λειτουργικό σύστημα ROS στο ROS2

Ανεξάρτητα από τη χρήση αρχιτεκτονικών άκρου (Edge) ή νέφους (Cloud), η ανάπτυξη εμπορικών, ασφαλών και διαλειτουργικών ρομποτικών εφαρμογών απαιτεί ένα στιβαρό λογισμικό ενδιάμεσου επιπέδου (middleware). Στη σύγχρονη ρομποτική έρευνα, συμπεριλαμβανομένων των αποστολών Έρευνας και Διάσωσης (SAR), το πλαίσιο που έχει επικρατήσει από την πλειονότητα των ομάδων για την ανταλλαγή δεδομένων είναι το λειτουργικό σύστημα διαχείρισης ρομπότ (Robot Operating System - ROS)(Εικόνα 2-3) [7].

Παρότι η πρώτη γενιά του λειτουργικού συστήματος (ROS) διαδραμάτισε ιστορικό ρόλο στην ανάπτυξη της ρομποτικής, η αρχιτεκτονική του παρουσίασε σημαντικές αδυναμίες όσον αφορά την ικανοποίηση αυστηρών περιορισμών πραγματικού χρόνου, οι οποίοι είναι απαραίτητοι σε βιομηχανικές εφαρμογές για την επίτευξη στόχων ασφάλειας και υψηλής απόδοσης [12].



Εικόνα 2-3 Χρήση ROS σε SAR εφαρμογή [11]

Η επιτακτική ανάγκη για μεγαλύτερη αξιοπιστία, ανοχή σε σφάλματα, ανθεκτικότητα και κυβερνοασφάλεια στα καταναμεμένα συστήματα, οδήγησε στη δημιουργία του ROS2. Η πιο ριζοσπαστική και σημαντική αλλαγή του ROS2 είναι η μετάβαση από τα παραδοσιακά πρωτόκολλα δικτύου TCP/UDP –που χρησιμοποιούνταν στο αρχικό ROS– στο βιομηχανικό πρότυπο: Υπηρεσία Διανομής Δεδομένων (Data Distribution Service - DDS), το οποίο καθιερώθηκε πλέον ως το προεπιλεγμένο ενδιάμεσο σύστημα για την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων (nodes) του ρομπότ [12].

Το DDS αποτελεί ένα βιομηχανικό πρότυπο που έχει εκδοθεί από τον οργανισμό Object Management Group (Object Management Group - OMG) και καθορίζει ένα ενδιάμεσο λογισμικό για την αξιόπιστη διανομή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, ακολουθώντας αυστηρά το μοντέλο Εκδότη/Συνδρομητή (publish/subscribe paradigm). Η προσέγγιση αυτή προσφέρει τεράστια ευελιξία, καθώς το ROS2 είναι συμβατό με πολλαπλούς παρόχους λογισμικού DDS (π.χ. το προεπιλεγμένο eProsima, το RTI, το OpenDDS και το ADLINK) [11].

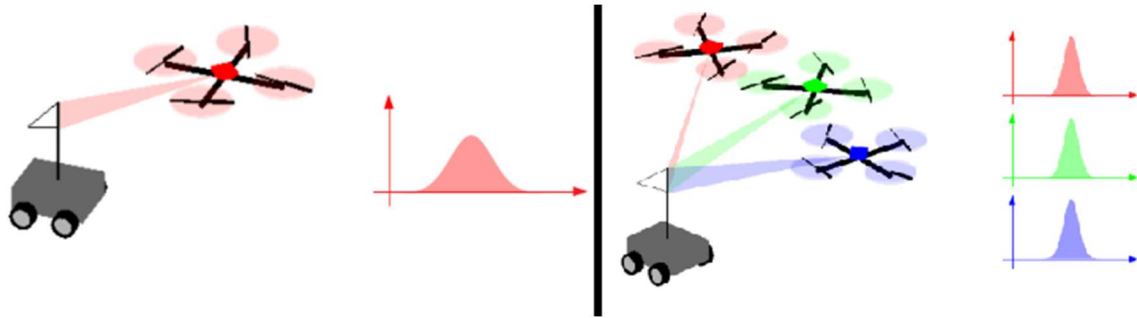
Μέσω της ενσωμάτωσης του DDS, ένα σωστά ανεπτυγμένο σύστημα βασισμένο στην αρχιτεκτονική του ROS2 μπορεί πλέον να εγγυηθεί πιο σταθερές επικοινωνίες, χαρακτηριζόμενες από χαμηλότερο ποσοστό απώλειας μηνυμάτων και, κυρίως, σημαντικά χαμηλότερη καθυστέρηση επικοινωνίας (communication latency), τόσο σε ένα αδρανές περιβάλλον δικτύου (idle network) όσο και υπό συνθήκες φόρτου. Με την υποστήριξη Λειτουργικών Συστημάτων Πραγματικού Χρόνου (Real Time Operating System - RTOS), το ROS2 αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης ρομποτικής αυτονομίας, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις των καταναμεμένων πολλαπλών συστημάτων.

2.5 Καταναμεμένος Έλεγχος, Βελτιστοποίηση και Φυσική Αλληλεπίδραση

Σε επίπεδο μαθηματικού ελέγχου και βελτιστοποίησης, η λειτουργία των Σμηνών και των MRS εξαρτάται από θεωρίες γράφων και αλγόριθμους συναίνεσης. Όταν τα ρομπότ αναζητούν τον βέλτιστο τρόπο να καταναείμουν εργασίες (Multi-Robot Task Allocation) στο πεδίο ή να συγκλίνουν σε κοινή εκτίμηση της κατάστασης του περιβάλλοντος, πρέπει να ελαχιστοποιήσουν μια παγκόσμια συνάρτηση κόστους μέσω περιορισμένης ανταλλαγής πληροφοριών [13].

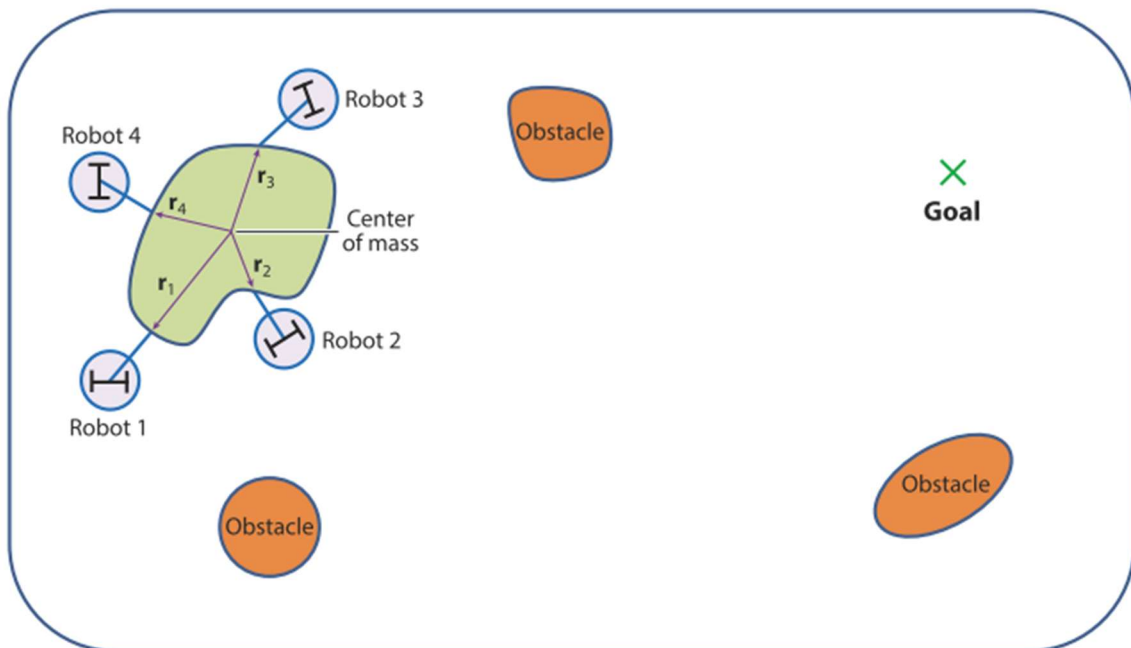
Κορυφαίοι μέθοδοι διανεμημένης βελτιστοποίησης, όπως η Καταναμεμένη Κάθοδος Κλίσης (Distributed Gradient Descent - DGD) και η Εναλλασσόμενη Μέθοδος Πολλαπλασιαστών Κατεύθυνσης (Alternating Direction Method of Multipliers - ADMM), παίζουν καθοριστικό ρόλο. Στην DGD, το κάθε ρομπότ ενημερώνει την εκτίμησή του λαμβάνοντας υπόψη τον τοπικό του στόχο (local gradient) και μια σταθμισμένη μέση τιμή (consensus term) των αποφάσεων των γειτονικών του ρομπότ. Η ADMM υπερτερεί συχνά σε ταχύτητα σύγκλισης, καθώς επιβάλλει ρητά τη συμφωνία (agreement constraints) μεταξύ των τοπικών μεταβλητών των ρομπότ πριν χαλαρώσει τους περιορισμούς χρησιμοποιώντας συναρτήσεις Lagrangian. Αυτοί οι αλγόριθμοι εφαρμόζονται ευρέως στον συντονισμό σμηνών UAVs για συγχρονισμένη παρακολούθηση στόχων, ελαχιστοποιώντας τον όγκο των δεδομένων που πρέπει να διακινήθούν ασύρματα [13].

Πέραν της πλοήγησης, η κορυφαία πρόκληση στη σύγχρονη ρομποτική έγκειται στην Αλληλεπίδραση μέσω Επαφής (Contact and Physical Interaction). Ενώ η θεωρία ελέγχου ελεύθερης κίνησης έχει ωριμάσει, ο έλεγχος της αλληλεπίδρασης ενός ρομπότ με το φυσικό περιβάλλον, ή πολύ περισσότερο με άλλα ρομπότ, εισάγει ακραίες μη γραμμικότητες. Σε εφαρμογές Συνεργατικής Μεταφοράς Οντοτήτων (όπου, για παράδειγμα, δύο ρομπότ μεταφέρουν από κοινού ένα φορείο ή ένα άκαμπτο αντικείμενο), απαιτείται ο αυστηρός έλεγχος των εσωτερικών δυνάμεων (internal forces) που αναπτύσσονται μεταξύ τους.



Εικόνα 2-4 Βελτιστοποίηση θέσης με κατανομή της πληροφορίας. Αριστερά: λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες από ένα ρομπότ. Δεξιά: λαμβάνοντας υπόψιν πληροφορίες από πολλαπλά ρομπότ [13].

Για την αποτροπή της άσκησης συνθλιπτικών δυνάμεων στο αντικείμενο ή την εμφάνιση ταλαντώσεων, εφαρμόζεται ευρέως ο Συνεργατικός Έλεγχος Εμπέδησης (Cooperative Impedance Control). Αντί τα ρομπότ να ακολουθούν αυστηρά (άκαμπτα) μια γεωμετρική τροχιά, ο έλεγχος εμπέδησης δίνει στο ρομπότ μια "συμπεριφορά ελατηρίου/αποσβεστήρα" στο σημείο επαφής (Εικόνα 2-5). Με τον τρόπο αυτό, εάν τα δύο ρομπότ χάσουν τον τέλει κινηματικό συγχρονισμό τους, τα συστήματα ελέγχου τους υποχωρούν (compliant behavior) απορροφώντας τα σφάλματα χωρίς να σπάσουν το αντικείμενο. Σε πιο σύγχρονες υλοποιήσεις, μοντέλα όπως ο Μη Γραμμικός Προβλεπτικός Έλεγχος (Nonlinear Model Predictive Control - NMPC) χρησιμοποιούνται για την κατανομημένη επίλυση αυτών των δυναμικών περιορισμών με έμφαση στην αποφυγή ιδιομορφιών (singularity avoidance) [14].



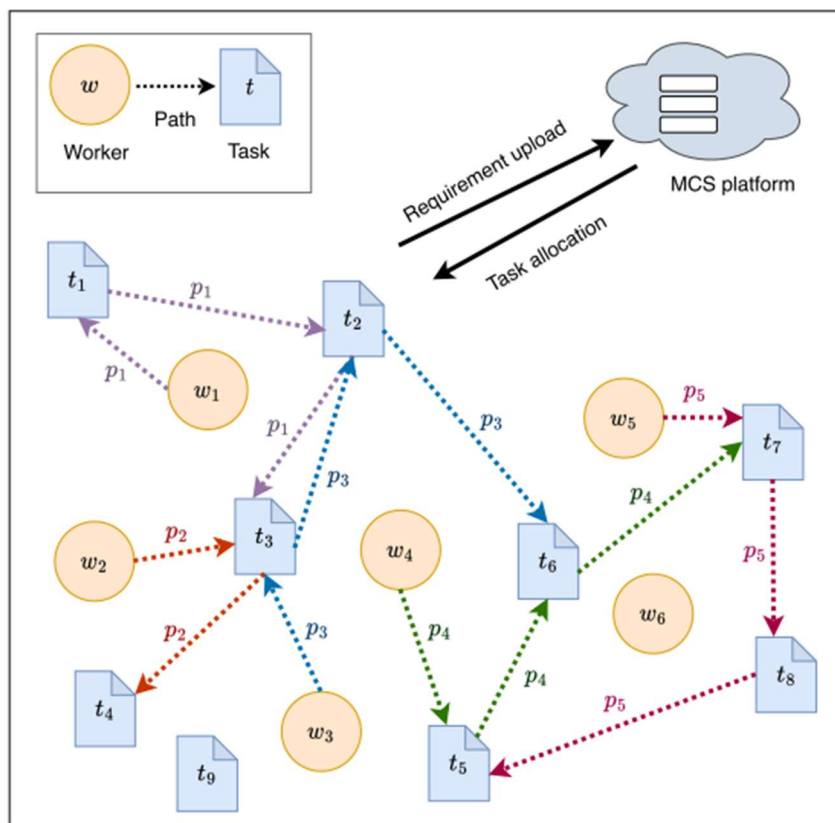
Εικόνα 2-5 Σχέδιο μεταφοράς αντικειμένου από τέσσερα ρομπότ με έναν βαθμό ελευθερίας [14]

2.6 Κατανομή Εργασιών (Task Allocation) σε Περιορισμένα Περιβάλλοντα

Σε αποστολές μεγάλης κλίμακας, η βέλτιστη Ανάθεση Εργασιών σε Πολλαπλά Ρομπότ (Multi-Robot Task Allocation - MRTA) καθορίζει την επιτυχία του συστήματος. Η δυναμική ανάθεση εργασιών προϋποθέτει την ανάλυση πλήθους παραμέτρων, όπως η απόσταση κάθε ρομπότ (worker) από τον στόχο (task), ο διαθέσιμος χρόνος, το ενεργειακό απόθεμα και οι απαιτήσεις της αποστολής [15].

Η σύγχρονη βιβλιογραφία αντιμετωπίζει το πρόβλημα αυτό μέσω προηγμένων τεχνικών Μηχανικής Μάθησης, όπως η Βαθιά Ενισχυτική Μάθηση (Deep Reinforcement Learning - DRL) σε συνδυασμό με Ετερογενή Δίκτυα Προσοχής Γράφων (Heterogeneous Graph Attention Networks - HGAT). Σε αυτές τις αρχιτεκτονικές, ο χώρος των ρομπότ και των εργασιών μοντελοποιείται ως ένας ετερογενής γράφος. Αλγόριθμοι αιχμής, όπως ο A2C (Advantage Actor-Critic) και ο DDQN (Double Deep Q-Network), εκπαιδεύονται ώστε να προσεγγίζουν τη βέλτιστη λύση, λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική εξέλιξη του περιβάλλοντος [15].

Εντούτοις, όταν τα ρομπότ επιχειρούν σε χωρικά κατανεμημένα περιβάλλοντα με σοβαρούς περιορισμούς επικοινωνίας (όπως σε κατεστραμμένα κτίρια), οι παραπάνω προσεγγίσεις απαιτούν προσαρμογή. Σε τέτοια σενάρια εφαρμόζονται εξειδικευμένα πρωτόκολλα όπως το CoLoSSI (Connectivity-aware Localized Swarm Scheduling and Interaction - CoLoSSI). Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των συστημάτων είναι η χρήση Προσαρμοστικών Διαστημάτων Ανασχεδιασμού (Adaptive Replanning Intervals). Αντί η επικοινωνία και ο ανασχεδιασμός (replanning) της αποστολής να γίνονται σε αυστηρά, σταθερά χρονικά διαστήματα, τα διαστήματα προσαρμόζονται δυναμικά με βάση την πρόοδο της αποστολής. Για παράδειγμα, στην αρχή μιας αποστολής SAR απαιτείται συχνό replanning λόγω της αβεβαιότητας, ενώ στα μετέπειτα στάδια η συχνότητα μειώνεται, εξοικονομώντας κρίσιμους επικοινωνιακούς πόρους και ενέργεια [16].



Εικόνα 2-6 Σενάριο ανάθεσης εργασιών σε πολλαπλά ρομπότ [15]

2.7 Συμπεράσματα και το Τοπίο Προτυποποίησης (Standardisation Landscape)

Όπως διαπιστώθηκε από την ανάλυση των σύγχρονων αρχιτεκτονικών, η μετάβαση στα συνεργατικά ρομποτικά σμήνη βασίζεται εξ ολοκλήρου στην ικανότητά τους να ανταλλάσσουν αξιόπιστα δεδομένα, να αντιλαμβάνονται τον χώρο και να μοιράζουν υπολογιστικό φόρτο σε αποκεντρωμένους κόμβους.

Αυτή η αυξανόμενη πολυπλοκότητα φέρνει στο προσκήνιο ένα κρίσιμο συστημικό ζήτημα: την επιτακτική ανάγκη για Προτυποποίηση (Standardisation). Η επιτυχής ενσωμάτωση της ασύρματης επικοινωνίας σε ρομποτικές εφαρμογές καθιστά τη μετάβαση στην τεχνολογία 6G απαραίτητη. Ωστόσο, για να υπάρξει ευρεία υιοθέτηση, απαιτείται συνεργασία μεταξύ διαφορετικών Οργανισμών Ανάπτυξης Προτύπων (SDOs), καθώς ιστορικά τομείς όπως οι τηλεπικοινωνίες (π.χ. 3GPP, ETSI, ITU) και η ρομποτική (π.χ. ISO, IEC, IEEE) λειτουργούσαν σε ξεχωριστά οικοσυστήματα.

Σήμερα, η γεφύρωση αυτού του χάσματος συντελείται μέσα από συγκεκριμένες πρωτοβουλίες. Για παράδειγμα:

- Η 3GPP αναπτύσσει προδιαγραφές όπως η τεχνική αναφορά TR 22.837 για την Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC) (που περιλαμβάνει περιπτώσεις χρήσης αναζήτησης και διάσωσης - SAR), η αναφορά TR 22.847 για υποστήριξη απτικών και πολυτροπικών υπηρεσιών επικοινωνίας, και η TS 22.104 για τις απαιτήσεις υπηρεσιών κυβερνο-φυσικού ελέγχου σε κάθετους τομείς.
- Το ETSI έχει δημιουργήσει την ομάδα ISG RIS και εκδίδει έγγραφα όπως το GR ISC 001 για τα σενάρια ανάπτυξης της τεχνολογίας ISAC, καλύπτοντας περιπτώσεις επείγουσας διάσωσης και ακριβούς ρομποτικής σύλληψης (robot grasping).
- Το ινστιτούτο IEEE εστιάζει στην εξέλιξη προτύπων όπως το P1955 (Standard for 6G Empowering Robotics) και τα πρότυπα 802.1 TSN (Time-Sensitive Networking) για δίκτυα χαμηλής καθυστέρησης και αξιοπιστίας.
- Παράλληλα, οργανισμοί όπως ο ISO (π.χ. μέσω της τεχνικής επιτροπής TC 299 για τη ρομποτική) καθορίζουν αυστηρά κριτήρια ασφαλείας, επίδοσης και πλοήγησης (navigation) για κινητά ρομπότ εξυπηρέτησης.

Συμπερασματικά, τα σύγχρονα ρομποτικά συστήματα εξελίσσονται ραγδαία, όμως η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων τους περιορίζεται από τις τρέχουσες επικοινωνιακές δομές. Το 6G, μέσα από ένα συντονισμένο τοπίο προτυποποίησης (Standardisation landscape), καλείται να παρέχει το ενοποιημένο, αξιόπιστο "νευρικό δίκτυο" που θα επιτρέψει στις ευφυείς μηχανές να επιχειρούν με ασφάλεια σε κρίσιμα σενάρια. Οι τεχνολογίες-κλειδιά αυτού του δικτύου (5G/6G) εξετάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 3ο: 5G/6G Τεχνολογία

3.1 Η Εξέλιξη προς την Κινητή Νοημοσύνη

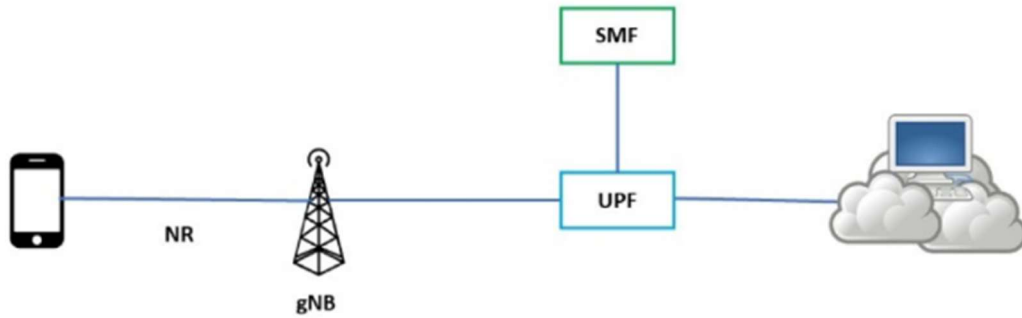
Ιστορικά, τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα (από το 1G έως το 4G) σχεδιάστηκαν και βελτιστοποιήθηκαν με γνώμονα τον άνθρωπο, στοχεύοντας στην αύξηση του ρυθμού μετάδοσης δεδομένων για το κινητό διαδίκτυο. Η έλευση της Πέμπτης Γενιάς (5G) σηματοδότησε την πρώτη ριζική αλλαγή παραδείγματος, μετατοπίζοντας την εστίαση από τη συνδεσιμότητα των ανθρώπων στη συνδεσιμότητα των μηχανών και την ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Σήμερα, βρισκόμαστε στη μετάβαση από το 5G (και το 5G-Advanced) προς την Έκτη Γενιά (6G), η οποία θα ενοποιήσει τον φυσικό, τον ψηφιακό και τον βιολογικό κόσμο, δημιουργώντας ένα "Εξυπνο Δίκτυο των Πάντων" (Intelligent Network of Everything).

Για να μπορέσουν τα ρομποτικά σμήνη να επιχειρήσουν αυτόνομα σε σενάρια Έρευνας και Διάσωσης (SAR), απαιτούν ένα τηλεπικοινωνιακό "νευρικό σύστημα" ικανό να υποστηρίξει ακαριαίες αντιδράσεις και επεξεργασία τεράστιων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

3.2 Θεμελιώδεις Τεχνολογίες του 5G και οι Περιορισμοί τους

Το 5G βασίστηκε σε τρεις κεντρικούς πυλώνες χρήσης (eMBB, mMTC και URLLC) και υλοποιήθηκε μέσω μιας σειράς καινοτόμων τεχνολογιών που άλλαξαν την αρχιτεκτονική των δικτύων [3]:

- **Χιλιοστομετρικά Κύματα (mmWave):** Το 5G αξιοποίησε για πρώτη φορά συχνότητες πάνω από τα 24 GHz (mmWave), οι οποίες προσφέρουν τεράστιο εύρος ζώνης (bandwidth) σε σχέση με το φάσμα κάτω των 6 GHz (sub-6 GHz). Ωστόσο, τα κύματα αυτά πάσχουν από υψηλές απώλειες διάδοσης (path loss) και αδυνατούν να διαπεράσουν συμπαγή εμποδία, γεγονός που καθιστά την κάλυψη σε ερείπια (SAR) προβληματική.
- **Μαζικό MIMO (Multiple Inputs Multiple Outputs - MIMO):** Η χρήση κεραιών Massive MIMO (π.χ. διατάξεις 64 έως 128 κεραιών στον σταθμό βάσης) επέτρεψε τον ταυτόχρονο σχηματισμό πολλαπλών στενών δεσμών (beamforming), αυξάνοντας δραματικά τη φασματική αποδοτικότητα και κατευθύνοντας το σήμα σε συγκεκριμένους χρήστες/ρομπότ, μειώνοντας τις παρεμβολές.
- **Διαχωρισμός Επιπέδου Ελέγχου και Χρήστη (Control Plane and User Plane Separation - CUPS):** Το 5G εισήγαγε το CUPS, διαχωρίζοντας τη δρομολόγηση των δεδομένων ελέγχου από τα δεδομένα χρήστη (Εικόνα 3-1). Αυτό επέτρεψε την ανεξάρτητη κλιμάκωση (scalability) του δικτύου.
- **Τεμαχισμός Δικτύου (Network Slicing) και Εικονικοποίηση Δικτυακών Λειτουργιών (Network Functions Virtualization - NFV):** Μέσω της NFV και των Δικτύων Οριζόμενα από Λογισμικό (Software Defined Networking - SDN), το 5G επιτρέπει τη δημιουργία πολλαπλών ανεξάρτητων "εικονικών δικτύων" (slices) πάνω στην ίδια φυσική υποδομή. Έτσι, σε μια επιχείρηση, ένας τεμαχισμός (slice) URLLC αφιερώνεται στον κρίσιμο έλεγχο των ρομπότ (μηδενική καθυστέρηση), ενώ ένας τεμαχισμός (slice) eMBB αναλαμβάνει τη μετάδοση βίντεο.



Εικόνα 3-1 End to end επικοινωνία με χρήση CUPS [3]

Παρά τις καινοτομίες αυτές, το 5G φτάνει γρήγορα στα όριά του. Εφαρμογές όπως ο τηλεχειρισμός ρομπότ με πολυτροπική απτική ανάδραση (haptic feedback) και η μετάδοση ολογραφικού βίντεο 3D, απαιτούν ρυθμούς δεδομένων της τάξης του 1 Terabit/s (Tbps) και καθυστερήσεις μικρότερες του 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου (sub-ms). Για να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια, το 6G εισάγει ριζοσπαστικές τεχνολογίες [3].

3.3 Απαιτήσεις και Δείκτες Απόδοσης (KPIs) του 6G

Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) στο πλαίσιο του "IMT-2030", καθώς και πληθώρα ερευνητικών έργων, έχουν θέσει τους νέους Βασικούς Δείκτες Απόδοσης (KPIs) του 6G [3], [17]:

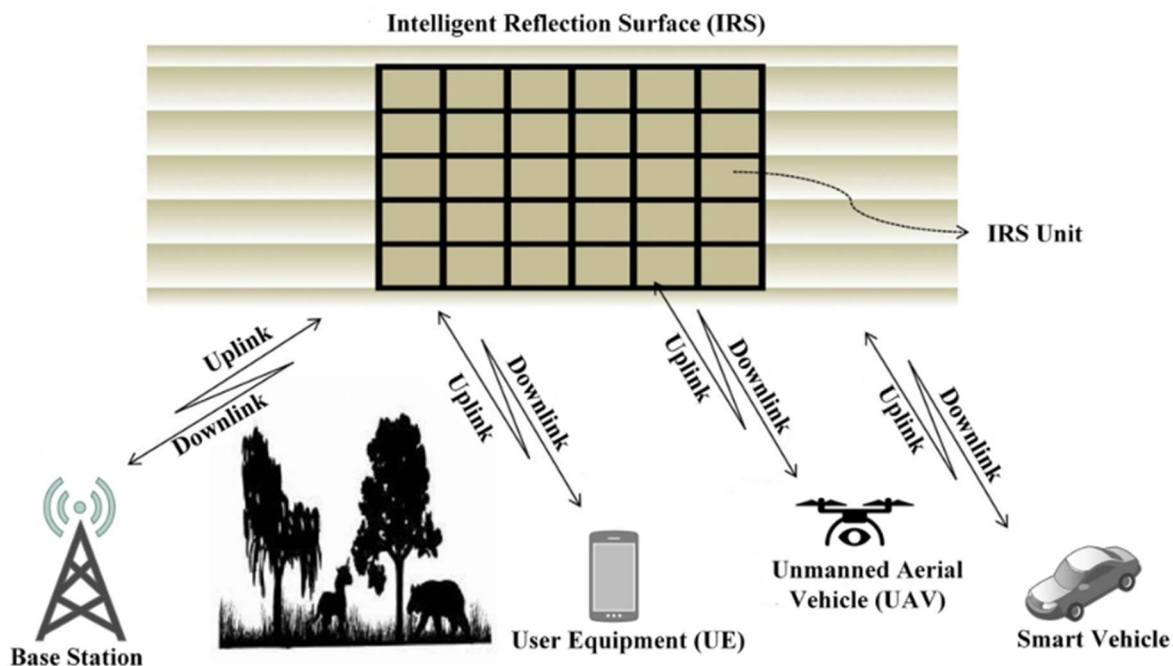
- Ρυθμός Δεδομένων: Μέγιστος ρυθμός (Peak Data Rate) που αγγίζει το 1 Tbps (έναντι 10-20 Gbps του 5G).
- Καθυστερήση (Latency) και Αξιοπιστία: Μείωση της καθυστέρησης στο 0.1 ms και αύξηση της αξιοπιστίας στο 99.99999%, χαρακτηριστικά απόλυτα κρίσιμα για αποστολές διάσωσης.
- Πυκνότητα Συσκευών (Connection Density): Υποστήριξη από 10⁷ έως 10⁸ συσκευών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο, ανταποκρινόμενο στην έκρηξη των αισθητήρων.
- Ακρίβεια Εντοπισμού (Positioning): Ακρίβεια εντοπισμού 1 έως 10 εκατοστών, επιτρέποντας στα συνεργατικά ρομπότ να συλλαμβάνουν αντικείμενα τυφλά.

Για την επίτευξη των παραπάνω KPIs, το 6G βασίζεται σε τεχνολογίες αιχμής στο επίπεδο του φάσματος και της κεραίας:

3.3.1 Επικοινωνίες Terahertz (THz) και Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες (OWC)

Η μετάβαση σε συχνότητες Terahertz (0.1 THz έως 10 THz) αποτελεί ίσως την πιο θεμελιώδη αλλαγή του 6G. Σε αυτό το φάσμα, τα διαθέσιμα εύρη ζώνης είναι τεράστια, επιτρέποντας ακαριαία μεταφορά ογκομετρικών χαρτών. Ωστόσο, τα κύματα THz αντιμετωπίζουν ακραία εξασθένηση λόγω της απορρόφησής τους από την ατμόσφαιρα (π.χ. υδρατμοί και αέρια), περιορίζοντας την εμβέλειά τους σε λίγα μέτρα (nanonetworks ή data-center links). Συμπληρωματικά, το 6G θα ενσωματώσει τις Οπτικές Ασύρματες Επικοινωνίες (Optical Wireless Communications - OWC) και ειδικότερα τις Επικοινωνίες Ορατού Φωτός (Visible Light Communication - VLC), οι οποίες χρησιμοποιούν διόδους LED (400-800 THz) για παροχή υψηλών ταχυτήτων χωρίς ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθιστώντας τις ιδανικές για υποθαλάσσιες ή κλειστές βιομηχανικές (και SAR) εφαρμογές [12].

3.3.2 Υπερ-Μαζικό MIMO (umMIMO) και Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS)



Εικόνα 3-2 Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες [18]

Για την αντιστάθμιση των τεράστιων απωλειών διάδοσης των THz, η απλή τεχνολογία Massive MIMO του 5G εξελίσσεται στο Ultra-Massive MIMO (umMIMO). Σε αυτές τις υψηλές συχνότητες, το μέγεθος των κεραιών μικραίνει δραματικά, επιτρέποντας την ενσωμάτωση χιλιάδων στοιχείων (π.χ. 64x64) σε ελάχιστο χώρο, προσφέροντας ανεπανάληπτη χωρική πολυπλεξία (spatial multiplexing) και κέρδος δεσμίδας (beamforming gain). Η πλέον νέα τεχνολογία, ωστόσο, είναι οι Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (Reconfigurable Intelligent Surfaces - RIS). Οι RIS είναι παθητικές επιφάνειες, αποτελούμενες από μικροσκοπικά μετα-υλικά, ικανές να αντανακλούν και να αλλάζουν τη φάση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ελεγχόμενα μέσω λογισμικού. Αν ένα ρομπότ εγκλωβιστεί σε ερείπια χάνοντας την απευθείας οπτική επαφή με τον σταθμό βάσης, μια επιφάνεια RIS μπορεί να "κάμψει" το σήμα γύρω από το εμπόδιο, δημιουργώντας ένα "έξυπνο" ραδιο-περιβάλλον με μηδενική επιπλέον ενεργειακή κατανάλωση (Εικόνα 3-2) [18].

3.3.3 Νέες Κυματομορφές, Διαμόρφωση και NOMA

Το 4G και το 5G βασίστηκαν στην κυματομορφή Ορθογώνιας Πολυπλεξίας Διαίρεσης Συχνότητας (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM). Ωστόσο, σε υπερ-υψηλές ταχύτητες κίνησης (π.χ. drones/UAVs που πετούν με υψηλές ταχύτητες σε SAR) και σε υψηλές συχνότητες, η OFDM καταρρέει λόγω του φαινομένου Doppler. Το 6G εισάγει νέες κυματομορφές όπως το OTFS (Orthogonal Time Frequency Space - OTFS), το οποίο μοντελοποιεί το κανάλι στον τομέα καθυστέρησης-Doppler, λύνοντας το πρόβλημα της κινητικότητας. Παράλληλα, τεχνικές πολλαπλής πρόσβασης όπως το NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), επιτρέπουν τον διαχωρισμό των χρηστών/μηχανών με βάση την ισχύ ή τον κώδικα (ακόμα και αν μοιράζονται την ίδια συχνότητα), αυξάνοντας εκθετικά την πυκνότητα των συνδέσεων [17] [18].

3.4 Αρχιτεκτονική Τρισδιάστατης Κάλυψης: Δίκτυα SAGIN

Η επίγεια υποδομή (σταθμοί βάσης) είναι ευάλωτη κατά τη διάρκεια φυσικών καταστροφών. Για να εξασφαλίσει καθολική κάλυψη στα ρομπότ διάσωσης, το 6G υιοθετεί την αρχιτεκτονική Ενοποιημένων Δικτύων Διαστήματος-Αέρα-Εδάφους (Space-Air-Ground Integrated Networks - SAGIN). Η αρχιτεκτονική αυτή δημιουργεί ένα 3D δίκτυο πολλαπλών επιπέδων (Εικόνα 3-3) [19] :

- Το Διαστημικό Επίπεδο (Space Layer): Αποτελείται από ένα σύστημα δορυφόρων πολλαπλών τροχιών, διασυνδεδεμένων μέσω Διαδορυφορικών Ζεύξεων (Inter-Satellite Links - ISLs).

Γεωστατικοί Δορυφόροι (Geostationary Orbit - GEO - 35.786 km): Προσφέρουν τεράστια, σταθερή κάλυψη. Χρησιμοποιούνται για μακροπρόθεσμη μετεωρολογική πρόγνωση (όπως το σύστημα Fengyun), η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τον προγραμματισμό πτήσεων των UAVs σε συνθήκες ισχυρών ανέμων.

Δορυφόροι Μέσης Τροχιάς (Medium Earth Orbit - MEO - 2.000 έως 35.786 km): Περιλαμβάνουν τα συστήματα πλοήγησης (GPS, Galileo, BeiDou) και είναι απολύτως απαραίτητοι για τον ακριβή εντοπισμό θέσης (positioning) σε πραγματικό χρόνο, τόσο για τα ρομπότ όσο και για τους διασώστες.

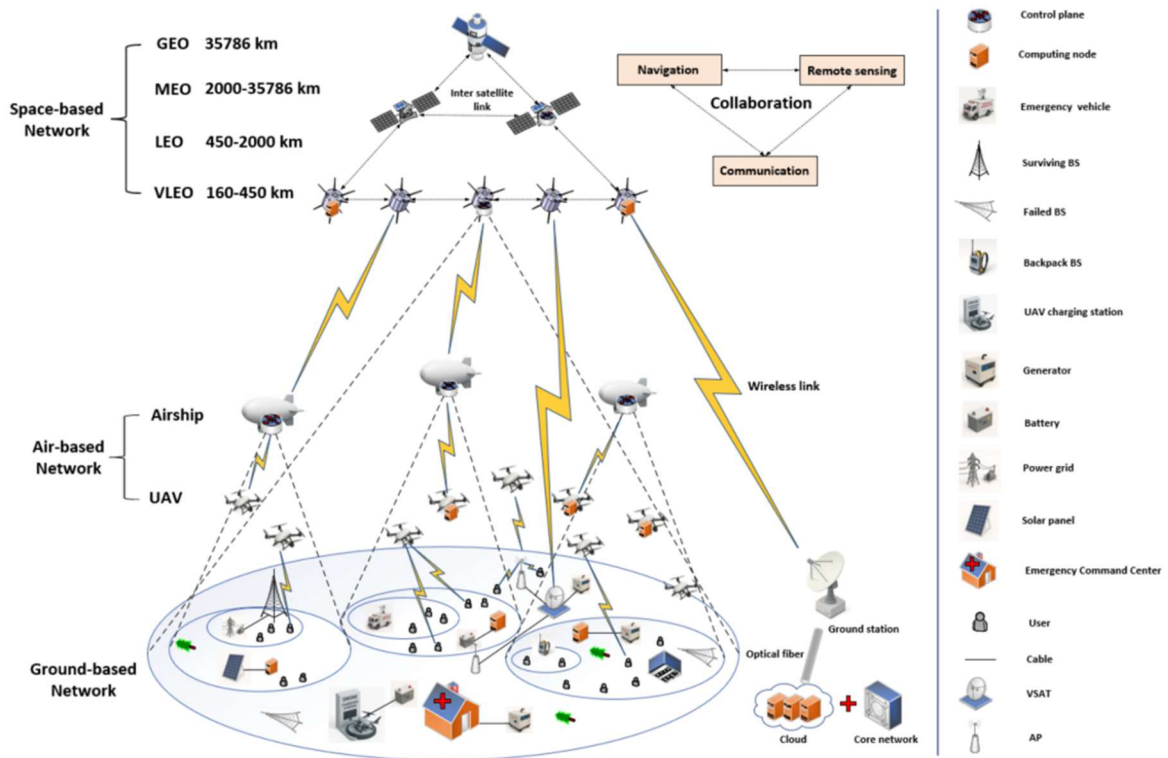
Δορυφόροι Χαμηλής και Πολύ Χαμηλής Τροχιάς (Low Earth Orbit - LEO/VLEO - 160 έως 2.000 km): Αποτελούν τη "ραχοκοκαλιά" (backhaul) των έκτακτων επικοινωνιών. Λόγω του χαμηλού υψομέτρου τους, προσφέρουν σημαντικά μικρότερη καθυστέρηση μετάδοσης. Σε πολλά σύγχρονα σενάρια λειτουργούν ως κόμβοι άκρης (Edge nodes), ενσωματώνοντας αναγεννητική αρχιτεκτονική και υπολογιστική ισχύ.

- Το Εναέριο Επίπεδο (Air Layer): Παρέχει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ κάλυψης και ευελιξίας, γεφυρώνοντας το διάστημα με το έδαφος.

Πλατφόρμες Υψηλού Υψομέτρου (High Altitude Platforms - HAPs - 17 έως 30 km): Στρατοσφαιρικά αερόπλοια ή μπαλόνια που ενεργοποιούνται ταχύτατα και προσφέρουν ευρεία κάλυψη ως υπερ-κόμβοι αναμετάδοσης.

Πλατφόρμες Χαμηλού Υψομέτρου (Low Altitude Platforms LAPs - κάτω των 10 km): Τα Drones αποτελούν τους πιο κρίσιμους, ευέλικτους κόμβους. Λειτουργούν ως Κινητοί Εναέριοι Σταθμοί Βάσης (Aerial Base Stations - ABS), ως αναμεταδότες (relays), ή ως κινητοί κόμβοι άκρου (MEC), πετώντας ακριβώς πάνω από τα συντρίμια.

- Το Επίγειο Επίπεδο (Ground Layer): Περιλαμβάνει τους διασωθέντες σταθμούς βάσης, τα οχήματα εκτάκτου ανάγκης (emergency communication vehicles), τους φορητούς σταθμούς (backpack BSs), καθώς και τα ίδια τα κατανεμημένα σμήνη επίγειων ρομπότ (UGVs) που δημιουργούν Κινητά Αδόμητα Δίκτυα (Mesh Ad-hoc Networks - MANETs).



Εικόνα 3-3 Δίκτυο SAGIN [19]

3.5 Η Κρισιμότητα της Προτυποποίησης (Standardisation) στο 5G και 6G και Συμπεράσματα

Το πλήθος και η πολυπλοκότητα αυτών των τεχνολογιών (από τις κεραίες umMIMO έως τους δορυφόρους LEO) εγείρει επιτακτικά το ζήτημα της Προτυποποίησης (Standardisation), το οποίο αποτελεί και το βασικό ερευνητικό κίνητρο της παρούσας εργασίας.

Για να διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα (interoperability) αυτών των τεχνολογιών και να επιτραπεί η εμπορική αξιοποίηση αυτόνομων ρομπότ από διαφορετικούς κατασκευαστές, οι διεθνείς οργανισμοί εργάζονται [12]:

- 3GPP: Οι μελέτες (Release 18 και 19) εισάγουν τις προδιαγραφές για τα δίκτυα 5G-Advanced και βάζουν τα θεμέλια του 6G. Έγγραφα όπως η Τεχνική Αναφορά TR 22.837 τυποποιούν την ISAC θέτοντας ως βασικό σενάριο το Search and Rescue, ενώ η TR 22.104 καθορίζει τα πρότυπα κυβερνο-φυσικού ελέγχου (URLLC metrics) για τα ρομπότ.
- ETSI: Μέσα από ομάδες όπως η ISG ISC (GR ISC 001), προδιαγράφονται οι αρχιτεκτονικές για τη σύγκλιση επικοινωνιών και αισθητήρων στο άκρο του δικτύου.
- IEEE: Επιτροπές του IEEE δημιουργούν πρότυπα όπως το IEEE 802.15.3d για να υποστηρίξουν τις τηλεπικοινωνίες στα 100 Gbps στο φάσμα των sub-THz, αλλά και το πολυαναμενόμενο P1955 (Standard for 6G Empowering Robotics).

Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η τεχνολογική αρχιτεκτονική του 5G αποτέλεσε το πρώτο βήμα προς τις επικοινωνίες μηχανών. Όμως, η πλήρης αυτονομία των ρομπότ σε κρίσιμες αποστολές διάσωσης απαιτεί τις ακραίες δυνατότητες του 6G. Τεχνολογίες φυσικού επιπέδου όπως οι συχνότητες THz, οι επιφάνειες RIS, τα προηγμένα σχήματα OTFS/NOMA και η Σημασιολογική Επικοινωνία θα προσφέρουν ένα πραγματικά "ευφύες νευρικό σύστημα". Ο καθοριστικός παράγοντας, ωστόσο, που θα μετατρέψει αυτή την ετερογενή τεχνολογία σε λειτουργική πραγματικότητα για τα ρομπότ είναι η διεθνής προτυποποίηση, όπως αναδεικνύεται από τις τρέχουσες πρωτοβουλίες των 3GPP και IEEE.

Κεφάλαιο 4ο: Search And Rescue

4.1 Εισαγωγή: Η Κρισιμότητα των Επιχειρήσεων SAR

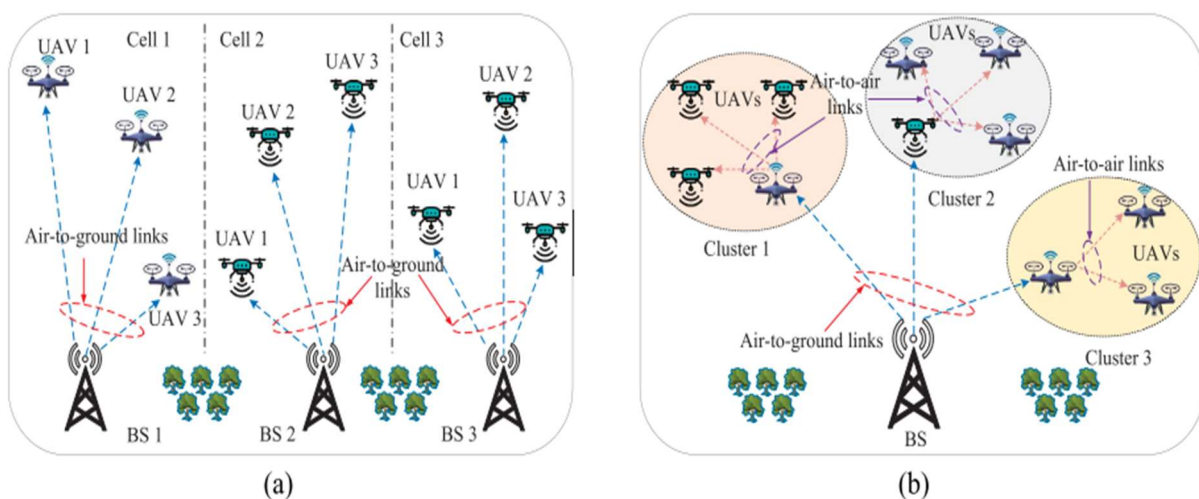
Η διαχείριση καταστροφών και οι επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (SAR) αποτελούν το πλέον κρίσιμο και τεχνολογικά απαιτητικό πεδίο εφαρμογής για τα σύγχρονα συνεργατικά ρομποτικά συστήματα και τα δίκτυα επόμενης γενιάς (5G/6G). Ο πρωταρχικός στόχος κάθε αποστολής SAR, είτε πρόκειται για βιομηχανικά ατυχήματα είτε για φυσικές καταστροφές (σεισμοί, τυφώνες), είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των διασωθέντων υπό ακραία πίεση χρόνου.

Στην ιατρική των καταστροφών, κυριαρχεί η έννοια της "Χρυσής Ώρας" (Golden Hour) ή, σε περιπτώσεις εγκλωβισμού σε ερείπια, των "Χρυσών 72 Ωρών". Μετά την πάροδο αυτού του χρονικού παραθύρου, τα ποσοστά επιβίωσης των θυμάτων (λόγω αιμορραγίας, ασφυξίας, υποθερμίας ή αφυδάτωσης) κατακρημνίζονται. Παραδοσιακά, οι ομάδες διάσωσης και οι εκπαιδευμένοι σκύλοι αντιμετωπίζουν τεράστιους κινδύνους κατά την εισχώρησή τους στις "θερμές ζώνες" (hot zones), καθώς απειλούνται από δευτερογενείς καταρρεύσεις κτιρίων, τοξικές αναθυμιάσεις, πυρκαγιές ή ακτινοβολία [20].

Η ανάπτυξη ετερογενών, κατανεμημένων ρομποτικών σημύων (MRS) εξαλείφει τον κίνδυνο για τους διασώστες, επιτρέποντας την ταυτόχρονη, πολυδιάστατη σάρωση τεράστιων περιοχών. Ωστόσο, η αποτελεσματική λειτουργία αυτών των συστημάτων προϋποθέτει την υπέρβαση ενός εξαιρετικά πολύπλοκου συνδυασμού προκλήσεων: ανώμαλα και δυναμικά μεταβαλλόμενα εδάφη, πλήρης κατάρρευση τηλεπικοινωνιακών υποδομών, και η ανάγκη για επεξεργασία δεδομένων αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο [20].

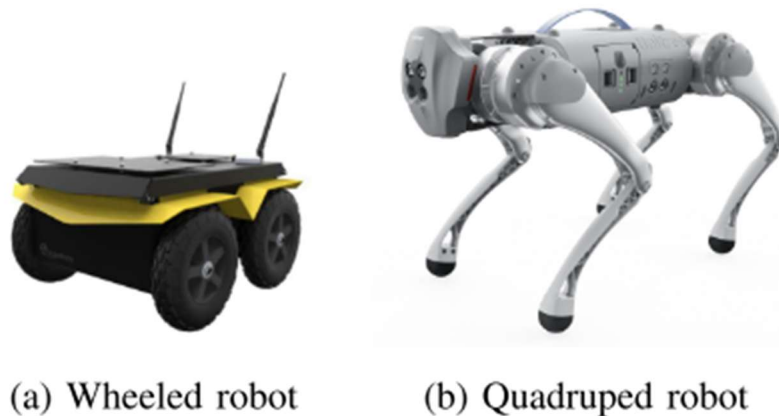
4.2 Ετερογενείς Πλατφόρμες και Περιβάλλοντα Λειτουργίας

Τα ρομποτικά συστήματα SAR σχεδιάζονται για να επιχειρούν σε εξαιρετικά εχθρικά περιβάλλοντα, όπως η Αστική Έρευνα και Διάσωση, η Θαλάσσια Διάσωση και η Διάσωση στην Άγρια Φύση [21]. Για να ανταποκριθεί η βιομηχανία, έχει δημιουργήσει διαφορετικές κατηγορίες ρομπότ:



Εικόνα 4-1 UAVs σε διάταξη α) Κεντρική διάταξη και β) Κατανεμημένη διάταξη [22]

- Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs): Αποτελούν τα "μάτια" της επιχείρησης. Διακρίνονται σε αεροσκάφη σταθερής πτέρυγας (fixed-wing) που εξασφαλίζουν μεγάλη εμβέλεια και διάρκεια πτήσης, πολυκόπτερα (multi-rotors) που προσφέρουν δυνατότητα αιώρησης (hovering) και κατακόρυφης προσγείωσης (Vertical Take-Off and Landing - VTOL) για ενδεδειγμένη επιθεώρηση, και υβριδικά UAVs που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα και των δύο. Τα UAVs πετούν συνήθως σε υψηλότερα στρώματα για να εκτελέσουν 3D χαρτογράφηση, δρώντας συχνά ως εναέριοι σταθμοί βάσης(Εικόνα 4-1) [22].
- Μη Επανδρωμένα Επίγεια Οχήματα (UGVs) (Εικόνα 4-2): Αναλαμβάνουν την άμεση προσέγγιση. Πρόσφατες μελέτες στον σχεδιασμό αποστολών αναδεικνύουν τη σημασία της επιλογής του κατάλληλου σασί. Για παράδειγμα, τα τροχοφόρα (wheeled) ρομπότ είναι ενεργειακά αποδοτικά σε επίπεδες επιφάνειες, ενώ τα τετράποδα (quadruped) ρομπότ μπορούν να υπερπηδούν ανισόπεδα ερείπια. Ωστόσο, τα τετράποδα παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο ενεργειακό προφίλ (Energy Profile), καθώς καταναλώνουν σημαντική ενέργεια (motion energy) ακόμη και όταν στέκονται ακίνητα ή κινούνται σε κεκλιμένα επίπεδα (slopes), γεγονός που πρέπει να συνυπολογίζεται αυστηρά στους αλγόριθμους σχεδιασμού τροχιάς [23].



Εικόνα 4-2 UGVs που εμπλέκονται σε SAR εφαρμογές [23]

4.3 Αρχιτεκτονική Πέντε Επιπέδων στα Συστήματα SAR

Η πολυπλοκότητα των αποστολών απαιτεί μια διαστρωματωμένη προσέγγιση στον σχεδιασμό του συστήματος, η οποία, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, χωρίζεται σε πέντε επίπεδα (Five-Layer Architecture):

- Επίπεδο Αλληλεπίδρασης Ανθρώπου-Ρομπότ (HRI Layer): Επιτρέπει τον τηλεχειρισμό (Teleoperation), τον εποπτικό έλεγχο και τη συνεργατική αυτονομία. Ο άνθρωπος-διασώστης μπορεί να λαμβάνει κρίσιμες αποφάσεις μέσω οπτικών ή απτικών (haptic) διεπαφών [24].
- Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer): Είναι υπεύθυνο για τη συλλογή και Σύντηξη Αισθητηρίων (Sensor Fusion). Συνδυάζει δεδομένα από κάμερες RGB-D, θερμικές κάμερες, αισθητήρες Ανίχνευσης και μέτρηση εύρους φωτός (Light Detection and Ranging – LiDAR) και ραντάρ χιλιοστομετρικών κυμάτων (mmWave), επιτρέποντας στο ρομπότ να αναγνωρίζει τη γεωμετρία του χώρου και να ανιχνεύει ανθρώπινη παρουσία υπό μηδενική ορατότητα [25].

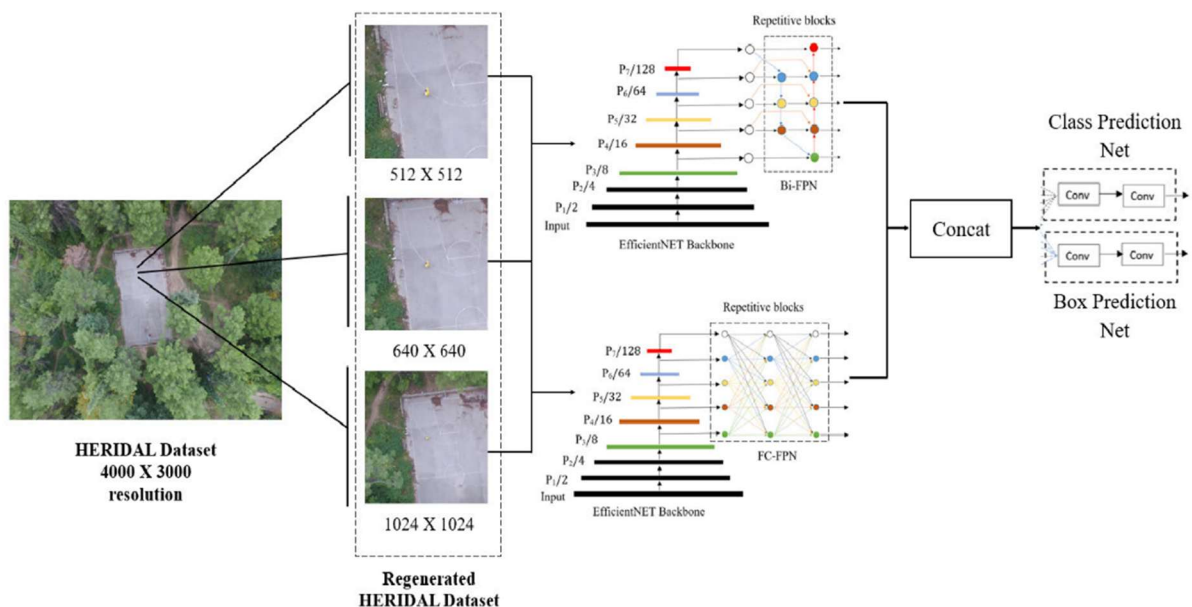
- Επίπεδο Πλοήγησης (Navigation Layer): Περιλαμβάνει τους αλγόριθμους Ταυτόχρονου Εντοπισμού και Χαρτογράφησης (SLAM) και την αποφυγή εμποδίων.
- Επίπεδο Ελέγχου (Control Layer): Μετατρέπει τα δεδομένα πλοήγησης σε συγκεκριμένες εντολές προς τους ενεργοποιητές (π.χ. έλεγχος κλειστού βρόχου μέσω ROS2/DDS).
- Φυσικό Επίπεδο (Robot Layer): Το υλικό, το σασί, οι κινητήρες και οι μπαταρίες του συστήματος.

4.4 Προηγμένος Εντοπισμός και Αντίληψη Θυμάτων

Η "καρδιά" των επιχειρήσεων SAR είναι η ανακάλυψη των θυμάτων. Στο 6G, αυτό υλοποιείται μέσω δύο βασικών τεχνολογικών κατευθύνσεων:

A) Οπτική Ανίχνευση και Τεχνητή Νοημοσύνη (Computer Vision & AI):

Κατά την αεροφωτογράφιση από UAVs, τα θύματα συχνά καταλαμβάνουν απειροελάχιστο ποσοστό των pixels, καθιστώντας τον εντοπισμό δύσκολο. Η βιομηχανία χρησιμοποιεί υπερσύγχρονα σύνολα δεδομένων (datasets) όπως το HERIDAL, εκπαιδεύοντας Νευρωνικά Δίκτυα κάτω από τη φιλοσοφία της Μηχανικής Μάθησης Συνόλου (Ensemble Learning). Οι έρευνες δείχνουν ότι η χρήση εικόνων ανάλυσης 512x512 pixels (έναντι 1024x1024) σε αρχιτεκτονικές όπως το EfficientDET με Πλήρως Συνδεδεμένα Δίκτυα Χαρακτηριστικών Πυραμίδας (Fully Connected Feature Pyramid Networks - FC-FPN), προσφέρει την απόλυτη χρυσή τομή: επιτυγχάνει ακρίβεια άνω του 91.46% με υπολογιστικό χρόνο εκπαίδευσης μόλις 9.42 ώρες (σε αντίθεση με τις 36.7 ώρες της υψηλότερης ανάλυσης). Αλγόριθμοι ταχείας ανίχνευσης όπως οι YOLO (You Only Look Once - YOLO) εφαρμόζονται ευρέως για ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο [26].



Εικόνα 4-3 Ανίχνευση αντικειμένων με αρχιτεκτονική EfficientDET [26]

B) Εντοπισμός μέσω Ραδιοσυχνοτήτων (RF Localization / SARDO):

Τι γίνεται όταν το θύμα είναι πλήρως θαμμένο και η οπτική επαφή (Line-of-Sight) είναι αδύνατη; Η λύση δίνεται μέσω της αξιοποίησης των ραδιοκυμάτων. Συστήματα αιχμής, όπως το SARDO (Search-And-Rescue Drone-based solution - SARDO), εξοπλίζουν τα UAVs με διατάξεις "ψεύτικων κεραιών". Το drone πετά πάνω από τα ερείπια λειτουργώντας ως "ψεύτικος σταθμός βάσης" LTE (LTE base station). Εκμεταλλεύόμενο το γεγονός ότι τα κινητά τηλέφωνα των θυμάτων προσπαθούν να συνδεθούν στο δίκτυο, το SARDO μετρά τον Χρόνο Πτήσης του σήματος (Time of Flight - ToF). Εφαρμόζοντας τεχνικές Ψευδο-τριπλευρισμού (Pseudo-trilateration) και επιλύοντας το μη-γραμμικό πρόβλημα ελαχίστων τετραγώνων (non-linear least squares), σε συνδυασμό με δίκτυα Βαθιάς Μάθησης το σύστημα SARDO μπορεί να προσδιορίσει την τρισδιάστατη θέση (3D location) ενός θαμμένου κινητού τηλεφώνου με ακρίβεια λίγων μέτρων μέσα σε ελάχιστα λεπτά [27].

4.5 Η Πρόκληση της Εξαγωγής Θυμάτων (Casualty Extraction)

Η φυσική αλληλεπίδραση για την ασφαλή εξαγωγή ενός τραυματία παραμένει το "άγιο δισκοπότηρο" της ρομποτικής. Αν η μεταφορά γίνει λανθασμένα, υπάρχει ακραίος κίνδυνος επιδείνωσης τραυματισμών της σπονδυλικής στήλης. Η έρευνα επικεντρώνεται σε εξειδικευμένα ρομπότ διάσωσης [20]:

- Μηχανισμοί Ιμάντα (Conveyor-belt mechanisms): Ρομπότ όπως το ResQbot είναι εξοπλισμένα με έναν καινοτόμο μηχανισμό ιμάντα. Γλιστρούν κυριολεκτικά κάτω από το θύμα χωρίς να του ασκήσουν κάθετες δυνάμεις, τραβώντας το ομαλά πάνω στο "φορείο" του ρομπότ (Εικόνα 4-4).



Εικόνα 4-4 Ρομπότ ιμάντα για την μεταφορά θύματος [20]

- Ανθρωποειδή και Διπλοί Βραχίονες: Προηγμένα συστήματα (όπως τα ρομπότ BEAR, CRONA και το νοτιοκορεάτικο HURCULES) διαθέτουν πανίσχυρους βραχίονες (Dual-arm manipulators). Αυτά τα ρομπότ είναι ικανά να εκτελέσουν την κίνηση "φτυαρίσματος" (scooping motion), αγκαλιάζοντας και ανασηκώνοντας το θύμα στα χέρια τους. Για να εξασφαλιστεί η ασφάλεια της διαδικασίας, τα σύγχρονα ρομπότ εξαγωγής ενσωματώνουν συστήματα υποστήριξης, όπως οι Συσκευές Ασφάλισης Αυχένα (Neck Securing Devices - NSD), οι οποίες ακινητοποιούν το κεφάλι του πολυτραυματία κατά την ανύψωση, αποτρέποντας περαιτέρω νευρολογικές βλάβες.

4.6 Συνεργασία Ανθρώπου-Ρομπότ και ο ρόλος της Προτυποποίησης (Standardisation)

Η επιτυχία του SAR στο μέλλον δεν βασίζεται στην απόλυτη (ανεξέλεγκτη) αυτονομία, αλλά στη συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και μηχανής. Πλαίσια λειτουργίας όπως το HERO (Human-Enhanced Robot Orchestration) προωθούν τη συνέργεια (cross-domain orchestration) μεταξύ των δικτύων 5G/6G, της Μηχανικής Μάθησης (Slice-aware ML) και των διασωστών στο πεδίο. Μέσω δικτύων εξαιρετικά χαμηλής καθυστέρησης (URLLC), οι διασώστες μπορούν να μεταφέρουν τις ανθρώπινες γνωστικές δεξιότητές τους (cognitive skills) απευθείας στα ρομπότ [24].

Η Αναγκαιότητα της Προτυποποίησης: Όλος αυτός ο ετερογενής εξοπλισμός (drones, IMSI-catchers, ρομπότ εξαγωγής, 3D χάρτες) κατασκευάζεται από διαφορετικούς παρόχους. Για να λειτουργήσουν ενιαία σε περιπτώσεις κρίσης, η Προτυποποίηση (Standardisation) είναι το απόλυτο "κλειδί", γεγονός που συνδέεται άμεσα με τον βασικό πυρήνα αυτής της διπλωματικής:

- Ο οργανισμός 3GPP μελετά ενεργά τις απαιτήσεις διάσωσης μέσω του TR 22.837, το οποίο τυποποιεί την Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC) ειδικά για σενάρια "Public safety, search and rescue". Παράλληλα, το TR 22.847 μελετά τις πολυτροπικές επικοινωνίες (tactile communications) για τη μεταφορά δεξιοτήτων (skillset sharing) και την ασφαλή απομακρυσμένη καθοδήγηση των ρομπότ εξαγωγής.
- Ο οργανισμός IEEE προχωρά στη δημιουργία προτύπων όπως το IEEE 1872.1-2024 (Standard for Robot Task Representation), ώστε όλα τα ρομπότ ενός σμήνους (ακόμα και διαφορετικών κατασκευαστών) να κατανοούν ενιαία την αποστολή τους, καθώς και το P1955 (Standard for 6G Empowering Robotics), το οποίο θεσπίζει τις τηλεπικοινωνιακές απαιτήσεις.

Συμπεράσματα Κεφαλαίου: Η μετάβαση στις επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης επόμενης γενιάς είναι μια επανάσταση πολυεπίπεδη. Απαιτεί την 3D δικτύωση του SAGIN για να λειτουργήσει, καταναεμμένους αλγόριθμους εξοικονόμησης πόρων όπως το CoLoSSI για την επιβίωση στο πεδίο, υβριδική Τεχνητή Νοημοσύνη (SARDO / Ensemble Learning) για τον εντοπισμό κάτω από τα συντρίμια, και ρομπότ εξαιρετικής μηχανολογικής ακρίβειας για την εξαγωγή. Το νήμα που δένει αρμονικά αυτή την πολυπλοκότητα είναι το 6G, καθοδηγούμενο από το αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο της προτυποποίησης, αποδεικνύοντας πώς η σύγκλιση δικτύων και μηχανών μπορεί κυριολεκτικά να σώσει ανθρώπινες ζωές.

Κεφάλαιο 5ο: Πρότυπα Ρομποτικής

5.1 Τοπίο προτυποποίησης



Εικόνα 5-1 Οργανισμοί Προτυποποίησης

Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας κατά την τελευταία δεκαετία έχει οδηγήσει σε μια άνευ προηγουμένου σύγκλιση της ρομποτικής μηχανικής, της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και των προηγμένων τηλεπικοινωνιακών δικτύων (5G, 5G-Advanced και B5G/6G) [5]. Καθώς η χρήση των δικτυωμένων ρομπότ επεκτείνεται σε πολυάριθμους κάθετους τομείς, η ανάγκη για εναρμονισμένες και τυποποιημένες λύσεις έχει ενταθεί κατακόρυφα [10].

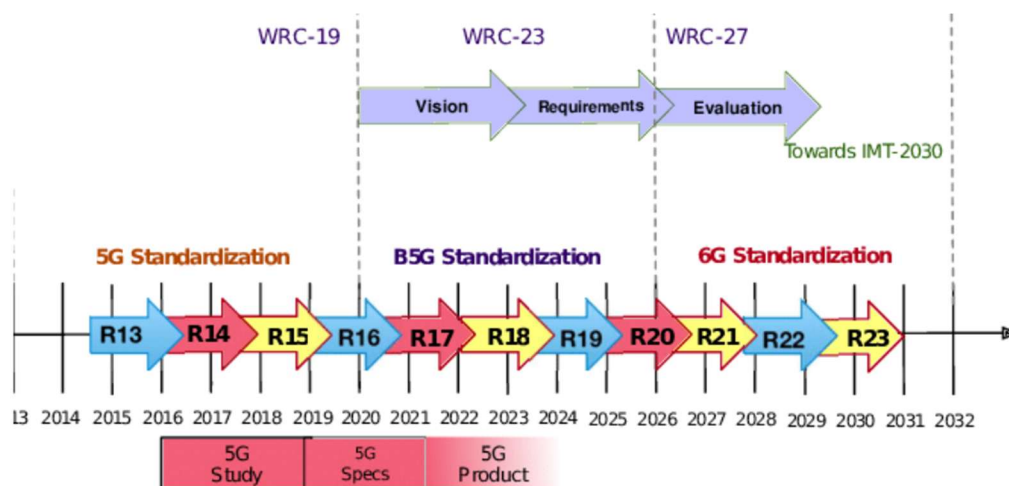
Ο ρόλος των Οργανισμών Ανάπτυξης Προτύπων (SDOs) είναι καθοριστικός, καθώς καλούνται να διασφαλίσουν τη διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια και την αξιοπιστία ενός διεπιστημονικού οικοσυστήματος [5]. Ιστορικά, το τοπίο της προτυποποίησης χαρακτηριζόταν από έντονο κατακερματισμό: οργανισμοί όπως η 3GPP, το ETSI και η ITU εστίαζαν αμιγώς στα τηλεπικοινωνιακά πρωτόκολλα, ενώ οργανισμοί όπως ο ISO και η IEEE RAS (Robotic Autonomous Systems – RAS) εστίαζαν στη μηχανική, την κινηματική και τον έλεγχο των ρομπότ. Σήμερα, τα πρότυπα αλληλεπικαλύπτονται, διαμορφώνοντας έναν ενιαίο χάρτη προτυποποίησης (Εικόνα 5-1).

1. Οργανισμοί ανάπτυξης προτύπων Τηλεπικοινωνιών (Telecom SDOs)

Οι τηλεπικοινωνιακοί SDOs καθορίζουν τις απαιτήσεις και τις αρχιτεκτονικές των δικτύων ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις της ρομποτικής:

- 3rd Generation Partnership Project (3GPP):

Είναι ο κεντρικός πυλώνας προτυποποίησης των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Μέσα από τα Releases 18, 19 και 20 (Εικόνα 5-2), η 3GPP εισάγει κρίσιμα χαρακτηριστικά για τη ρομποτική. Το πρότυπο 3GPP TS 22.104 [28] (Release 19) καθορίζει τις αυστηρές απαιτήσεις υπηρεσιών (URLLC) για εφαρμογές κυβερνο-φυσικού ελέγχου, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη διαθεσιμότητα σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η υποστήριξη των URLLC σε επίπεδο αρχιτεκτονικής ραδιοπρόσβασης (Radio Access Network - RAN) περιγράφεται στο TS 38.300. Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά κάποια πρότυπα σχετικά με την ρομποτική:



Εικόνα 5-2 Πορεία προτυποποίησης 3GPP [29]

Η τεχνική αναφορά 3GPP TR 22.837 [30] εξετάζει τη σκοπιμότητα της ISAC, καλύπτοντας περιπτώσεις χρήσης όπως η δημόσια ασφάλεια, οι επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (SAR), και η πλοήγηση αυτόνομων οχημάτων/ρομπότ εκτός κάλυψης Radio Access Network.

Η τεχνική αναφορά 3GPP TR 22.847 εξετάζει την υποστήριξη απτικών (tactile) και πολυτροπικών (multi-modality) επικοινωνιών, δίνοντας έμφαση στον διαμοιρασμό δεξιοτήτων για συνεργατική αντίληψη και στην απτική ανατροφοδότηση για επικίνδυνα απομακρυσμένα περιβάλλοντα [31].

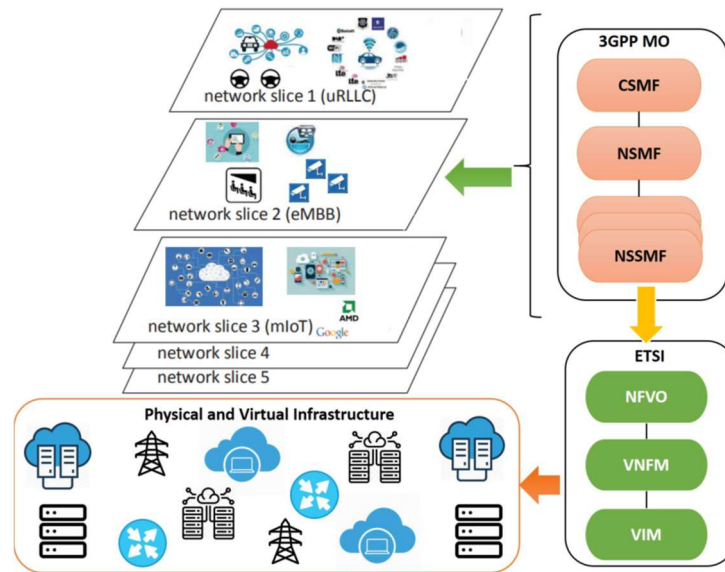
Η τεχνική αναφορά 3GPP TR 22.916 εξετάζει τα δίκτυα ευφών ρομπότ εξυπηρέτησης, εστιάζοντας σε σενάρια όπως η διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων μέσω Edge Computing για ομάδες εναέριων ρομπότ και η τηλεχειριζόμενη εξόρυξη.

Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής συστήματος, το 3GPP TS 23.501 [32] εισάγει βελτιώσεις για την παρακολούθηση UAVs, τις υπηρεσίες προσδιορισμού θέσης Sidelink και την επικοινωνία πραγματικού χρόνου, ενώ το TS 23.548 [33] καλύπτει τις διαδικασίες υποστήριξης υπολογισμοί στο άκρο. Οι οχηματικές επικοινωνίες (Vehicle to Everything – V2X) υποστηρίζονται από το πρότυπο TS 23.287, και ο έλεγχος ποιότητας υπηρεσίας (Quality Of Service – QoS) από το TS 23.503.

- European Telecommunications Standards Institute (ETSI):

Το ETSI λειτουργεί συμπληρωματικά προς άλλους οργανισμούς προτυποποίησης, αναπτύσσοντας ευρωπαϊκές τεχνικές προδιαγραφές και κατευθυντήριες γραμμές που καλύπτουν προηγμένες δικτυακές και ρομποτικές υπηρεσίες (Εικόνα 5-3). Ουσιαστικά, συμβάλλει στην εξειδίκευση τεχνολογιών που σχετίζονται με τις επικοινωνίες, την υπολογιστική στο άκρο του δικτύου και την αυτοματοποίηση διαχείρισης.

Ειδικότερα, το ETSI GR ISC 001 [34] τυποποιεί σενάρια αξιοποίησης της ISAC, περιγράφοντας εφαρμογές όπου η επικοινωνία και η αισθητήρια λειτουργία συνδυάζονται στο ίδιο δίκτυο. Σε αυτά περιλαμβάνονται περιπτώσεις όπως αποστολές SAR, συνεργατική ρομποτική, αυτόνομη πλοήγηση και ρομποτική σύλληψη αντικειμένων σε δυναμικά περιβάλλοντα. Παράλληλα, το ETSI GR THz 001 [35] εξετάζει τις επικοινωνίες στη ζώνη Terahertz, οι οποίες αναμένεται να προσφέρουν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και χαμηλή καθυστέρηση, υποστηρίζοντας απαιτητικές εφαρμογές απομακρυσμένου ελέγχου και real-time αντίληψης.



Εικόνα 5-3 Προτυποποίηση ETSI & 3GPP για προηγμένες λειτουργίες [36]

Στον τομέα της υπολογιστικής υποδομής, το ETSI GS MEC 002 μαζί με το ETSI GR MEC-DEC 050 [37] καθορίζουν τις απαιτήσεις του υπολογισμού στο άκρο (Edge Computing), επιτρέποντας την επεξεργασία δεδομένων κοντά στο σημείο λειτουργίας των ρομπότ. Αυτό είναι κρίσιμο για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση, όπως συνεργατικά drones, βιομηχανικοί βραχίονες ή αυτόνομα οχήματα σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα.

Επιπλέον, το ETSI GS ZSM 003 εστιάζει στην ενορχήστρωση και αυτοματοποίηση του Network Slicing, υποστηρίζοντας τη δυναμική διαχείριση εικονικών τμημάτων δικτύου χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Με αυτόν τον τρόπο, διευκολύνεται η παροχή εξειδικευμένων δικτυακών πόρων για κρίσιμες ρομποτικές υπηρεσίες, με αυξημένη αξιοπιστία, προσαρμοστικότητα και αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων υποδομών.

- International Telecommunication Union (ITU):

Η ITU διαμορφώνει το μακροπρόθεσμο όραμα των δικτύων 6G μέσω του πλαισίου IMT-2030 (Εικόνα 5-4), καθορίζοντας τις βασικές τεχνολογικές κατευθύνσεις για τις μελλοντικές κινητές επικοινωνίες. Στο πλαίσιο αυτό, η σύσταση ITU M.2160-0 περιγράφει το συνολικό όραμα, τις νέες υπηρεσίες και τις τεχνολογικές δυνατότητες που θα χαρακτηρίζουν τα δίκτυα επόμενης γενιάς, με έμφαση στη σύγκλιση επικοινωνίας, υπολογισμού και ευφυούς αλληλεπίδρασης με το φυσικό περιβάλλον [38].

Πιο συγκεκριμένα, το IMT-2030 επεκτείνει τη φιλοσοφία του 5G εισάγοντας ένα οικοσύστημα όπου η συνδεσιμότητα δεν αποτελεί απλώς υποδομή μεταφοράς δεδομένων, αλλά έναν ενοποιημένο "ψηφιακό ιστό" που ενσωματώνει επικοινωνία, υπολογιστική ισχύ (compute), αποθήκευση και τεχνητή νοημοσύνη. Η σύσταση M.2160-0 αναδεικνύει έξι βασικές κατηγορίες χρήσεων (usage scenarios), όπως:

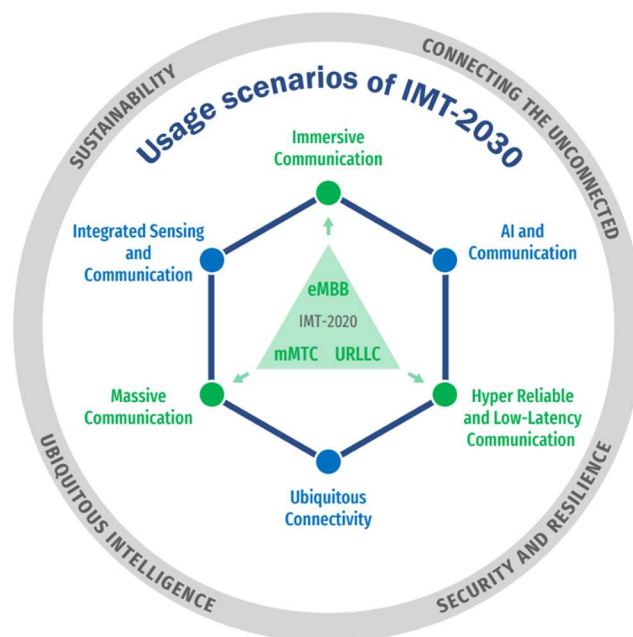
- Εφαρμογές εκτεταμένης πραγματικότητας (XR), ολογραφική επικοινωνία και πολυαισθητηριακές εμπειρίες, που απαιτούν εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση.

- ii. Κρίσιμες εφαρμογές όπως απομακρυσμένη χειρουργική ή αυτόνομα οχήματα, όπου η αξιοπιστία και η καθυστέρηση είναι καθοριστικές.
- iii. Διασύνδεση δισεκατομμυρίων συσκευών IoT με ενεργειακή αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος.
- iv. Ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης τόσο στο δίκτυο όσο και στις υπηρεσίες (AI-native networks).
- v. Καθολική κάλυψη μέσω ενοποίησης επίγειων και μη επίγειων δικτύων (NTN), όπως δορυφόροι και UAVs.

Επιπλέον, το IMT-2030 θέτει αυστηρότερους στόχους απόδοσης σε σχέση με το 5G, όπως ρυθμούς μετάδοσης της τάξης των Tbps, καθυστερήσεις κάτω του 1 ms σε κρίσιμα σενάρια, και σημαντικά βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται και στη βιωσιμότητα (sustainability), με στόχο τη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των δικτύων, καθώς και στην ασφάλεια και ιδιωτικότητα.

Τέλος, ένα από τα πιο καινοτόμα στοιχεία της σύστασης M.2160-0 είναι η έννοια της "σύγκλισης φυσικού και ψηφιακού κόσμου" (cyber-physical continuum), όπου τα δίκτυα 6G θα υποστηρίζουν εφαρμογές που αλληλεπιδρούν δυναμικά με το περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο, όπως έξυπνες πόλεις, βιομηχανία 4.0/5.0 και αυτόνομα συστήματα. Με αυτόν τον τρόπο, το 6G δεν αντιμετωπίζεται απλώς ως εξέλιξη του 5G, αλλά ως θεμελιώδης πλατφόρμα για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της κοινωνίας και της οικονομίας.

Συγκεκριμένα, η M.2160-0 ενσωματώνει τεχνολογίες όπως η ISAC, τη Διάχυτη Συνδεσιμότητα και η επικοινωνία HRLLC ως βασικούς πυλώνες του 6G. Οι δυνατότητες αυτές επιτρέπουν τη συνεχή διασύνδεση μεγάλου αριθμού συσκευών, την αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την παράλληλη χρήση του δικτύου για επικοινωνία και αισθητηριακή αντίληψη. Έτσι, η ITU θέτει το θεμέλιο για προηγμένες εφαρμογές όπως συνεργατικά ρομποτικά συστήματα, απομακρυσμένος έλεγχος, αυτόνομη πλοήγηση και υπηρεσίες κρίσιμης αποστολής σε περιβάλλοντα όπως το SAR.



Εικόνα 5-4 Το πλαίσιο της ITU για το IMT-2030 [38]

- International Standardisation Organization (ISO):

Ο ISO διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη μηχανικών, λειτουργικών και σχεδιαστικών προτύπων για τα ρομποτικά συστήματα, κυρίως μέσω των τεχνικών επιτροπών ISO/TC 299 και ISO/TC 184. Οι επιτροπές αυτές καθορίζουν κοινές προδιαγραφές που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων, όπως η δομική ακεραιότητα, η απόδοση, η αξιοπιστία και η ασφάλεια των ρομπότ, αλλά και οι αρχές σχεδιασμού που διευκολύνουν την αλληλεπίδρασή τους με ανθρώπους και άλλα συστήματα. Παράλληλα, θέτουν κατευθυντήριες γραμμές για την ορθή ενσωμάτωση των ρομποτικών εφαρμογών σε σύνθετα περιβάλλοντα αυτοματισμού, εξασφαλίζοντας ότι διαφορετικά συστήματα και τεχνολογίες μπορούν να συνεργάζονται αποτελεσματικά και χωρίς ασυμβατότητες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λειτουργική διαλειτουργικότητα, δηλαδή στην ικανότητα επικοινωνίας και συντονισμού μεταξύ ετερογενών συστημάτων, καθώς και στην ανάπτυξη ασφαλών πρωτοκόλλων λειτουργίας που μειώνουν τους κινδύνους για τον άνθρωπο και το περιβάλλον εργασίας. Μέσω αυτών των προτύπων, ο ISO συμβάλλει καθοριστικά όχι μόνο στη βελτίωση της ποιότητας και της ασφάλειας των ρομποτικών συστημάτων, αλλά και στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης της βιομηχανίας και των οργανισμών απέναντι στην υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών, διευκολύνοντας έτσι τη μετάβαση προς πιο αυτοματοποιημένα, ευέλικτα και αποδοτικά παραγωγικά και επιχειρησιακά μοντέλα.

Για τα συνεργατικά ρομπότ (CoBots), το ISO/TS 15066 αποτελεί βασικό σημείο αναφοράς, καθώς εισάγει μεθόδους φυσικής αλληλεπίδρασης ανθρώπου-ρομπότ (Human Robot Interaction - HRI). Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται ο Περιορισμός Ισχύος και Δύναμης (Power and Force Limiting – PFL), που επιτρέπει ασφαλή επαφή ανθρώπου και ρομπότ, καθώς και η Παρακολούθηση Ταχύτητας και Διαχωρισμού (Speed and Separation Monitoring – SSM), η οποία προσαρμόζει δυναμικά την κίνηση του ρομπότ ανάλογα με την παρουσία ανθρώπων στον χώρο εργασίας. Οι προδιαγραφές αυτές είναι κρίσιμες για εφαρμογές όπου απαιτείται άμεση συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και αυτόνομων μηχανών.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι επίσης το ISO 22166-1, το οποίο εισάγει κατευθυντήριες γραμμές για την αρθρωτή αρχιτεκτονική (modularity) των ρομπότ εξυπηρέτησης. Το πρότυπο αυτό στοχεύει στη δημιουργία ανοιχτών μονάδων τύπου plug-and-play, επιτρέποντας την εύκολη συναρμολόγηση εξειδικευμένων ρομπότ ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής. Παράλληλα, ενισχύει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ εξαρτημάτων διαφορετικών κατασκευαστών, διευκολύνοντας την επαναχρησιμοποίηση υποσυστημάτων και την ευρύτερη ανάπτυξη οικοσυστημάτων ρομποτικών λύσεων στην αγορά.

- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE):

Η IEEE διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην τυποποίηση τόσο των πρωτοκόλλων υλικού όσο και των στοίβων λογισμικού, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών που εκτείνονται από τη φυσική συνδεσιμότητα έως την ανώτερη σημασιολογική αναπαράσταση ρομποτικών συστημάτων (Εικόνα 5-5). Ειδικότερα, τα πρότυπα που αναπτύσσονται στο πλαίσιο της IEEE ορίζουν τις βασικές αρχές επικοινωνίας σε επίπεδο υλικού, όπως διεπαφές δικτύωσης, ασύρματες επικοινωνίες και διασύνδεση αισθητήρων και ενεργοποιητών, ενώ παράλληλα επεκτείνονται σε επίπεδο λογισμικού μέσω της τυποποίησης αρχιτεκτονικών, πρωτοκόλλων ανταλλαγής δεδομένων και middleware υποδομών. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι διαφορετικά ρομποτικά συστήματα και

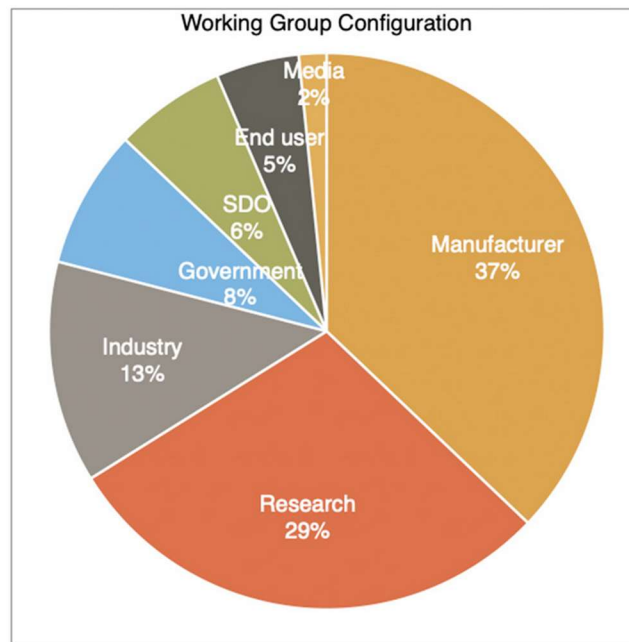
υποσυστήματα μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες με αξιόπιστο και αποδοτικό τρόπο, ανεξαρτήτως κατασκευαστή ή τεχνολογικής πλατφόρμας. Παράλληλα, η IEEE συμβάλλει στη διαμόρφωση κοινών μοντέλων αναπαράστασης γνώσης και δεδομένων, επιτρέποντας την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων εφαρμογών που βασίζονται στη σημασιολογική κατανόηση του περιβάλλοντος και στη συνεργατική λειτουργία πολλαπλών ρομπότ. Μέσω αυτών των προτύπων, ενισχύεται η διαλειτουργικότητα, η επεκτασιμότητα και η ευελιξία των ρομποτικών οικοσυστημάτων, διευκολύνοντας την ενσωμάτωσή τους σε σύγχρονες υποδομές όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και τα κυβερνοφυσικά συστήματα, και υποστηρίζοντας την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων σε βιομηχανικά και ερευνητικά περιβάλλοντα. (Εικόνα 5-5).

Στον τομέα της δικτύωσης, η οικογένεια προτύπων IEEE 802.1 TSN, όπως τα IEEE 802.1Qbv και IEEE 802.1CB, αποτελεί το *de facto* πλαίσιο για επικοινωνία πραγματικού χρόνου σε βιομηχανικά και κυβερνο-φυσικά συστήματα, εξασφαλίζοντας ντετερμινιστική καθυστέρηση, αξιόπιστη μεταφορά πακέτων και χρονικά συγχρονισμένη συμπεριφορά σε κρίσιμες εφαρμογές. Αυτές οι τεχνολογίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές για ρομποτικά περιβάλλοντα, όπου η ακρίβεια χρόνου και η προβλεψιμότητα του δικτύου επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια και την απόδοση [39].

Παράλληλα, το IEEE P1918.1 καθορίζει το θεμελιώδες πλαίσιο για το Απτικό Διαδίκτυο (Tactile Internet), επιτρέποντας εξαιρετικά χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία για εφαρμογές απομακρυσμένης αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής. Σε συνδυασμό με το IEEE 802.11bf, το οποίο εισάγει τη δυνατότητα ασύρματης αντίληψης περιβάλλοντος μέσω των Wi-Fi δικτύων, δημιουργείται ένα ισχυρό υπόβαθρο για συστήματα που μπορούν όχι μόνο να επικοινωνούν αλλά και να "αντιλαμβάνονται" το περιβάλλον τους, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως επιτήρηση, πλοήγηση και συνεργατική ρομποτική [40].

Επιπλέον, προκειμένου τα ρομποτικά συστήματα να διαθέτουν μια κοινή και τυποποιημένη "γλώσσα" αναπαράστασης, το IEEE 1872.2-2021 (Autonomous Robotics Ontology) και το IEEE 1872.1-2024 ορίζουν δομές για την αναπαράσταση γνώσης, συμπεριφοράς και εκτελούμενων εργασιών σε αυτόνομα ρομπότ. Τα πρότυπα αυτά επιτρέπουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών και την ομοιόμορφη περιγραφή ρομποτικών λειτουργιών ανεξαρτήτως κατασκευαστή [41].

Αντίστοιχα, το IEEE 2751-2025 και το υπό ανάπτυξη IEEE P3140.1 επεκτείνουν την τυποποίηση στον χώρο της χωρικής και σημασιολογικής αναπαράστασης, επιτρέποντας την περιγραφή 3D περιβαλλόντων και *semantic maps* με τρόπο που υποστηρίζει προηγμένη πλοήγηση, αντίληψη και λήψη αποφάσεων από αυτόνομα ρομπότ. Συνολικά, το οικοσύστημα των IEEE προτύπων δημιουργεί ένα ενιαίο τεχνολογικό υπόβαθρο που συνδέει δίκτυα πραγματικού χρόνου, sensing, και ρομποτική νοημοσύνη σε ένα συνεκτικό πλαίσιο.



Εικόνα 5-5 Καταμερισμός εργασίας IEEE σε τομείς [42]

2. Βιομηχανικές Ενώσεις (Industrial Associations)

Οι επαγγελματικές ενώσεις διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση στρατηγικών χαρτών πορείας (roadmaps) για την εξέλιξη της ρομποτικής και της τεχνητής νοημοσύνης, λειτουργώντας ως γέφυρα μεταξύ της βιομηχανίας, της ερευνητικής κοινότητας και των οργανισμών τυποποίησης (SDOs). Μέσω της συγκέντρωσης και ανάλυσης των αναγκών της αγοράς, μεταφέρουν κρίσιμη γνώση προς φορείς όπως ο ISO, συμβάλλοντας έτσι στη διαμόρφωση προτύπων που ανταποκρίνονται σε πραγματικές βιομηχανικές απαιτήσεις και τεχνολογικές τάσεις. Στην ευρωπαϊκή σκηνή, η euRobotics αποτελεί βασικό εταίρο της Ευρωπαϊκής Κομισιόν για την ανάπτυξη της Έρευνας και Καινοτομίας, καθορίζοντας προτεραιότητες και επενδυτικές κατευθύνσεις για τον κλάδο. Επιπλέον, η σύμπραξη AI, Data and Robotics Association (ADRA) στοχεύει στην ενίσχυση της ευρωπαϊκής κυριαρχίας στον τομέα της αξιόπιστης και ηθικής τεχνητής νοημοσύνης έως το 2030, προωθώντας τη συνεργασία μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα και υποστηρίζοντας την ανάπτυξη καινοτόμων οικοσυστημάτων. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η International Federation of Robotics (IFR) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο παρέχοντας αναλύσεις αγοράς, στατιστικά δεδομένα και προβλέψεις, τα οποία τροφοδοτούν άμεσα οργανισμούς όπως ο ISO με τεκμηριωμένες απαιτήσεις και τάσεις. Μέσω αυτής της δυναμικής αλληλεπίδρασης, οι επαγγελματικές ενώσεις συμβάλλουν όχι μόνο στον καθορισμό της τεχνολογικής κατεύθυνσης, αλλά και στη διασφάλιση ότι τα πρότυπα και οι πολιτικές ανταποκρίνονται στις πραγματικές ανάγκες της αγοράς και της κοινωνίας [5].

Παρά την πληθώρα προτύπων, εντοπίζεται ένα σοβαρό "χάσμα τυποποίησης" στην καρδιά του IoRT: ιστορικά, τα τηλεπικοινωνιακά πρότυπα (3GPP, ETSI) και τα πρότυπα ρομποτικής (ISO, IEEE RAS) εξελίσσονταν παράλληλα και ασύγχρονα, χωρίς ενιαίο συν-σχεδιασμό [5]. Σε απάντηση, η πρωτοβουλία Future Networks της IEEE INGR (International Network Generations Roadmap - INGR) προωθεί την ανάπτυξη του COPAAN (Common Operational Principles for Autonomic/Autonomous Networks - COPAAN). Το COPAAN φιλοδοξεί να αποτελέσει ένα ενοποιημένο Blueprint, το οποίο θα διασφαλίζει ότι αυτόνομα συστήματα, όπως τα δίκτυα Τεχνολογίας και Πληροφορικής Επικοινωνιών (ICT Networks) και τα Ρομποτικά Αυτόνομα Συστήματα (Robotic Autonomous Systems - RAS), θα

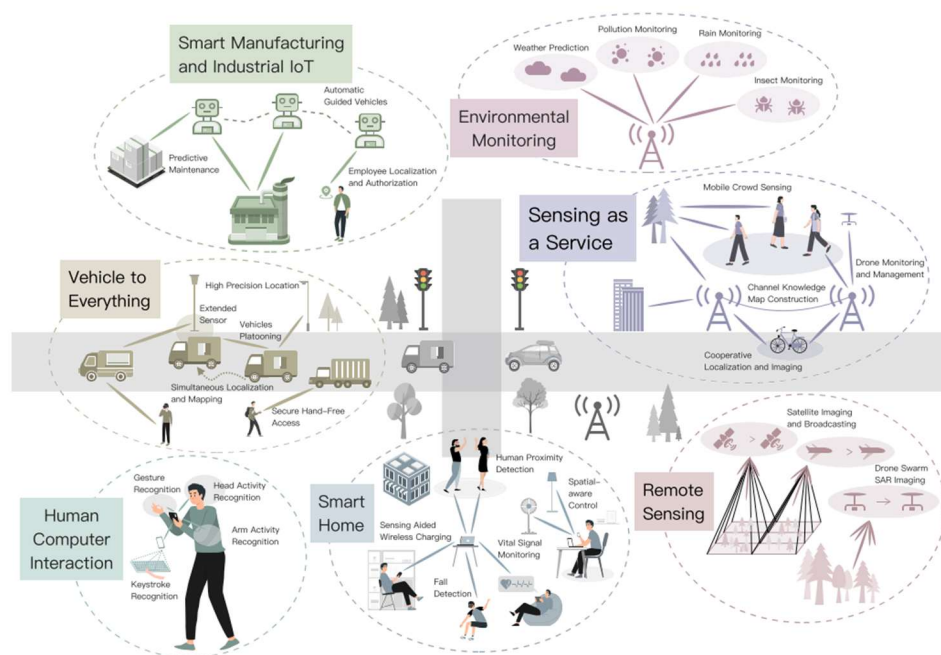
διέπονται από κοινές αρχές διαχείρισης και κοινές Διεπαφές Διακυβέρνησης. Αυτό θα επιτρέψει την εισαγωγή στόχων, προθέσεων και πολιτικών από τον άνθρωπο σε ολόκληρο το ετερογενές οικοσύστημα των συνεργαζόμενων ρομπότ. Μόνο μέσω της στενής συνεργασίας των διαφορετικών SDOs θα επιτευχθεί η αξιόπιστη και ασφαλής μετάβαση στην εποχή της συνεργατικής ρομποτικής του 6G [1].

5.2 Κατηγοριοποίηση προτύπων

Η υλοποίηση των ρομποτικών επικοινωνιών στα δίκτυα επόμενης γενιάς 5G και 6G βασίζεται σε ένα πολυδιάστατο τεχνολογικό οικοσύστημα. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στρατηγικός στόχος της ομαλής, ασφαλούς και απρόσκοπτης συνεργασίας μεταξύ ανθρώπων, μηχανών, αυτόνομων ρομπότ και τηλεπικοινωνιακών δικτύων, απαιτείται η εις βάθος τυποποίηση κάθε επιμέρους τεχνολογικού τομέα. Η τυποποίηση αυτή δεν αφορά μόνο τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, αλλά εκτείνεται στην κατανόηση του περιβάλλοντος, τη διαχείριση υπολογιστικών πόρων και την εγγύηση της ασφάλειας. Παρακάτω, τα πρότυπα κατηγοριοποιούνται και αναλύονται βάσει της τεχνολογίας την οποία εξυπηρετούν, εστιάζοντας ιδιαίτερα στην εις βάθος αντιστοίχισή τους με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ρομποτικής.

5.2.1 Τεχνολογία ISAC

Η τεχνολογία ISAC αποτελεί ίσως την πιο επαναστατική καινοτομία των δικτύων 6G. Ουσιαστικά, η ISAC μετατρέπει το ίδιο το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο σε έναν τεράστιο, κατακεντρωμένο αισθητήρα ραντάρ υψηλής ακρίβειας, ικανό να παρακολουθεί τον φυσικό κόσμο (Εικόνα 5-6). Ιστορικά, τα συστήματα ραντάρ και τα δίκτυα επικοινωνίας λειτουργούσαν σε ξεχωριστές ζώνες συχνοτήτων και χρησιμοποιούσαν ανεξάρτητο, δαπανηρό υλικό. Η ISAC ενοποιεί αυτές τις λειτουργίες, εκπέμποντας ραδιοσυχνότητες που ταυτόχρονα μεταφέρουν τηλεπικοινωνιακά δεδομένα και ανιχνεύουν το περιβάλλον μέσω της επιστροφής της ηχούς του σήματος. [43] [44]

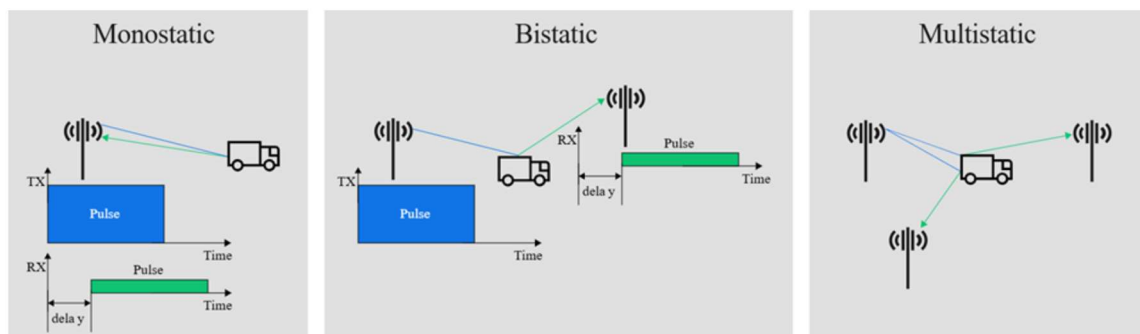


Εικόνα 5-6 Επισκόπηση των δικτύων 6G με δυνατότητα ISAC [44]

Η λειτουργία της ISAC μπορεί να αναλυθεί σε δύο θεμελιώδεις αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις, οι οποίες διαφοροποιούνται κυρίως ως προς τη γεωμετρία των κόμβων, τον τρόπο διάδοσης του σήματος και τις απαιτήσεις συγχρονισμού και επεξεργασίας. Στο πλαίσιο των μελλοντικών δικτύων 6G, οι δύο αυτές αρχιτεκτονικές δεν θεωρούνται ανταγωνιστικές αλλά συμπληρωματικές, καθώς εξυπηρετούν διαφορετικά σενάρια εφαρμογών όπως ρομποτική πλοήγηση, αυτόνομα UAVs και συστήματα επιτήρησης [43] [44].

Στη μονοστατική (monostatic) αρχιτεκτονική (Εικόνα 5-7), ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται στον ίδιο φυσικό κόμβο, δηλαδή το ίδιο σύστημα εκπέμπει το σήμα και ταυτόχρονα λαμβάνει την ανακλώμενη πληροφορία από το περιβάλλον. Τυπικά παραδείγματα αποτελούν ένα ρομπότ ή ένα drone που χρησιμοποιεί το δικό του ραδιοσύστημα για να εκπέμπει παλμούς ή OFDM σήματα και να αναλύει τις ανακλάσεις τους προκειμένου να ανιχνευθεί εμπόδια, ανθρώπους ή άλλες δυναμικές οντότητες στον χώρο. Η βασική τεχνική πρόκληση σε αυτή την περίπτωση είναι η αυτο-παρεμβολή (self-interference), καθώς το ισχυρό εκπεμπόμενο σήμα "επιστρέφει" στον δέκτη και μπορεί να καλύψει τα ασθενή ανακλώμενα σήματα στόχων. Για τον λόγο αυτό απαιτούνται προηγμένες τεχνικές ακύρωσης, όπως analog/digital cancellation, beamforming απομόνωσης και εξειδικευμένος σχεδιασμός κυματομορφών, ώστε να είναι δυνατή η αξιόπιστη εξαγωγή πληροφορίας αντίληψης σε πραγματικό χρόνο [43] [44].

Αντίθετα, στη διστατική ή πολυστατική (bistatic/multistatic) αρχιτεκτονική (Εικόνα 5-7), ο πομπός και ο δέκτης είναι χωρικά διαχωρισμένοι. Σε αυτό το σενάριο, πολλαπλοί σταθμοί βάσης, access points ή εξειδικευμένοι αισθητήρες εκπέμπουν σήματα, ενώ τα ρομποτικά συστήματα ή άλλοι δέκτες συλλέγουν τις ανακλάσεις από διαφορετικές γεωμετρικές οπτικές γωνίες. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει αυξημένη ακρίβεια στην εκτίμηση θέσης και καλύτερη κάλυψη σε σύνθετα περιβάλλοντα, όπως εσωτερικοί χώροι με εμπόδια ή αστικά περιβάλλοντα υψηλής πυκνότητας. Ωστόσο, εισάγει κρίσιμες απαιτήσεις χρονικού και χωρικού συγχρονισμού μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Συχνά απαιτείται συγχρονισμός σε πολύ υψηλή ακρίβεια (υπο-nanosecond επίπεδο), ώστε να μπορεί να υπολογιστεί σωστά ο χρόνος πτήσης του σήματος (Time of Flight – ToF), ο οποίος αποτελεί βασική παράμετρο για την εκτίμηση απόστασης και τη γεωεντόπιση των στόχων [43] [44].



Εικόνα 5-7 Αρχιτεκτονική Monostatic / Bistatic / Multistatic [45]

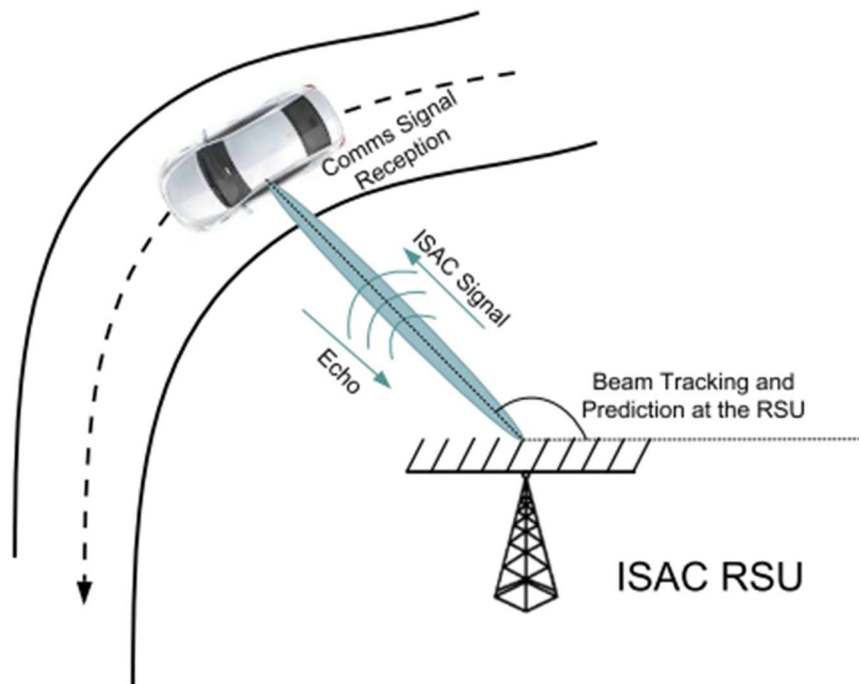
Σε επίπεδο φυσικού και σήματος, η επεξεργασία της πληροφορίας αντίληψης στην ISAC ακολουθεί τρία διαδοχικά και αλληλοσυνδεδεμένα στάδια. Το πρώτο στάδιο είναι η ανίχνευση (detection), όπου πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος υποθέσεων για την ύπαρξη ή μη στόχων στο περιβάλλον, όπως άνθρωποι, εμπόδια ή κινούμενα αντικείμενα. Σε αυτό το επίπεδο χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως

matched filtering και energy detection για τη διάκριση μεταξύ θορύβου και πραγματικών επιστροφών σήματος.

Το δεύτερο στάδιο αφορά την εκτίμηση παραμέτρων, όπου εξάγονται κρίσιμες χωρικές και κινηματικές μεταβλητές των στόχων. Συγκεκριμένα, υπολογίζονται η απόσταση μέσω χρονικής καθυστέρησης, η γωνία άφιξης (Angle of Arrival – AoA) μέσω τεχνικών array processing και beamforming, καθώς και η σχετική ταχύτητα μέσω της μετατόπισης Doppler (Εικόνα 5-8). Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων επιτρέπει τη δημιουργία ενός δυναμικού μοντέλου του περιβάλλοντος, το οποίο είναι απαραίτητο για εφαρμογές ρομποτικής αντίληψης και αυτόνομης πλοήγησης (Εικόνα 5-7).

Για την ποσοτική αξιολόγηση της ακρίβειας σε σενάρια πολλαπλών στόχων, εισάγονται εξειδικευμένες μετρικές όπως η Γενικευμένη Βέλτιστη Αντιστοίχιση Υποπροτύπων (Generalized Optimal Sub-Pattern Assignment - GOSPA). Η συγκεκριμένη μετρική συνδυάζει σε ενιαίο μαθηματικό πλαίσιο τα σφάλματα ανίχνευσης, τα σφάλματα αντιστοίχισης στόχων και τα σφάλματα θέσης, παρέχοντας έτσι μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος παρακολούθησης. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται περιορισμοί απλούστερων metrics που δεν μπορούν να αποτυπώσουν επαρκώς την πολυπλοκότητα δυναμικών περιβαλλόντων [46].

Το τρίτο στάδιο είναι η αναγνώριση και χαρτογράφηση, όπου τα δεδομένα που έχουν εξαχθεί από τα προηγούμενα στάδια τροφοδοτούνται σε αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης. Σε αυτό το επίπεδο πραγματοποιείται ταξινόμηση στόχων, αναγνώριση αντικειμένων και σύνθεση τρισδιάστατων (3D) ή ακόμη και σημασιολογικών χαρτών (semantic maps), οι οποίοι δεν περιγράφουν μόνο τη γεωμετρία του χώρου αλλά και τη σημασία των αντικειμένων μέσα σε αυτόν. Η τελική αυτή αναπαράσταση επιτρέπει σε ρομποτικά συστήματα να λαμβάνουν αποφάσεις υψηλού επιπέδου, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως αυτόνομη πλοήγηση, συνεργατική ρομποτική και αποστολές search and rescue σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα.



Εικόνα 5-8 Ανίχνευση ISAC [44]

Η πρακτική αξιοποίηση των παραπάνω δυνατοτήτων απαιτεί την ύπαρξη κοινά αποδεκτών αρχιτεκτονικών, μετρικών και λειτουργικών απαιτήσεων, γεγονός που έχει οδηγήσει στην εντατική δραστηριοποίηση των οργανισμών τυποποίησης γύρω από την ISAC. Στο πλαίσιο αυτό, τα SDOs έχουν εισαγάγει μια σειρά τεχνικών αναφορών και προδιαγραφών που καθορίζουν τις λειτουργίες, τις απαιτήσεις και τα σενάρια χρήσης ISAC συστημάτων (Πίνακας 5-1). Πιο συγκεκριμένα:

- 3GPP TR 22.837 & TS 22.137:

Τα κείμενα αυτά (Release 19) αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της τυποποίησης της ISAC από την πλευρά των τηλεπικοινωνιών. Η τεχνική αναφορά TR 22.837 αναλύει λεπτομερώς τη σκοπιμότητα της ISAC και καθορίζει απαιτήσεις για σενάρια δημόσιας ασφάλειας, όπως η έρευνα και διάσωση (SAR) [30]. Συγκεκριμένα, εξετάζει πώς τα ρομπότ και τα αυτόνομα οχήματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το δίκτυο ως αισθητήρα για την πλοήγησή τους όταν δεν εξυπηρετούνται άμεσα από το δίκτυο ραδιοπρόσβασης. Στις ομάδες εργασίας οι προδιαγραφές επεκτάθηκαν για να συμπεριλάβουν την ανίχνευση πεζών/ζώων σε αυτοκινητόδρομους, ακόμη και την παρακολούθηση βροχόπτωσης, ορίζοντας με ακρίβεια τις έννοιες του "πομπού αντίληψης" και του "δέκτη αντίληψης" ως οντότητες που μπορεί να είναι είτε κόμβοι του δικτύου είτε τα ίδια συσκευές χρήστη (User Equipments - UEs) [47]. Το TS 22.137 προχωρά ένα βήμα παραπέρα, καθορίζοντας τις αυστηρές απαιτήσεις υπηρεσιών για συστήματα 5G-Advanced που ενσωματώνουν τεχνολογία ISAC [48].

- ETSI GR ISC 001:

Το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων ETSI ανταποκρίθηκε στις ανάγκες της τεχνολογίας δημιουργώντας την ομάδα εργασίας ISG ISAC. Το πρότυπο GR ISC 001 προδιαγράφει εξειδικευμένες περιπτώσεις χρήσης της ISAC στην Ευρώπη, επεκτείνοντας τη χρήση σε τομείς όπως η εξωτερική παρακολούθηση υγείας και, κυρίως, ο εξαιρετικά ακριβής εντοπισμός θέσης που απαιτείται για τη ρομποτική σύλληψη και τη λεπτή μετακίνηση αντικειμένων [34] [43].

- ITU-R M.2160-0:

Το έγγραφο για τα δίκτυα IMT-2030 (6G). Καθιερώνει επίσημα την ISAC ως έναν από τους έξι βασικούς πυλώνες του 6G, τοποθετώντας την "αντίληψη" στο ίδιο επίπεδο επιχειρησιακής σπουδαιότητας με την "επικοινωνία" [49]. Μέσα από την ISAC, η ITU προβλέπει δημιουργία 3D χαρτών υψηλής ανάλυσης για τη δημιουργία Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) [38].

- IEEE 802.11bf (WirelessLAN Sensing):

Στον τομέα των τοπικών δικτύων, το πρότυπο αυτό μεταφέρει τη λογική της ISAC στο Wi-Fi. Επιτρέπει σε ασύρματες συσκευές να λειτουργούν ως συστήματα ραντάρ για την ανίχνευση κίνησης, την αναγνώριση χειρονομιών και την παρακολούθηση ανθρώπων στον χώρο, προσφέροντας στα ρομπότ εσωτερικού χώρου μια επιπλέον στρώση περιβαλλοντικής αντίληψης χωρίς την ανάγκη οπτικών καμερών [44] [50].

- Οντολογίες IEEE RAS (1872.2-2021, 2751-2025, P3140.1):

Η συλλογή δεδομένων αντίληψης από το δίκτυο είναι άχρηστη εάν τα ρομπότ δεν μπορούν να την κατανοήσουν και να την επεξεργαστούν σημασιολογικά. Το πρότυπο IEEE 1872.2-2021 (Autonomous Robotics Ontology) ορίζει ένα αυστηρό λεξιλόγιο για την αναπαράσταση του χώρου και των αντικειμένων, εξαλείφοντας τις ασάφειες μεταξύ διαφορετικών κατασκευαστών. [51] [52]

Αντίστοιχα, το IEEE 2751-2025 τυποποιεί τον τρόπο με τον οποίο τα τρισδιάστατα χωρικά δεδομένα που συλλέγονται από την ISAC μοντελοποιούνται και ανταλλάσσονται. Τέλος, το υπό ανάπτυξη IEEE P3140.1 (Semantic Maps for Autonomous Robots) καθορίζει τις απαιτήσεις ώστε οι χάρτες να περιέχουν "σημασία" (π.χ. αναγνωρίζοντας έναν τοίχο ή μια πόρτα), επιτρέποντας την απρόσκοπτη ανταλλαγή δεδομένων αντίληψης μεταξύ του δικτύου 6G και των ρομποτικών εγκεφάλων [41] [52].

Πίνακας 5-1: Αντιστοίχιση προτύπων SDO - ISAC

	3GPP	ETSI	IEEE	ITU
ISAC	TR 22.837	GR ISC 001	IEEE 802.11bf IEEE 1872	ITU-R M.2160-0

Η εκτεταμένη αυτή τυποποίηση μετασχηματίζει τα ρομπότ από τυφλές μονάδες σε οντότητες πλήρως ενσωματωμένες στον χώρο. Για εφαρμογές όπως η Έρευνα και Διάσωση, όπου οι κάμερες αχρηστεύονται από τον καπνό και το σήμα GNSS δεν διαπερνά τα κτίρια, ο συνδυασμός αυτών των προτύπων επιτρέπει στο ρομπότ να "βλέπει" μέσω ραδιοκυμάτων και να διαβάζει τα δεδομένα του δικτύου ως δομημένους σημασιολογικούς χάρτες.

5.2.2 Τεχνολογίες Επικοινωνίας

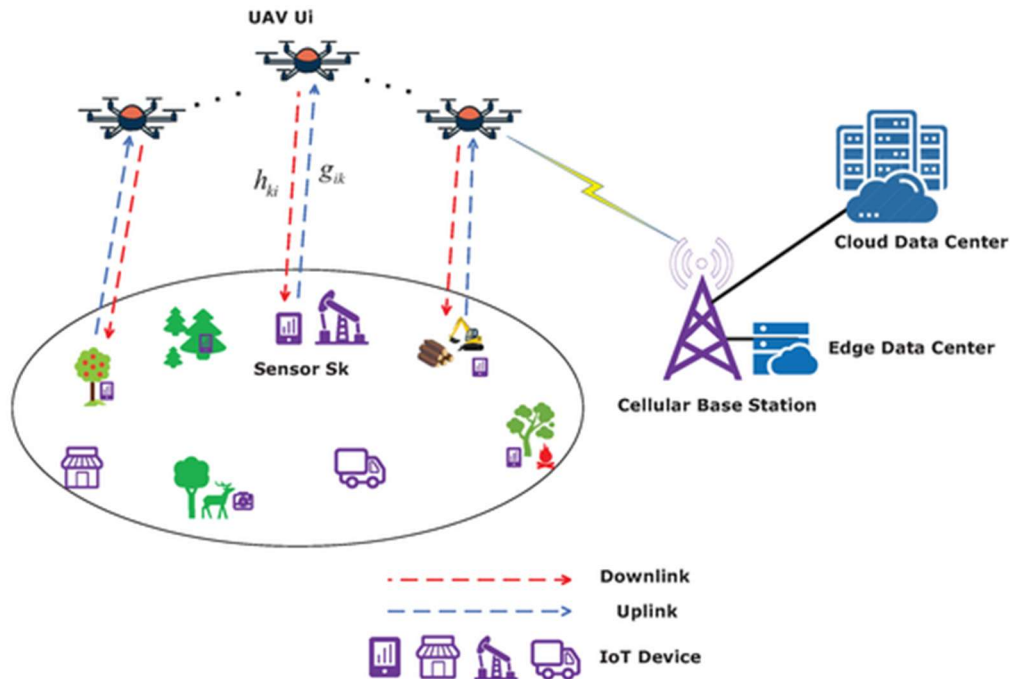
Η συνεργασία πολλαπλών αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων σε σενάρια Swarm Robotics, όπως η βιομηχανική εφοδιαστική αλυσίδα, η αποθήκευση/διαχείριση logistics ή οι αποστολές έκτακτης ανάγκης, προϋποθέτει μια μορφή επικοινωνίας που δεν βασίζεται σε ιεραρχικά κεντρικοποιημένα δίκτυα αλλά σε άμεση, χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας Robot-to-Robot αλληλεπίδραση. Σε τέτοιες αποστολές, ο χρόνος αντίδρασης είναι κρίσιμος παράγοντας, καθώς ακόμη και μικρές καθυστερήσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μη συγχρονισμένες κινήσεις, συγκρούσεις ή απώλεια συντονισμού του σμήνους.

Στα παραδοσιακά κυψελοειδή δίκτυα, η επικοινωνία μεταξύ δύο ρομπότ ακολουθεί μια έμμεση και συχνά μη αποδοτική διαδρομή: τα δεδομένα από το Ρομπότ Α αποστέλλονται μέσω ζεύξης (uplink) προς τον σταθμό βάσης, στη συνέχεια δρομολογούνται μέσω του δικτύου κορμού (core network), υφίστανται επεξεργασία ή δρομολόγηση και τελικά επιστρέφουν μέσω ζεύξης (downlink) στο Ρομπότ Β (Εικόνα 5-9). Αυτή η διαδικασία εισάγει σημαντική καθυστέρηση (latency), αυξημένο signaling overhead και εξάρτηση από τη διαθεσιμότητα της υποδομής δικτύου, γεγονός που καθιστά την προσέγγιση ανεπαρκή για πραγματικό χρόνο συντονισμό πολλαπλών ρομπότ [53].

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, η τεχνολογία Sidelink εισάγει ένα θεμελιώδες παράδειγμα άμεσης επικοινωνίας, επιτρέποντας ισότιμη επικοινωνία (peer-to-peer) και ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών χωρίς τη μεσολάβηση σταθμού βάσης ή δίκτυο κορμού. Με τον τρόπο αυτό, τα ρομπότ μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες όπως θέση, ταχύτητα, αισθητηριακά δεδομένα και εντολές ελέγχου σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας δραστικά την καθυστέρηση και αυξάνοντας την ανθεκτικότητα του συστήματος σε αποτυχίες υποδομής.

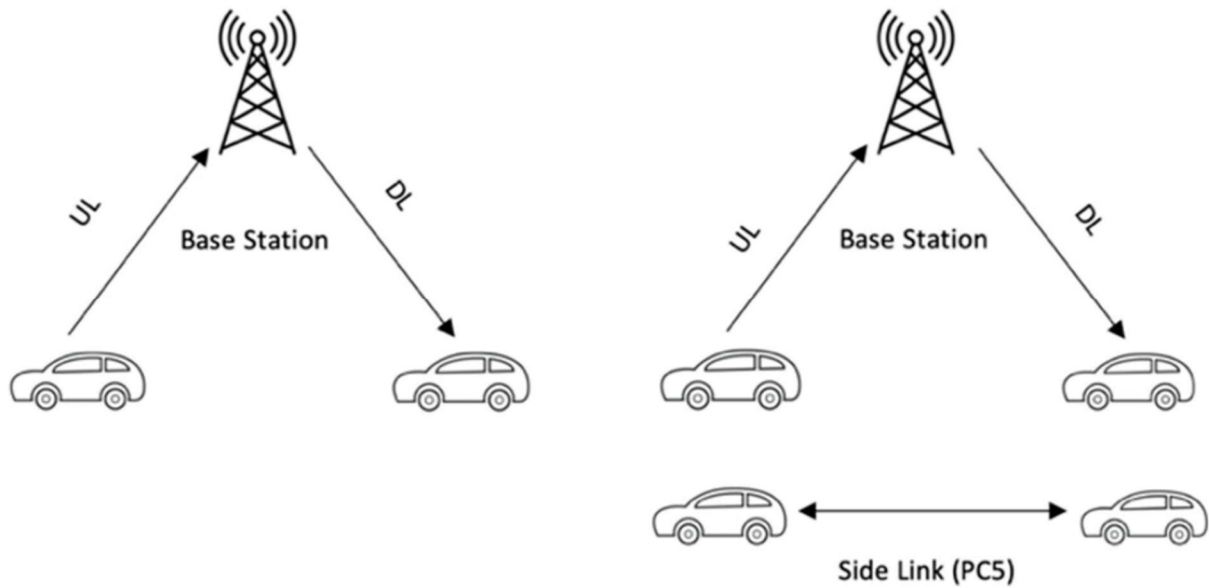
Η λειτουργία του Sidelink υποστηρίζει τρεις βασικούς τύπους επικοινωνίας, οι οποίοι έχουν ιδιαίτερη σημασία για ρομποτική σμήνη. Στην μονόδρομη (unicast) επικοινωνία, η επικοινωνία πραγματοποιείται μεταξύ δύο συγκεκριμένων ρομπότ, επιτρέποντας εξαιρετικά ακριβή συγχρονισμό, όπως για παράδειγμα μεταξύ ενός ρομπότ-ηγέτη και ενός ρομπότ-ακόλουθου σε σχηματισμό κίνησης ή σε συνεργατική μεταφορά αντικειμένων. Στην ομαδική επικοινωνία (Groupcast), η επικοινωνία

επεκτείνεται σε μια προκαθορισμένη υπο-ομάδα του σμήνους, επιτρέποντας τον συντονισμό πολλαπλών ρομπότ ταυτόχρονα, κάτι κρίσιμο για επιχειρήσεις όπως συντονισμένη χαρτογράφηση ή συλλογική μετακίνηση εμπορευμάτων. Τέλος, στην επικοινωνία προς όλους (Broadcast), ένα ρομπότ μπορεί να εκπέμψει πληροφορίες προς όλα τα υπόλοιπα, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για μηνύματα ασφαλείας, συναγερμούς ή αλλαγές κατάστασης του περιβάλλοντος σε αποστολές έκτακτης ανάγκης [53].



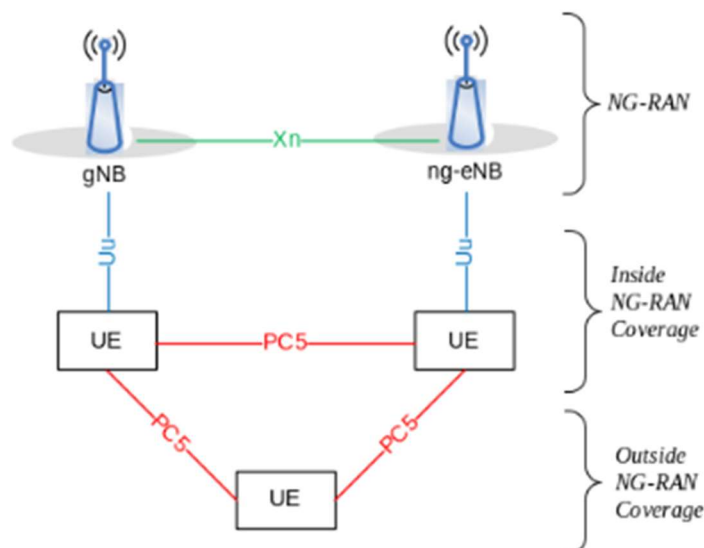
Εικόνα 5-9 Ζεύξη ανόδου(uplink) και ζεύξη καθόδου(downlink) [54]

Η κατανομή πόρων στο Sidelink πραγματοποιείται μέσω δύο λειτουργικών μοντέλων (modes), τα οποία καθορίζουν τον βαθμό κεντροποίησης του συστήματος. Στο Mode 1, ο σταθμός βάσης διατηρεί τον έλεγχο της κατανομής πόρων ραδιοφάσματος και προγραμματίζει τις επικοινωνίες μεταξύ των ρομπότ, εξασφαλίζοντας αποδοτική χρήση του φάσματος και αποφυγή συγκρούσεων πακέτων. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση εξακολουθεί να εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δικτύου και υποδομής. Αντίθετα, στο Mode 2, τα ίδια τα ρομπότ αναλαμβάνουν τον εντοπισμό διαθέσιμων πόρων μέσω ανίχνευσης φάσματος (spectrum sensing) και επιλέγουν αυτόνομα κανάλια μετάδοσης χωρίς καμία κεντρική καθοδήγηση (Εικόνα 5-10). Αυτή η αποκεντρωμένη προσέγγιση είναι καθοριστική σε περιβάλλοντα όπου η υποδομή δικτύου είναι ανύπαρκτη ή κατεστραμμένη, όπως σε φυσικές καταστροφές ή αποστολές SAR, καθιστώντας το Mode 2 θεμελιώδες για πλήρως αυτόνομα ρομποτικά σμήνη [53].



Εικόνα 5-10 Τρόποι sidelink επικοινωνίας [55]

Πέρα από την απλή ανταλλαγή δεδομένων, το Sidelink επεκτείνεται και στον τομέα της ακριβούς εντοπισμού θέσης μέσω του πρωτοκόλλου εντοπισμού θέσης μέσω (Sidelink Positioning Protocol - SLPP). Μέσω της ανταλλαγής ειδικών σημάτων αναφοράς, τα ρομπότ μπορούν να εκτιμήσουν με υψηλή ακρίβεια τη σχετική γεωμετρία μεταξύ τους. Οι βασικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τον Χρόνο Άφιξης (Time of Arrival – ToA), τη Διαφορά Χρόνου Άφιξης (Time Difference of Arrival – TDoA) και τον Χρόνο Επιστροφής (Round Trip Time – RTT). Οι μετρήσεις αυτές επιτρέπουν όχι μόνο τον υπολογισμό αποστάσεων με ακρίβεια εκατοστού, αλλά και την επέκταση της λειτουργικότητας σε περιβάλλοντα χωρίς οπτική επαφή (Non-Line-of-Sight – NLoS), ενισχύοντας σημαντικά την αξιοπιστία της συνεργατικής πλοήγησης και του σχηματισμού σμήνους.



Εικόνα 5-11 Επικοινωνία Sidelink [56]

Οι δυνατότητες αυτές δεν περιορίζονται μόνο στο φυσικό επίπεδο εντοπισμού και επικοινωνίας, αλλά επεκτείνονται και στο επίπεδο εφαρμογής, όπου απαιτείται ο συντονισμός, η διαχείριση και η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ πολλαπλών συνεργατικών ρομπότ. Για τον σκοπό αυτό, τα SDOs εισάγουν εξειδικευμένες αρχιτεκτονικές που επιτρέπουν τη δυναμική οργάνωση και υποστήριξη σμηνών ρομπότ σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως οι επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (Πίνακας 5-2). Πιο συγκεκριμένα:

- 3GPP TS 23.286 (Release 17/18/19):

Το πρότυπο αυτό αποτελεί ένα έργο για την υποστήριξη του επιπέδου εφαρμογής (Application Layer) των υπηρεσιών V2X. Στον τομέα της ρομποτικής, το πρότυπο αυτό είναι ζωτικής σημασίας καθώς ορίζει την αρχιτεκτονική του V2X Application Enabler. Εισάγει τη Δυναμική Διαχείριση Ομάδων (Dynamic Group Management), η οποία επιτρέπει σε σμήνη ρομπότ να δημιουργούνται αυτόματα στο πεδίο μιας καταστροφής. Ορίζει σαφείς διαδικασίες για την εγγραφή, την αποχώρηση μελών και τον έλεγχο ταυτότητας μεταξύ των οντοτήτων. Επιπρόσθετα, παρέχει εξειδικευμένα APIs για τη διανομή αρχείων επιτρέποντας για παράδειγμα την ακαριαία αποστολή ενημερωμένων, βαρέων τοπικών χαρτών (HD Maps) μεταξύ όλων των ρομπότ μιας ομάδας. [57] [53] [58].

- 3GPP TS 23.287:

Τυποποιεί τις υπηρεσίες V2X στο επίπεδο δικτύου (network layer), παρέχοντας τη βασική αρχιτεκτονική που απαιτείται για τη δρομολόγηση των πακέτων PC5, την οποία εκμεταλλεύεται ευρέως η δικτύωση πολλαπλών ρομπότ (multi-robot systems) [57] [53] [59].

- 3GPP TS 38.300 & ETSI TS 138 355 (SLPP):

Το TS 38.300 περιγράφει τη γενική αρχιτεκτονική ραδιοπρόσβασης του New Radio (New Radio - NR) Sidelink. Η τεράστια καινοτομία όμως έρχεται με το TS 138 355 (Release 18), το οποίο τυποποιεί λεπτομερώς την τεχνολογία SLPP. Το πρωτόκολλο αυτό καθορίζει τις ακριβείς διαδικασίες ανταλλαγής μηνυμάτων και μετρήσεων για τον εντοπισμό θέσης (όπως η παροχή δεδομένων υποβοήθησης και η αναφορά μετρήσεων) μεταξύ των UEs. Επιτρέπει τη μέτρηση θέσης μεταξύ των συσκευών για την πλοήγηση σμηνών ρομπότ σε υπόγεια ορυχεία ή κατεστραμμένα κτίρια [57] [60].

- ITU-R M.1890-1:

Προσδιορίζει τους γενικότερους επιχειρησιακούς στόχους και τις απαιτήσεις των ευφυών συστημάτων ρομπότ προς ρομπότ (Robot 2 Robot - R2R) και V2X, εξασφαλίζοντας ένα παγκόσμιο πλαίσιο συμβατότητας των επικοινωνιών αυτών [61].

Πίνακας 5-2 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – Τεχνολογίες Επικοινωνίας

	3GPP	ETSI	IEEE	ITU
Τεχνολογίες	TS 23.286			ITU-R
Επικοινωνίας	TS 23.287	TS 138.355	-	M.1890
(Sidelink,R2R)	TS 38.300			

Συνοψίζοντας, η ολοκληρωμένη τυποποίηση του Sidelink, από το φυσικό επίπεδο έως το επίπεδο εφαρμογής (TS 23.286), είναι ο λόγος που τα σημερινά ρομπότ μπορούν να λειτουργήσουν ως πραγματικά αυτόνομα "σμήνη" (swarms). Διασφαλίζει ότι ακόμη και αν το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας καταρρεύσει, μια ομάδα ρομπότ μπορεί να δημιουργήσει δυναμικά ένα τοπικό δίκτυο, να συγχρονίσει

τις θέσεις της, να μοιραστεί χάρτες και να ολοκληρώσει αποστολές διάσωσης χωρίς ανθρώπινη ή δικτυακή παρέμβαση.

5.2.3 Τεχνολογίες Δικτύου

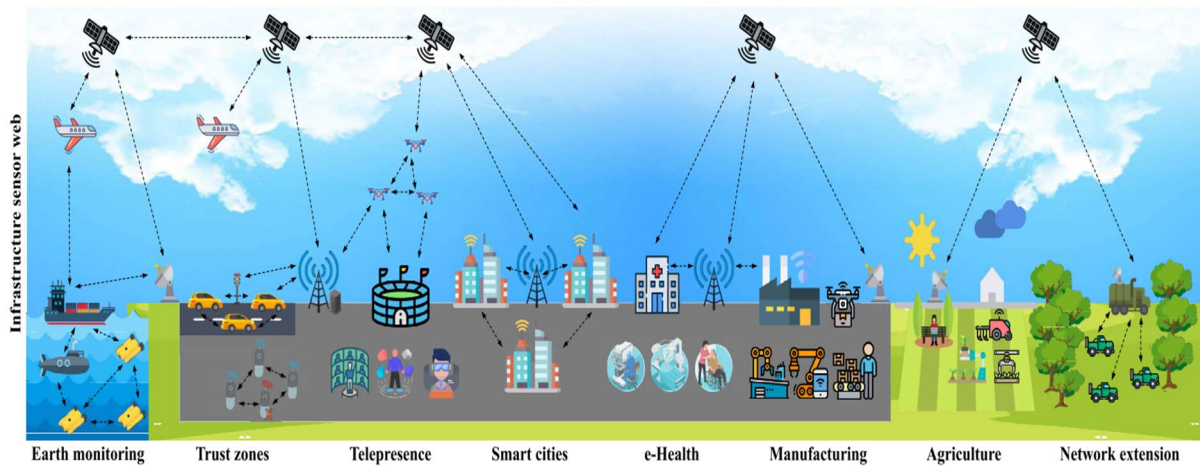
Ο ασύρματος έλεγχος ρομποτικών συστημάτων αποτελεί μία από τις πλέον απαιτητικές κατηγορίες τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, καθώς η ορθή λειτουργία του εξαρτάται άμεσα από την αυστηρή χρονική συνέπεια του δικτύου. Σε αντίθεση με συμβατικές υπηρεσίες δεδομένων, όπου μικρές καθυστερήσεις ή επαναμεταδόσεις είναι αποδεκτές, στα ρομποτικά συστήματα κάθε πακέτο ελέγχου πρέπει να φτάνει στον ακριβή χρόνο που προβλέπεται. Η απαίτηση αυτή περιγράφεται από την έννοια του ντετερμινισμού (determinism), δηλαδή της δυνατότητας του δικτύου να προσφέρει απολύτως προβλέψιμη καθυστέρηση και ελάχιστη χρονική διακύμανση (jitter), ανεξάρτητα από τον φόρτο ή τις συνθήκες λειτουργίας [1] [62].

Η ανάγκη αυτή είναι κρίσιμη σε εφαρμογές όπου οι εντολές ελέγχου πρέπει να εκτελούνται συγχρονισμένα σε πραγματικό χρόνο, όπως σε συνεργατικούς βραχίονες παραγωγής, αυτόνομα οχήματα ή σμήνη ρομπότ. Ακόμη και μικρές αποκλίσεις στην άφιξη πακέτων μπορούν να προκαλέσουν αστοχίες, απώλεια συγχρονισμού ή επικίνδυνες μηχανικές αποκρίσεις, ιδιαίτερα όταν πολλαπλά ρομπότ εκτελούν κοινές φυσικές εργασίες. Για τον λόγο αυτό, τα δίκτυα επόμενης γενιάς δεν αρκεί να είναι απλώς γρήγορα· πρέπει να είναι χρονικά εγγυημένα [1] [62].

Η URLLC, που εισήχθη από την 3GPP στο 5G, αποτέλεσε το πρώτο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση, προσφέροντας θεωρητικά καθυστερήσεις της τάξης του 1 ms και αξιοπιστία 99.999%. Παρότι επαρκής για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, η URLLC θεωρείται περιορισμένη για τις πιο απαιτητικές περιπτώσεις 6G ρομποτικής, όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικών μηχανών και δικτύου είναι συνεχής, συμμετρική και εξαιρετικά ευαίσθητη στον χρόνο [1] [62].

Για αυτό το λόγο, το όραμα του 6G εισάγει την αρχιτεκτονική HURLLC, η οποία επεκτείνει σημαντικά τις επιδόσεις της URLLC. Η HURLLC στοχεύει σε καθυστερήσεις κάτω από 0.1 ms, δηλαδή σε επίπεδο μικροδευτερολέπτων, ενώ παράλληλα αυξάνει την αξιοπιστία σε επίπεδο "επτά εννιάριων" (99.99999%). Αυτές οι απαιτήσεις είναι απαραίτητες σε εφαρμογές όπως ο συγχρονισμός πολλών ρομποτικών βραχιόνων που μεταφέρουν από κοινού ένα φορτίο, η συνεργατική χειρουργική ή η τηλεχειριζόμενη επέμβαση σε επικίνδυνα περιβάλλοντα. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οποιαδήποτε καθυστέρηση μπορεί να μετατραπεί άμεσα σε φυσικό σφάλμα ή απώλεια ασφάλειας [1].

Ένα από τα βασικά προβλήματα είναι ότι τα ρομποτικά δίκτυα σπάνια λειτουργούν απομονωμένα. Συνήθως συνυπάρχουν με πλήθος εμπορικών υπηρεσιών, όπως μετάδοση βίντεο, IoT αισθητήρες, εφαρμογές νέφους ή υπηρεσίες παρακολούθησης (Εικόνα 5-12), οι οποίες ανταγωνίζονται για τους ίδιους πόρους. Για να διασφαλιστεί ότι η κίνηση ελέγχου των ρομπότ δεν θα επηρεαστεί από τέτοια φορτία, χρησιμοποιείται η τεχνική του τεμαχισμού δικτύου (Network Slicing), η οποία αποτελεί βασικό δομικό στοιχείο των 5G και 6G αρχιτεκτονικών.



Εικόνα 5-12 Επισκόπηση δικτυακών τεχνολογιών για 6G ρομποτικές εφαρμογές [62]

Ο τεμαχισμός δικτύου επιτρέπει τον λογικό διαχωρισμό των φυσικών πόρων του δικτύου, όπως το διαθέσιμο εύρος ζώνης, η υπολογιστική ισχύς και οι δικτυακές διαδρομές, σε ανεξάρτητα εικονικά τμήματα (slices). Έτσι, μπορεί να δημιουργηθεί ένα αποκλειστικό τμήμα (slice) αφιερωμένο αποκλειστικά στον έλεγχο των ρομπότ, με αυστηρά εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας. Ακόμη και αν το υπόλοιπο δίκτυο υπερφορτωθεί από βίντεο ή μαζική κίνηση δεδομένων, η ρομποτική φέτα παραμένει ανεπηρέαστη, εξασφαλίζοντας συνεχή λειτουργία [62] [63].

Στα τοπικά και ενσύρματα δίκτυα βιομηχανικού ελέγχου, η επίτευξη ντετερμινισμού αντιμετωπίζεται μέσω της οικογένειας προτύπων IEEE 802.1 TSN. Το TSN μετασχηματίζει το παραδοσιακό Ethernet, το οποίο βασίζεται σε μετάδοση με υπηρεσία "καλύτερης προσπάθειας" (best effort), σε αυστηρά χρονοπρογραμματισμένο δίκτυο (Εικόνα 5-13). Μέσω τεχνικών όπως χρονικός προγραμματισμός πακέτων, συγχρονισμός ρολογιών και επαναληπτικές διαδρομές, επιτρέπει την αξιόπιστη μεταφορά κρίσιμης κίνησης με απόλυτα προβλέψιμο χρόνο άφιξης [62] [63].

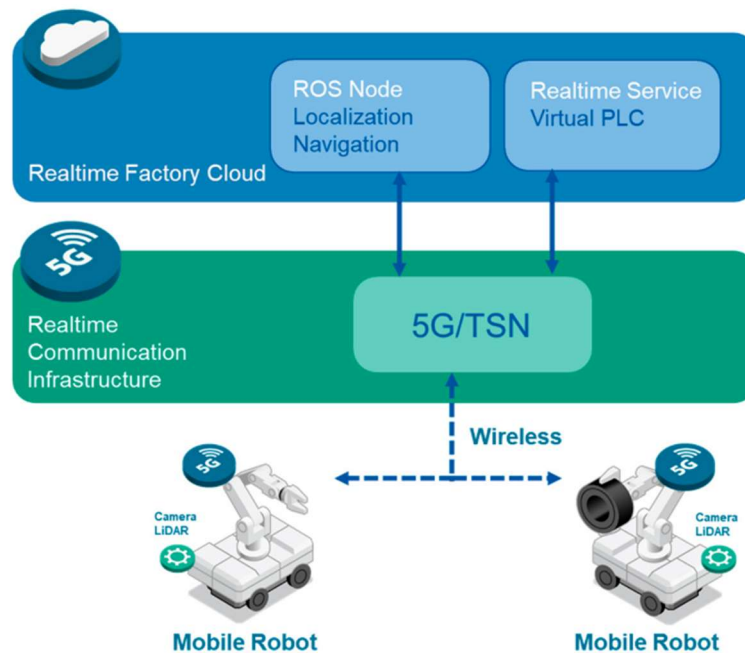
Αντίστοιχα, στον ασύρματο τοπικό χώρο, η επόμενη γενιά Wi-Fi, γνωστή ως Wi-Fi 8, στοχεύει στην υποστήριξη εξαιρετικά αξιόπιστων εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Η εξέλιξη αυτή βασίζεται σε ριζικές αλλαγές στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης, με νέα σχήματα χρονο-προγραμματισμού, συντονισμένη πρόσβαση και βελτιωμένη διαχείριση παρεμβολών. Η προσέγγιση αυτή καθιστά το Wi-Fi 8 πιθανό συμπληρωματικό δίκτυο για τοπικό έλεγχο συνεργατικών ρομπότ, ιδιαίτερα σε βιομηχανικούς ή εσωτερικούς χώρους όπου απαιτείται συνδυασμός ευελιξίας και χαμηλής καθυστέρησης.

Οι παραπάνω μηχανισμοί απομόνωσης πόρων και χρονικά ντετερμινιστικής επικοινωνίας αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ασφαλή λειτουργία συνεργατικών ρομποτικών συστημάτων σε κρίσιμα περιβάλλοντα. Η ανάγκη αυτή έχει οδηγήσει τα SDO στον καθορισμό εξαιρετικά αυστηρών απαιτήσεων αξιοπιστίας, διαθεσιμότητας και καθυστέρησης για εφαρμογές ελέγχου (Πίνακας 5-3). Πιο συγκεκριμένα:

- 3GPP TS 22.104 (Release 19):

Καθορίζει τις εξαιρετικά αυστηρές απαιτήσεις υπηρεσιών (service requirements) ειδικά για εφαρμογές κυβερνο-φυσικού ελέγχου σε κάθετους τομείς. Το πρότυπο επιβάλλει, μεταξύ άλλων,

τη διασφάλιση αδιάλειπτης διαθεσιμότητας των επικοινωνιών ελέγχου ακόμη και κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, θέτοντας τα θεμέλια για τις URLLC/URLLC [28].



Εικόνα 5-13 TSN τεχνολογία [64]

- 3GPP TS 23.501, TS 23.502, TS 23.503:

Η ραχοκοκαλιά του ελέγχου QoS και του Network Slicing στο 5G Core. Το TS 23.501 (System Architecture) περιγράφει τη δομή για την υποστήριξη της URLLC και της δικτύωσης, ενώ το TS 23.502 αναλαμβάνει τις διαδικασίες διαχείρισης κινητικότητας (Mobility Management) (ώστε να μην χάνονται πακέτα όταν το ρομπότ κινείται). Ειδικά το TS 23.503 (Policy and Charging Control) ορίζει το αυστηρό πλαίσιο πολιτικών ελέγχου, δίνοντας απόλυτη προτεραιότητα και δρομολόγηση στα πακέτα ελέγχου των ρομπότ έναντι της τυπικής IP κίνησης διαδικτύου [32] [65].

- IEEE P802.11bn (Wi-Fi 8):

Το επερχόμενο πρότυπο για τα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Στοχεύει να προσφέρει στα βιομηχανικά ρομπότ αξιοπιστία επιπέδου καλωδίου (99.999%), μέσω καινοτομιών όπως οι Κατανεμημένες Μονάδες Πόρων (Distributed Resource Units - DRUs), οι οποίες κατανέμουν τους υποφορείς σε ευρύτερο φάσμα για αντοχή σε παρεμβολές. Εισάγει επίσης τεχνικές κωδικοποίησης που προσφέρουν κέρδος σήματος/θορύβου (Signal to Noise Ratio – SNR) της τάξης του 1 dB, και νέους μηχανισμούς διαμόρφωσης που φτάνουν έως 4096-QAM. Επιπλέον, ο αλγόριθμος Πρόσβασης στο δευτερεύον κανάλι (Non-Primary Channel Access - NPCA) επιτρέπει δυναμική, στιγμιαία εναλλαγή καναλιών για την αποφυγή συμφορήσεων στο πρωτεύον κανάλι, καθιστώντας το Wi-Fi κατάλληλο για έλεγχο ρομπότ [50].

- IEEE 802.1 TSN (Time-Sensitive Networking):

Η οικογένεια προτύπων που εξασφαλίζει απόλυτα ντετερμινιστική ενσύρματη δικτύωση (π.χ. για τον εσωτερικό έλεγχο των σερβοκινητήρων ενός βιομηχανικού ρομπότ). Περιλαμβάνει κρίσιμες προδιαγραφές όπως το 802.1Qbv (Time-Aware Shaper), που επιτρέπει προγραμματισμένη

μετάδοση (time-slots), κρατώντας ανοιχτές θυρίδες χρόνου στους μεταγωγείς (switches) αποκλειστικά για τα δεδομένα ελέγχου, και το 802.1CB, που εγγυάται μηδενική απώλεια πακέτων μέσω διπλασιασμού της μετάδοσης (Frame Replication and Elimination) σε ανεξάρτητα μονοπάτια του δικτύου [39].

- ETSI GS ZSM 003 & ETSI GR THz 001 :

Το πρότυπο ETSI ZSM 003 τυποποιεί την από-άκρο-σε-άκρο (end-to-end) διαχείριση και αυτοματοποιημένη εντοπιστική του Network Slicing, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης (Zero-touch management). Παράλληλα, το ETSI GR THz 001 αναγνωρίζει τα συνεργατικά ρομποτ, τον βιομηχανικό έλεγχο σε πραγματικό χρόνο και την τεχνολογία SLAM ως βασικές περιπτώσεις χρήσης των THz δικτύων 6G, υποδεικνύοντας τη σημασία των THz τεχνολογιών για μελλοντικά ρομποτικά συστήματα υψηλής ακρίβειας και χαμηλής καθυστέρησης [35].

- ITU-T Y.3112 & ITU-R M.2410-0

Το ITU-T Y.3112 παρέχει το θεσμικό πλαίσιο υποστήριξης του Slicing στα δίκτυα κορμού IMT-2020 ενώ οι απαιτήσεις αξιοπιστίας και καθυστέρησης (latency) που ορίζονται στο ITU-R M.2410-0 αποτελούν θεμέλιο για τη μετέπειτα ανάπτυξη δικτύων 5G/6G που υποστηρίζουν συνεργατική ρομποτική και απαιτητικές SAR εφαρμογές [66] [67].

Η συνεργασία αυτών των προτύπων διασφαλίζει ότι, σε ένα περιβάλλον ή σε ένα χειρουργείο, η εντολή κίνησης ή φρεναρίσματος προς ένα ρομπότ δεν θα μπει ποτέ σε ουρά αναμονής. Η 100% προβλεψιμότητα (ντετερμινισμός) που επιβάλλουν το TSN και το TS 22.104 αποτρέπει θανατηφόρα ατυχήματα που θα προέκυπταν από την καθυστέρηση λήψης μιας εντολής.

Πίνακας 5-3 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – Networking Τεχνολογιών

	3GPP	ETSI	IEEE	ITU
Τεχνολογίες Networking (Latency, Reliability, Slicing)	TS 23.501 TS 23.502 TS 38.503 TS 22.104	GR THz 001 GS ZSM 003	IEEE 802.1 TSN (802.1Qbv, 802.1CB) IEEE P802.11bn	ITU-T Y.3112 ITU-R M.2410-0

5.2.4 Τεχνολογία Υπολογισμού στο Άκρο (Edge computing)

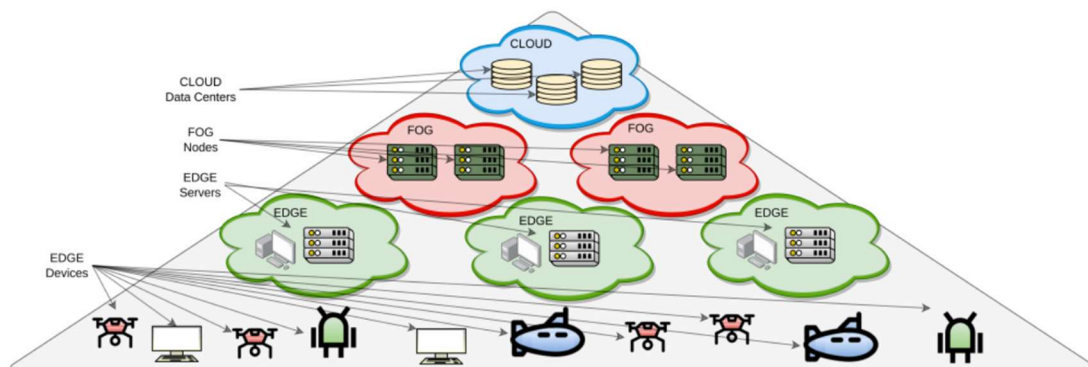
Τα αυτόνομα κινούμενα ρομπότ, τα UAV και οι ιατρικοί μικρομηχανισμοί, όπως τα νανορομπότ, λειτουργούν υπό αυστηρούς φυσικούς περιορισμούς που συνοψίζονται στην έννοια SWaP (Size, Weight and Power – SWaP). Οι περιορισμοί αυτοί καθορίζουν το μέγεθος, το βάρος και την ενεργειακή κατανάλωση της πλατφόρμας, επηρεάζοντας άμεσα τις δυνατότητες επεξεργασίας και την επιχειρησιακή διάρκεια. Σε μικρές ή κινητές πλατφόρμες, κάθε επιπλέον αισθητήρας, επεξεργαστής ή μπαταρία αυξάνει το βάρος και μειώνει την αυτονομία, γεγονός που περιορίζει σημαντικά την πολυπλοκότητα των εργασιών που μπορούν να εκτελεστούν τοπικά. Το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα

έντονο όταν τα ρομπότ καλούνται να εκτελέσουν υπολογιστικά απαιτητικές διεργασίες, όπως ταυτόχρονο εντοπισμό και χαρτογράφηση (SLAM), επεξεργασία εικόνας υψηλής ανάλυσης ή αναγνώριση αντικειμένων μέσω Deep Neural Network. Για παράδειγμα, η συνεχής δημιουργία τρισδιάστατων χαρτών, η ανάλυση αισθητήρων LiDAR (Light Detection and Ranging – LiDAR) και η ταξινόμηση εμποδίων απαιτούν σημαντική επεξεργαστική ισχύ και μνήμη. Αν αυτά εκτελούνται αποκλειστικά πάνω στο ίδιο το ρομπότ, οδηγούν σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας, θερμικά προβλήματα και ανάγκη για βαρύτερους επεξεργαστές, κάτι που είναι συχνά απαγορευτικό για drones ή μικρές κινητές πλατφόρμες [68] [2].

Η τεχνολογία MEC επιλύει αυτό το πρόβλημα μεταφέροντας την επεξεργασία από τη συσκευή προς το άκρο του δικτύου (Εικόνα 5-14). Αντί τα δεδομένα να αποστέλλονται σε απομακρυσμένα κέντρα δεδομένων, η επεξεργασία πραγματοποιείται σε διακομιστές άκρου (edge servers) που βρίσκονται κοντά στο σημείο λειτουργίας του ρομπότ, όπως σε υπολογιστικούς κόμβους ενσωματωμένους στον σταθμό βάσης ή σε τοπικούς μικροδιακομιστές. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται δραστικά η απόσταση μεταφοράς δεδομένων και επομένως η καθυστέρηση απόκρισης [68].

Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως "computation offloading", όπου το ρομπότ μεταφέρει μέρος ή το σύνολο των υπολογιστικών εργασιών στο MEC. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει στα ρομπότ να διατηρούν απλό και ελαφρύ υλικό, ενώ αξιοποιούν εξωτερική υπολογιστική ισχύ όταν απαιτείται. Έτσι, η τοπική μονάδα περιορίζεται σε αισθητήρες, βασικό έλεγχο και ελαφριά επεξεργασία, ενώ οι βαριές λειτουργίες εκτελούνται στο άκρο. Μια ιδιαίτερα σημαντική εξέλιξη αυτής της προσέγγισης είναι ο διαχωρισμός ελέγχου (split control), κατά το οποίο η λογική επεξεργασία ενός συστήματος τεχνητής νοημοσύνης διαχωρίζεται μεταξύ της ρομποτικής πλατφόρμας και του άκρου. Σε αυτό το μοντέλο, ένα μεγάλο μοντέλο τεχνητής νοημοσύνης — για παράδειγμα ένα δίκτυο αναγνώρισης αντικειμένων — χωρίζεται σε τμήματα. Οι πρώτες, ελαφριές στιβάδες επεξεργασίας που συλλέγουν ή φιλτράρουν δεδομένα αισθητήρων εκτελούνται πάνω στο ίδιο το ρομπότ, ενώ οι βαθύτερες και υπολογιστικά απαιτητικές στιβάδες εκτελούνται σε διακομιστές άκρου [68].

Αυτή η κατανομή μειώνει δραστικά την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ της συσκευής και βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση. Παράλληλα, επιτρέπει σε μικρές πλατφόρμες να αξιοποιούν προηγμένα μοντέλα τεχνητή νοημοσύνης που διαφορετικά δεν θα μπορούσαν να εκτελεστούν τοπικά. Η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε αποστολές SAR, αυτόνομη πλοήγηση, βιομηχανία ή ιατρικά ρομπότ, όπου απαιτείται συνεχής λήψη αποφάσεων με υψηλή ακρίβεια [68].



Εικόνα 5-14 Η δομή του edge computing [69]

Η χρήση MEC οδηγεί επίσης σε σημαντική μείωση της καθυστέρησης (latency), συνήθως σε επίπεδα 1–5 ms, γεγονός που επιτρέπει σχεδόν πραγματικό χρόνο αλληλεπίδραση μεταξύ ρομπότ και υποδομής στο άκρο. Αυτό είναι κρίσιμο όταν το σύστημα πρέπει να αντιδρά άμεσα σε μεταβολές του περιβάλλοντος, όπως εμπόδια, ανθρώπινη παρουσία ή αλλαγές αποστολής. Με τον συνδυασμό μεταφοράς υπολογισμού στο άκρο και τον διαχωρισμό ελέγχου (edge offloading & split control), δημιουργείται ένα νέο μοντέλο ρομποτικής νοημοσύνης, όπου η υπολογιστική ισχύς του δικτύου λειτουργεί ως φυσική επέκταση της ίδιας της ρομποτικής πλατφόρμας (Εικόνα 5-15) [68].

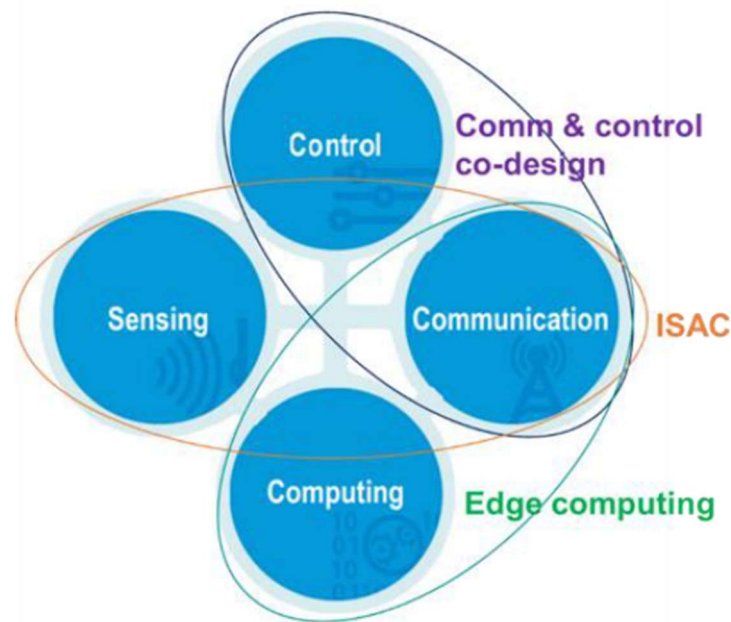
Η αποδοτική λειτουργία του MEC προϋποθέτει την ύπαρξη τυποποιημένων διαδικασιών δρομολόγησης, κινητικότητας και επιλογής κόμβων άκρου (Πίνακας 5-4). Τα πρότυπα που έχουν λεπτομέρειες για την υλοποίηση των παραπάνω περιγράφονται παρακάτω:

- 3GPP TS 23.548 (Release 19):

Το θεμελιώδες, κεντρικό πρότυπο για την ενσωμάτωση του υπολογισμού στο άκρο στο δίκτυο 5G. Προδιαγράφει όλες τις δομικές, αρχιτεκτονικές βελτιώσεις και τις διαδικασίες του 5G System προκειμένου να υποστηρίζεται απρόσκοπτα ο υπολογισμός στο άκρο. Διασφαλίζει ότι καθώς το ρομπότ κινείται μέσα στον χώρο, η σύνδεσή του δρομολογείται πάντα στον πιο κοντινό, διαθέσιμο υπολογιστικό κόμβο (MEC server), αποτρέποντας απότομες αυξήσεις στην καθυστέρηση [33].

- 3GPP TR 22.916:

Σε αυτήν τη μελέτη για τα Ευφυή Ρομπότ Εξυπηρέτησης (SOBOT - Service Robots with Ambient Intelligence), αναλύεται διεξοδικά η χρήση του MEC. Το πρότυπο περιγράφει πώς ο υπολογισμός στο άκρο πρέπει να χρησιμοποιείται για την ταχύτατη και αποδοτική διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων αντίληψης (geo-surface sensing data) από σμήνη εναέριων ρομπότ και για τον απαιτητικό τηλεχειρισμό βαρέων ρομπότ σε εγκαταστάσεις εξόρυξης μέσω διανομής υπολογιστικού φόρτου [70].



Εικόνα 5-15 Το Edge Computing και η χρησιμότητά του στις επικοινωνίες [68]

- 3GPP TR 22.874:

Μελετά αποκλειστικά τη μεταφορά και εκτέλεση μοντέλων AI/ML εντός του 5G δικτύου (Model transfer). Το πρότυπο αυτό παρέχει τις προδιαγραφές για την υποστήριξη του "split control", καθορίζοντας πώς τα δεδομένα αντίληψης των ρομπότ θα τροφοδοτούνται στους AI πράκτορες του δικτύου [71].

- ETSI GR MEC-DEC 050 & GS MEC 011:

Η ομάδα MEC του ETSI ηγείται των τεχνικών προδιαγραφών για το άκρο (Edge). Το έγγραφο MEC-DEC 050 παρέχει εξειδικευμένες απαιτήσεις υπολογισμού στο άκρο αποκλειστικά για τον κλάδο της Βιομηχανίας και της Ρομποτικής. Παράλληλα, το αυστηρό πρότυπο GS MEC 011 τυποποιεί την "Πλατφόρμα Ενεργοποίησης" (Application Enablement), παρέχοντας τα απαραίτητα ανοιχτά APIs ώστε οι προγραμματιστές να μπορούν να εγκαθιστούν, να διαχειρίζονται και να εκτελούν ρομποτικές εφαρμογές (applications) απευθείας στους διακομιστές του άκρου (Edge) [37] [72].

- IEEE 1934 & ITU-T Y.3510:

Το πρότυπο IEEE 1934 καθορίζει την ανοιχτή, τυποποιημένη αρχιτεκτονική του υπολογισμού στο νέφος (Fog Computing) (της τεχνολογίας που επεκτείνει τις δυνατότητες του Cloud Computing ακριβώς στην άκρη του δικτύου, και η οποία ταυτίζεται σε μεγάλο βαθμό με τις αρχές του MEC) [73]. Αντίστοιχα, το ITU-T Y.3510 ορίζει τις γενικότερες απαιτήσεις των υποδομών υπολογισμού στο νέφος για τη φιλοξενία και την παροχή εξειδικευμένων ρομποτικών υπηρεσιών (Robotics-as-a-Service - RaaS) [74].

Πίνακας 5-4 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – Edge Τεχνολογιών

	3GPP	ETSI	IEEE	ITU
Τεχνολογίες Edge	TS 23.548 TR 22.916 TR 22.874	GR MEC- DEC 050 GS MEC 011	IEEE 1934	ITU-T Y.3510

Η ανάπτυξη και υιοθέτηση αυτών των προτύπων απελευθερώνει την κατασκευή ρομπότ από τους περιορισμούς του hardware. Καθώς τα μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης (όπως τα Μεγάλα Γλωσσικά και Πολυτροπικά Μοντέλα - LLMs) γίνονται ολοένα και πιο ογκώδη (δισεκατομμύρια παραμέτρους), ο υπολογισμός στο άκρο επιτρέπει στα ρομπότ να είναι ελαφρύτερα και φθηνότερα: μετατρέπονται ουσιαστικά σε "έξυπνους", ασύρματους αισθητήρες/κινητήρες, ενώ ο πραγματικός, βαρύς "εγκέφαλος" κατοικεί στο άκρο, αξιοποιώντας την τεράστια υπολογιστική ισχύ του δικτύου 6G.

5.2.5 Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ, Μετάδοση Εικόνας, Κινητικότητα και Απτικό Feedback

Η αλληλεπίδραση ανθρώπου - ρομπότ (Human-Robot Interaction – HRI) και ο απομακρυσμένος τηλεχειρισμός αποτελούν έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς της σύγχρονης ρομποτικής, ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως η τηλεχειρουργική, η βιομηχανική συντήρηση επικίνδυνων εγκαταστάσεων και οι αποστολές search and rescue. Στα συστήματα αυτά, ο χειριστής δεν αλληλεπιδρά πλέον με το ρομπότ μέσω απλών χειριστηρίων ή συμβατικών χειριστηρίων, αλλά μέσω προηγμένων διεπαφών πολυτροπικής επικοινωνίας, οι οποίες επιτρέπουν τη φυσικότερη και αμεσότερη αλληλεπίδραση ανθρώπου και μηχανής. Η πολυτροπικότητα αναφέρεται στον ταυτόχρονο συνδυασμό πολλών μορφών πληροφορίας, όπως εικόνα, ήχος, απτική ανάδραση και δεδομένα κίνησης, ώστε ο χειριστής να έχει

πληρέστερη αντίληψη του απομακρυσμένου περιβάλλοντος. Στα συμβατικά συστήματα τηλεχειρισμού, ο χρήστης βασιζόταν κυρίως σε οπτικοακουστική ανάδραση (feedback), δηλαδή στη λήψη εικόνας από κάμερες και ήχου από το απομακρυσμένο σημείο. Ωστόσο, σε εφαρμογές υψηλής ακρίβειας αυτό δεν επαρκεί, καθώς ο χειριστής πρέπει να αισθάνεται τις φυσικές ιδιότητες του αντικειμένου με το οποίο αλληλεπιδρά το ρομπότ. Για τον λόγο αυτό εισάγεται η έννοια της απτικής ανατροφοδότησης (haptic feedback), όπου οι αισθητήρες του ρομποτικού βραχίονα συλλέγουν πληροφορίες επαφής και τις μετατρέπουν σε μηχανικά ερεθίσματα που αναπαράγονται στον χειριστή. Έτσι, ο χρήστης μπορεί να αντιλαμβάνεται πίεση, βάρος, υφή ή αντίσταση, σαν να βρίσκεται ο ίδιος φυσικά στον χώρο του ρομπότ [75] [76].

Η απτική πληροφορία διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη αφορά τις κιναισθητικές πληροφορίες (kinesthetic feedback), οι οποίες σχετίζονται με τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται κατά την επαφή. Μέσω αυτών, ο χειριστής μπορεί να κατανοήσει τη σκληρότητα ενός αντικειμένου, το βάρος του ή την αντίσταση κατά τη μετακίνηση. Η δεύτερη αφορά τις δερματικές διεγέρσεις (cutaneous feedback), οι οποίες περιλαμβάνουν επιφανειακά ερεθίσματα, όπως δονήσεις, μικρομετακινήσεις, υφή επιφάνειας ή ακόμη και θερμικές μεταβολές. Ο συνδυασμός των δύο δημιουργεί μια πολύ ρεαλιστική αίσθηση αφής, απαραίτητη για λεπτούς χειρισμούς [75].

Η συνολική αυτή προσέγγιση είναι γνωστή ως "Tactile Internet", δηλαδή ένα δίκτυο που δεν μεταφέρει μόνο δεδομένα και πολυμέσα, αλλά και την αίσθηση της αφής σε πραγματικό χρόνο (Εικόνα 5-16). Το Tactile Internet θεωρείται μία από τις σημαντικότερες εφαρμογές των μελλοντικών δικτύων 6G, καθώς επιτρέπει την τηλεπαρουσία: ο χρήστης δεν βλέπει απλώς το απομακρυσμένο περιβάλλον, αλλά έχει την ψευδαίσθηση φυσικής παρουσίας μέσα σε αυτό. Για να επιτευχθεί αυτή η εμπειρία, απαιτείται εξαιρετικά αυστηρός χρονικός συγχρονισμός μεταξύ όλων των ροών πληροφορίας. Η εικόνα, ο ήχος και τα απτικά δεδομένα πρέπει να φτάνουν συγχρονισμένα στον χειριστή, διαφορετικά δημιουργείται ασυνέπεια μεταξύ οπτικής και φυσικής αντίληψης. Ακόμη και μικρή καθυστέρηση μεταξύ αυτών των καναλιών μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο του σύνδρομου προσομοιωτή (simulator sickness) ή χρόνος καθυστέρησης από την κίνηση μέχρι την απεικόνιση (motion-to-photon delay), δηλαδή αποπροσανατολισμό, ναυτία και απώλεια αίσθησης ελέγχου. Για τον λόγο αυτό το δίκτυο πρέπει να διατηρεί καθολική καθυστέρηση (end-to-end latency) μικρότερο από 10–15 ms, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτούνται ακόμη χαμηλότερες τιμές [76].

Παράλληλα, τα Συνεργατικά Ρομπότ (CoBot) συνεργασία εισάγει σημαντικές απαιτήσεις ασφαλείας στον φυσικό χώρο. Σε αντίθεση με τα κλασικά βιομηχανικά ρομπότ που λειτουργούσαν μέσα σε προστατευτικά κλουβιά, τα Συνεργατικά Ρομπότ μοιράζονται τον ίδιο χώρο με ανθρώπους και κινούνται σε άμεση γειτνίαση με αυτούς. Αυτό καθιστά απαραίτητη τη συνεχή παρακολούθηση της απόστασης και της σχετικής κίνησης μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ. Για την επίτευξη αυτής της ασφάλειας εφαρμόζεται η έννοια των δυναμικών ζωνών ασφαλείας (Dynamic Safety Zones), όπου το σταθερό φυσικό όριο αντικαθίσταται από εικονικές ζώνες ασφαλείας που μεταβάλλονται δυναμικά. Μέσω αισθητήρων και τεχνολογιών όπως η ISAC, το δίκτυο υπολογίζει συνεχώς τη σχετική θέση ανθρώπου και ρομπότ. Εάν ένας άνθρωπος εισέλθει σε επικίνδυνη περιοχή, το σύστημα προσαρμόζει αυτόματα την ταχύτητα του ρομπότ ή διακόπτει πλήρως την κίνησή του, αποτρέποντας συγκρούσεις.

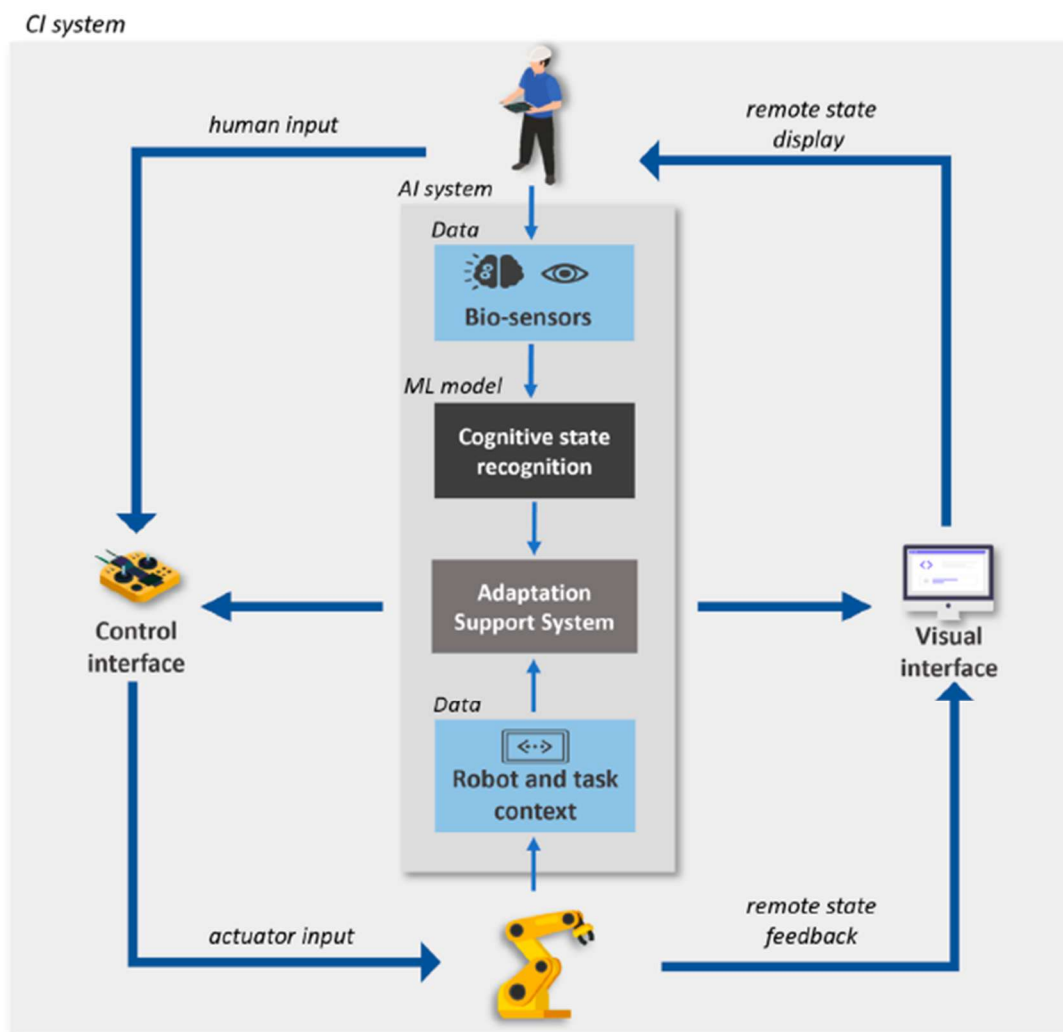
Εξίσου σημαντική είναι η υποστήριξη κινητικότητας. Καθώς ένα ρομπότ κινείται μέσα σε εργοστάσιο, νοσοκομείο ή επιχειρησιακή περιοχή, μπορεί να μεταβαίνει διαρκώς μεταξύ διαφορετικών σταθμών βάσης 5G. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το δίκτυο πρέπει να εκτελεί εξαιρετικά γρήγορες διαδικασίες μεταπομπής (handover), ώστε να διατηρείται αδιάκοπη η σύνδεση. Η παραμικρή απώλεια σύνδεσης μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια τηλεχειρισμού, διακοπή της εικόνας ή καθυστέρηση στην απτική

ανατροφοδότηση. Συνεπώς, η κινητικότητα στα ρομποτικά συστήματα δεν αφορά μόνο τη συνδεσιμότητα, αλλά αποτελεί βασική προϋπόθεση για ασφαλή και αξιόπιστη ανθρώπινη συνεργασία με απομακρυσμένες αυτόνομες μηχανές.

Για να υποστηριχθούν οι παραπάνω λειτουργίες σε συνεργατικά περιβάλλοντα ανθρώπου-ρομπότ, απαιτούνται εξειδικευμένα πρότυπα επικοινωνίας (Πίνακας 5-5) τα οποία περιγράφονται παρακάτω:

- 3GPP TR 22.847 (Release 18):

Πρότυπο της 3GPP, αποκλειστικά αφιερωμένο στις πολυτροπικές και απτικές υπηρεσίες επικοινωνίας (multi-modality communication services). Ορίζει λεπτομερώς τη λειτουργία του "διαμοιρασμού δεξιοτήτων" (skillset sharing) μεταξύ των ρομπότ και των ανθρώπων για συνεργατική αντίληψη του χώρου. Επιπλέον, εισάγει την πρωτοποριακή ιδέα της δημιουργίας "προσωπικών ζωνών αποκλεισμού/ασφαλείας" (personal exclusion zones) στα επικίνδυνα περιβάλλοντα: εάν το ρομπότ πλησιάσει σε μια επικίνδυνη ζώνη (π.χ. σε ακτινοβολία ή φωτιά), το δίκτυο στέλνει ακαριαία μια απτική ειδοποίηση (έντονη δόνηση) στο χειριστήριο του ανθρώπου για να τον αποτρέψει [31].



Εικόνα 5-16 Σχεδιάγραμμα κινητικότητας – επικοινωνίας HRI [77]

- IEEE P1918.1 (Tactile Internet):

Το πρότυπο για την αρχιτεκτονική του "Απτικού Διαδικτύου". Καθορίζει τα πρωτόκολλα δικτύωσης (networking, MAC, PHY) για την αμφίδρομη (bidirectional) μετάδοση της αίσθησης της αφής σε πραγματικό χρόνο. Θέτει τις αυστηρότερες απαιτήσεις για τον συγχρονισμό κιναισθητικών και οπτικοακουστικών δεδομένων, ώστε εφαρμογές όπως η τηλεχειρουργική να μπορούν να υλοποιηθούν με απόλυτη ασφάλεια [40].

- 3GPP TS 23.502 / ETSI TS 138 401 / IEEE 802.21:

Η τριάδα προτύπων που διαχειρίζεται την Κινητικότητα (Mobility). Το TS 23.502 (3GPP) ορίζει τις διαδικασίες Διαχείρισης Κινητικότητας και τις μεταπομπές (handovers) στο 5G Core, διασφαλίζοντας τη συνέχεια της ροής [78]. Το ETSI TS 138 401 περιγράφει την αρχιτεκτονική του NG-RAN και τις διαδικασίες handover [79]. Το IEEE 802.21 τυποποιεί την ομαλή μεταπομπή μεταξύ εντελώς ετερογενών δικτύων (π.χ. όταν ένα ρομπότ περνά από κάλυψη 5G σε κάλυψη εσωτερικού δικτύου Wi-Fi), διασφαλίζοντας ότι η (downlink) ροή του ελέγχου HRI δεν θα διακοπεί ποτέ [80].

- ISO 10218-1/2 & ISO/TS 15066:

Στον τομέα της μηχανολογικής και λειτουργικής ασφάλειας (functional safety), αυτά είναι τα κορυφαία πρότυπα. Το ISO/TS 15066 εισάγει σύγχρονες τεχνικές ελέγχου όπως ο Περιορισμός Ισχύος και Δύναμης PFL και η Παρακολούθηση Ταχύτητας και Διαχωρισμού SSM. Τα πρότυπα αυτά μεταφράζουν τα τηλεπικοινωνιακά δεδομένα αντίληψης του 6G σε φυσική ασφάλεια, εξασφαλίζοντας ότι τα Συνεργατικά Ρομπότ (Cobots) θα ελαττώσουν ταχύτητα ή θα σταματήσουν τελείως εάν οι αισθητήρες ή το δίκτυο (ISAC) εντοπίσουν ότι ένας άνθρωπος παραβίασε την απόσταση ασφαλείας [81].

- ITU-T H.265 (HEVC):

Στον τηλεχειρισμό, ο άνθρωπος χρειάζεται τέλεια ορατότητα. Η σύσταση ITU-T H.265 ορίζει τον προηγμένο αλγόριθμο κωδικοποίησης (codec) πολυμέσων. Είναι το απόλυτα απαραίτητο πρωτόκολλο για την αποδοτική συμπίεση των ροών βίντεο υπερ-υψηλής ανάλυσης (4K/8K), ελαχιστοποιώντας τον χρόνο κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης (latency) στο ελάχιστο δυνατό, αποφεύγοντας έτσι οποιαδήποτε καθυστέρηση (lag) στην εφαρμογή και εξασφαλίζοντας μέγιστη Αξιολόγηση Ποιότητας Βίντεο (Video Quality Assessment - VQA) για τον χειριστή κατά τη διάρκεια αποστολών [82].

Πίνακας 5-5 Αντιστοίχιση προτύπων SDO – HRI

	3GPP	ETSI	IEEE	ITU
Τεχνολογίες HRI	TR 22.847 TS 23.502	TS 138 401	IEEE 802.21	ITU-T H.265

Η εναρμόνιση των τηλεπικοινωνιακών προτύπων (P1918.1, H.265, TS 23.502) με τα αυστηρά πρότυπα μηχανολογικής ασφάλειας (ISO 10218, ISO/TS 15066) αποτελεί το μεγαλύτερο επίτευγμα στον τομέα του HRI. Μέσω αυτής της σύμπραξης, το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο 6G μεταδίδει την οπτική και απτική πληροφορία με εκπληκτική ταχύτητα (ώστε ο άνθρωπος να αισθάνεται σωματικά ότι βρίσκεται στο πεδίο), και ταυτόχρονα το ίδιο το ρομπότ διαθέτει τη "νοημοσύνη" να φρενάρει αυτόματα πριν τραυματίσει κάποιον. Η ικανότητα των συστημάτων να εκτελούν αστραπιαίες μεταπομπές (handovers)

(IEEE 802.21) διασφαλίζει ότι ο τηλεχειρισμός παραμένει αδιάλειπτος, αξιόπιστος και ασφαλής υπό οποιεσδήποτε συνθήκες κινητικότητας.

5.3 Αντιστοίχιση προτύπων

Ενώ στο Κεφάλαιο 5.2 αναλύθηκαν οι τεχνολογικοί μηχανισμοί και οι προδιαγραφές που επιλύουν τα επιμέρους προβλήματα της ρομποτικής, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια αντιστοίχισης των requirements με την αρχιτεκτονική της ίδιας της παγκόσμιας τυποποίησης. Η υλοποίηση του Διαδικτύου των Ρομποτικών Πραγμάτων (IoRT) προκύπτει μέσα από έναν πολύπλοκο "συν-σχεδιασμό" (co-design) μεταξύ τεσσάρων κυρίαρχων Οργανισμών (3GPP, ETSI, IEEE, ITU).

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται αυτή ακριβώς η διασταυρούμενη αντιστοίχιση, αναδεικνύοντας τους διακριτούς ρόλους, τα μοτίβα αλληλοσυμπλήρωσης, αλλά και τις ασυμμετρίες/κενά που εντοπίζονται στη μήτρα των προτύπων. Βάσει των προηγούμενων αναφορών και των απαιτήσεων που προκύπτει σε ένα δίκτυο όπου πρέπει να συνυπάρξουν ρομπότ και επικοινωνίες δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 5-6 Αντιστοίχιση απαιτήσεων - πρότυπων

	3GPP Standard	ETSI	IEEE	ITU
ISAC	TR 22.837	GR ISC 001 V1.1.1	IEEE 802.11bf	ITU-R M.2160-0
Tactile feedback	TR 22.847	--	IEEE P1918.1	--
Οργάνωση robot	TR 22.916	GR MEC-DEC 050	IEEE 1872	--
Ultra-low latency	TS 22.104	--	IEEE 802.1 TSN (802.1Qbv, 802.1CB)	--
Επικοινωνία μεταξύ robot	TS 23.287	GS MEC 002 / MEC 022	IEEE 1872	ITU-R M.2083
Real-time video streaming	TS 23.501	GS MEC 011-1	--	--
Κινητικότητα	TS 23.502	ETSI TS 138 401	IEEE 802.21	ITU-R M.2150
Ultra-high reliability	TS 23.503	ETSI GR THz 001	P802.11bn	ITU-R M.2410-0
Edge Computing	TS 23.548	ETSI GS MEC 003	IEEE 1934	ITU-T Y.3510
Sidelink	TS 38.300	ETSI TS 138 355	--	ITU-R M.1890
Network slicing	TS 23.502	ETSI GS ZSM 003	--	ITU-T Y.3112

5.3.1 Ο Διακριτός και Συμπληρωματικός Ρόλος των Οργανισμών

Η ανάγνωση του Πίνακα 5-6 ανά στήλη αναδεικνύει ότι κανένας οργανισμός δεν μπορεί να καλύψει αυτόνομα το σύνολο του ρομποτικού οικοσυστήματος. Ο καθένας υιοθετεί έναν εξειδικευμένο, διακριτό ρόλο:

- **ITU:** Η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών βρίσκεται σταθερά στο άκρο της στρατηγικής καθοδήγησης. Μέσα από έγγραφα όπως τα ITU-R M.2160-0 (ορισμός 6G/ISAC), M.2410-0 (απαιτήσεις αξιοπιστίας) και ITU-T Y.3112 (Network Slicing), η ITU δεν γράφει κώδικα ούτε σχεδιάζει κεραίες. Ορίζει τα ελάχιστα όρια απόδοσης (Minimum Requirements) και τους επιχειρησιακούς στόχους, αποτελώντας τον "παγκόσμιο καμβά" πάνω στον οποίο οι υπόλοιποι οργανισμοί καλούνται να χτίσουν.
- **3GPP:** Η 3GPP αποτελεί τη ραχοκοκαλιά της δικτυακής υλοποίησης μεγάλου βεληνικού. Εντοπίζεται σχεδόν σε κάθε γραμμή του πίνακα (από το TR 22.837 για την ISAC έως το TS 23.502 για την κινητικότητα και το slicing), καθώς αναλαμβάνει τη βαθιά αρχιτεκτονική του πυρήνα (5G/6G Core) και του Δικτύου Ραδιοπρόσβασης (RAN).
- **ETSI:** Το ETSI λειτουργεί ως η "γέφυρα" μεταξύ των παγκόσμιων τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και της ευρωπαϊκής βιομηχανίας. Στον πίνακα παρατηρείται ότι το ETSI εξειδικεύει τις προσπάθειες του 3GPP. Για παράδειγμα, ενώ η 3GPP φτιάχνει τη βάση του υπολογισμού στο άκρο (Edge Computing) (TS 23.548), το ETSI το τυποποιεί βιομηχανικά μέσω των προδιαγραφών MEC (GS MEC 011). Αντίστοιχα, ενώ το 3GPP ορίζει το Slicing, το ETSI προσθέτει την κρίσιμη απαίτηση της αυτοματοποίησης μέσω του Zero-touch network (ZSM 003).
- **IEEE:** Η παρουσία του IEEE αναδεικνύει την κυριαρχία του στα Τοπικά Δίκτυα (LAN) και στο φυσικό υλικό. Το IEEE προσφέρει τις εναλλακτικές "εσωτερικού χώρου" (indoor) για τις τεχνολογίες αιχμής, αναπτύσσοντας παράλληλα πρότυπα όπως το 802.11bf (αντίστοιχο της ISAC της 3GPP) και το P802.11bn (αντίστοιχο της URLLC).

5.3.2 Μοτίβα Προυποποίησης

Διαβάζοντας τον Πίνακα 5-6 ορίζοντα (ανά τεχνολογία), προκύπτουν τρία ξεκάθαρα μοτίβα τυποποίησης που ακολουθεί η βιομηχανία για τη ρομποτική:

Μοτίβο 1: Κάθετη Ευθυγράμμιση (Top-Down Alignment) Παρατηρείται στις σειρές της Υπερ-υψηλής Αξιοπιστίας (UHR) και του τεμαχισμού (Slicing) ότι η ITU δίνει την προδιαγραφή (M.2410-0), η 3GPP δημιουργεί τον έλεγχο πολιτικών QoS (TS 23.503) και το ETSI αξιολογεί τις μελλοντικές συχνότητες Terahertz (GR THz 001) για την υποστήριξή τους. Είναι οι πλέον ώριμες και αρμονικά χαρτογραφημένες τεχνολογίες.

Μοτίβο 2: Ανταγωνιστική / Συμπληρωματική Πρόσβαση (Dual-Track Standardisation) Η κατηγορία ISAC αποκαλύπτει μια διπλή κούρσα. Από τη μία πλευρά, η 3GPP και το ETSI (TR 22.837, GR ISC 001) τυποποιούν την αντίληψη μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας (macro-scale sensing). Από την άλλη, το IEEE με το 802.11bf προχωρά στην τυποποίηση του WLAN Sensing για οικιακά και κλειστά βιομηχανικά περιβάλλοντα (micro-scale sensing). Η αντιστοίχιση δείχνει ότι τα ρομπότ του μέλλοντος θα είναι "τεχνολογικά αγνωστικιστικά", μεταβαίνοντας απρόσκοπτα από την κυψελωτή αντίληψη στην αντίληψη μέσω Wi-Fi.

Μοτίβο 3: Συνεργατική Εμβάθυνση Πρωτοκόλλων Στη γραμμή του Sidelink (R2R Επικοινωνία), βλέπουμε πώς οι οργανισμοί δεν επικαλύπτονται αλλά μοιράζουν το έργο. Η 3GPP αναλαμβάνει το γενικό πλαίσιο V2X και την επικοινωνία στο TS 23.287 και TS 38.300. Ωστόσο, η βαριά δουλειά για το Πρωτόκολλο Εντοπισμού Θέσης (SLPP) ανατίθεται/δημοσιεύεται υπό την ομπρέλα του ETSI (TS 138 355), εστιάζοντας στις ακριβείς μετρήσεις απόστασης μεταξύ των ρομπότ.

5.3.3 Εντοπισμός Κενών και Ασυμμετριών

Η δομή του Πίνακα 5-6 είναι ίσως πιο αποκαλυπτική στα σημεία όπου υπάρχουν "κενά", υποδεικνύοντας τις τρέχουσες ασυμμετρίες στην παγκόσμια έρευνα:

1. Στη γραμμή της απτικής ανατροφοδότησης, ο πίνακας εμφανίζει έντονη δραστηριότητα από το IEEE (P1918.1 Tactile Internet) και θεωρητικές μελέτες από το 3GPP (TR 22.847). Αντίθετα, απουσιάζουν εντελώς πρότυπα από το ETSI και την ITU για την αρχιτεκτονική του Haptic Feedback. Το κενό αυτό υποδηλώνει ότι το κανονιστικό πλαίσιο της Ευρώπης δεν έχει ενσωματώσει πλήρως τις μεταφορές πολυτροπικών αισθήσεων, αφήνοντας την πρωτοβουλία καθαρά στους κατασκευαστές υλικού και στο επίπεδο ελέγχου (MAC/PHY) του IEEE.
2. Το Network Slicing χαρτογραφείται εξαντλητικά στις στήλες των 3GPP, ETSI και ITU (TS 23.502, ZSM 003, Y.3112 αντίστοιχα). Η απουσία της στήλης του IEEE σε αυτή την τεχνολογία δεν είναι παράλειψη, αλλά επιβεβαιώνει τη φύση της τεχνολογίας: ο τεμαχισμός δικτύου είναι μια έννοια αποκλειστικά συνυφασμένη με τα δίκτυα ευρείας περιοχής (WAN) και τον πυρήνα των παρόχων. Τα τοπικά δίκτυα (LAN/Wi-Fi) επιλύουν το πρόβλημα της εγγυημένης ροής μέσω χρονοπρογραμματισμού (Time-Sensitive Networking - TSN) και όχι μέσω δημιουργίας εικονικών "φετών" δικτύου.
3. Παρόλο που όλοι οι SDOs έχουν εγγραφές στη γραμμή του άκρου (3GPP TS 23.548, IEEE 1934, ITU Y.3510), η προσέγγιση διαφέρει δομικά. Ο πίνακας δείχνει ότι το ETSI διατηρεί τη μερίδα του λέοντος σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής με τη σειρά GS MEC, παρέχοντας τα APIs (MEC 011) για την ανάπτυξη των εφαρμογών. Το IEEE, αντίθετα, τυποποιεί την αρχιτεκτονική υπολογισμού στο σύννεφο (Fog Computing), υποδεικνύοντας μια συνεχιζόμενη διχογνωμία στη βιομηχανία μεταξύ της συγκεντρωτικής "άκρης" του δικτύου (Edge) και του απόλυτα αποκεντρωμένου υπολογισμού σε επίπεδο συσκευής (Fog).

Συνοψίζοντας, η αντιστοίχιση των προτύπων αποδεικνύει ότι η ωρίμανση του IoRT έχει πλέον εγκαταλείψει τη λογική των κλειστών οργανισμών. Η επιτυχής πλοήγηση ή ο τηλεχειρισμός ενός ρομπότ απαιτεί την κατακόρυφη διέλευση (traversing) μέσα από την αξιοποίηση της παγκόσμιας ραδιοπρόσβασης (3GPP/ITU) για εξωτερικούς χώρους, δυναμική εναλλαγή σε τοπικά πρωτόκολλα (IEEE) για τους κλειστούς χώρους, και χρήση ευρωπαϊκών προτύπων διαχείρισης (ETSI) για την ασφαλή εντοπισμό των δεδομένων.

5.4 Σύνοψη

Το πέμπτο κεφάλαιο ανέλυσε διεξοδικά το πολυδιάστατο τοπίο της τυποποίησης, το οποίο αποτελεί προϋπόθεση για την υλοποίηση του Διαδικτύου των Ρομποτικών Πραγμάτων (IoRT) στην εποχή των δικτύων 5G-Advanced και 6G. Όπως καταδείχθηκε, η μετάβαση από τα απομονωμένα, στατικά βιομηχανικά ρομπότ στα πλήρως αυτόνομα, συνεργατικά σμήνη (Swarms) και στα Συνεργατικά Ρομπότ (Cobots) δεν αποτελεί απλώς μια τηλεπικοινωνιακή πρόκληση. Αντίθετα, απαιτεί την απόλυτη σύγκλιση των Τηλεπικοινωνιών (CT), της Πληροφορικής (IT) και της Ρομποτικής Μηχανικής.

Η ανάλυση του χάρτη των προτύπων αποκάλυψε ότι η δικτύωση των ρομπότ βασίζεται σε έναν εναρμονισμένο "συν-σχεδιασμό" (co-design) μεταξύ τεσσάρων κορυφαίων οργανισμών. Η ITU θέτει το παγκόσμιο όραμα και τις ελάχιστες απαιτήσεις για το 6G, όπως καθορίζεται στο πλαίσιο IMT-2030 μέσω της σύστασης M.2160-0. Πάνω σε αυτόν τον καμβά, η 3GPP αναπτύσσει την αρχιτεκτονική του δικτύου κορμού και της ραδιοπρόσβασης, καθιερώνοντας καινοτομίες όπως η ISAC και η απευθείας διαρομποτική επικοινωνία (Sidelink/PC5) για τον συντονισμό σμηνών σε πραγματικό χρόνο. Το ETSI

γεφυρώνει αυτά τα πρωτόκολλα, τυποποιώντας το λογισμικό για τον Υπολογισμό στο Άκρο (MEC) και τον αυτοματοποιημένο τεμαχισμό δικτύου (Zero-touch Network Slicing). Τέλος, το IEEE κυριαρχεί στα τοπικά δίκτυα υπερ-υψηλής αξιοπιστίας (TSN, Wi-Fi 8) και στο Απτικό Διαδίκτυο (IEEE P1918.1), εξασφαλίζοντας τον ακαριαίο συγχρονισμό οπτικοακουστικών και απτικών δεδομένων που απαιτείται για τον τηλεχειρισμό χωρίς καθυστερήσεις.

Η ταχύτατη μετάδοση δεδομένων είναι, ωστόσο, άχρηστη εάν τα ρομπότ δεν κατανοούν το νόημά τους. Η κοινότητα IEEE RAS (π.χ. πρότυπο IEEE 1872.2) παρέχει τις Οντολογίες, προσφέροντας το "λεξιλόγιο" που επιτρέπει στα ρομπότ να μοιράζονται εργασίες και να δομούν σημασιολογικούς χάρτες. Παράλληλα, καθώς τα ρομπότ εξέρχονται από τα παραδοσιακά κλουβιά ασφαλείας, τα πρότυπα των ISO και IEC (όπως τα ISO 10218) αναλαμβάνουν τη μηχανολογική και λειτουργική ασφάλεια. Μέσω μεθόδων όπως η Παρακολούθηση Ταχύτητας και Διαχωρισμού και ο Περιορισμός Ισχύος (PFL), οι εντολές του δικτύου 6G μεταφράζονται σε ασφαλή φυσική αλληλεπίδραση (HRI), αποτρέποντας ανθρώπινους τραυματισμούς.

Ένα κρίσιμο ζήτημα που αναδείχθηκε είναι το παράδοξο της ρομποτικής αυτονομίας. Η ενσωμάτωση προηγμένων μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) καθιστά τα συστήματα πιο έξυπνα, αλλά ταυτόχρονα αποδεικνύει ότι η "τέλεια προβλεψιμότητα" ενός αλγορίθμου είναι πρακτικά ανέφικτη. Εξαιτίας του διευρυμένου κινδύνου κυβερνοεπιθέσεων, οι ευρωπαϊκές οδηγίες και πρότυπα όπως η σειρά προτύπων IEEE 7007-series (π.χ. IEEE 7000/700/7003) σχετικά με ηθικά ζητήματα της AI απαιτούν την κωδικοποίηση των κανόνων ασφαλείας (Security-by-Design) βαθιά μέσα στον πυρήνα των έξυπνων ρομπότ. Παράλληλα, επιβάλλεται η ύπαρξη ανεξάρτητων, μηχανικών διακοπών (kill-switches), ώστε μια τυχόν παραβίαση του δικτύου να μην οδηγήσει ποτέ σε κινητική βλάβη.

Συμπερασματικά, το πέμπτο κεφάλαιο καταδεικνύει ότι το μέλλον του IoRT και των 6G ρομπότ δεν χτίζεται σε απομονωμένα τεχνολογικά "σιλό". Μόνο μέσω της απόλυτης σύμπραξης και της εναρμόνισης των τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων με τους αυστηρούς κανόνες της λειτουργικής ρομποτικής ασφαλείας, μπορούμε να εγγυηθούμε ένα ψηφιακό οικοσύστημα που θα είναι ταχύτατο, ευφυές, διαλειτουργικό και, πρωτίστως, απόλυτα ασφαλές για την ανθρώπινη ζωή.

Κεφάλαιο 6ο: Περιπτώσεις Χρήσης

6.1 Εισαγωγή

Η μετάβαση προς τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα έκτης γενιάς (6G) σηματοδοτεί μια ριζική αλλαγή καθώς το δίκτυο παύει να λειτουργεί αποκλειστικά ως μέσο μεταφοράς δεδομένων και μετατρέπεται σε ένα έξυπνο, ενοποιημένο οικοσύστημα αισθητηριακής αντίληψης, υπολογισμού και επικοινωνίας [83]. Σύμφωνα με το όραμα του IMT-2030 και πρωτοβουλίες όπως η NGMN, το Hexa-X και η one6G, οι τρεις θεμελιώδεις πυλώνες του 6G είναι η Ασύρματη Επικοινωνία, η Τεχνητή Νοημοσύνη και το Διαδίκτυο των Πάντων [84]. Σε αυτό το πλαίσιο, η Ρομποτική αναδεικνύεται ως ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς εφαρμογής, καθώς τα ρομπότ εξελίσσονται από μεμονωμένες, τηλεχειριζόμενες μονάδες σε πλήρως διασυνδεδεμένα, αυτόνομα συνεργατικά σμήνη (swarms) και συνεργατικά ρομπότ (CoBots) [12] [85].

Η στενή ενσωμάτωση του 6G με τη ρομποτική εξυπηρετεί πολυδιάστατες και εξαιρετικά απαιτητικές περιπτώσεις χρήσης. Οργανισμοί όπως η NGMN (Next Generation Mobile Networks – NGMN)) ταξινομούν αυτές τις περιπτώσεις χρήσης σε κατηγορίες όπως η "Ενισχυμένη Επικοινωνία Μηχανών", που περιλαμβάνει τα δίκτυα ρομπότ και την αλληλεπίδραση των Cobots, ενώ το έργο Hexa-X εισάγει την κατηγορία "Από τα ρομπότ στα Cobots", εστιάζοντας στη δημιουργία συμβιωτικών σχέσεων μεταξύ ανθρώπων και μηχανών μέσω της κατανομημένης νοημοσύνης.

Στον πυρήνα αυτών των εξελίξεων βρίσκονται τεχνολογίες αιχμής, όπως η Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία, η οποία επιτρέπει τη χρήση των ραδιοκυμάτων όχι μόνο για επικοινωνία αλλά και για παρακολούθηση του περιβάλλοντος με ακρίβεια εκατοστού. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως οι Υπερ-Αξιόπιστες Επικοινωνίες Χαμηλής Καθυστέρησης, ο Υπολογισμός στα Άκρα (Edge Computing) και ο τεμαχισμός δικτύου (Network Slicing) παρέχουν την απαραίτητη υποδομή για λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση κρίσιμων περιπτώσεων χρήσης που αναδεικνύουν τη δυναμική του 6G σε συνεργατικά ρομποτικά συστήματα, με ιδιαίτερη έμφαση στις αποστολές Έρευνας και Διάσωσης (SAR). Συγκεκριμένα, εξετάζονται αναλυτικά τρεις άξονες: α) η χρήση του 6G για τον εντοπισμό ανθρώπινων θυμάτων σε καταστροφές, β) ο χρονοπρογραμματισμός ζεύξεων και ο σχεδιασμός κίνησης με επίγνωση της επικοινωνίας, και γ) η φυσική αλληλεπίδραση και συνεργασία μεταξύ πολλαπλών ρομπότ και ανθρώπων στον ίδιο χώρο. Μέσα από αυτές τις περιπτώσεις χρήσης, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η σύγκλιση δικτύων, τεχνητής νοημοσύνης και ρομποτικής μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των αυτόνομων συστημάτων.

6.2 Χρήση του 6G για εντοπισμό ανθρώπινων θυμάτων

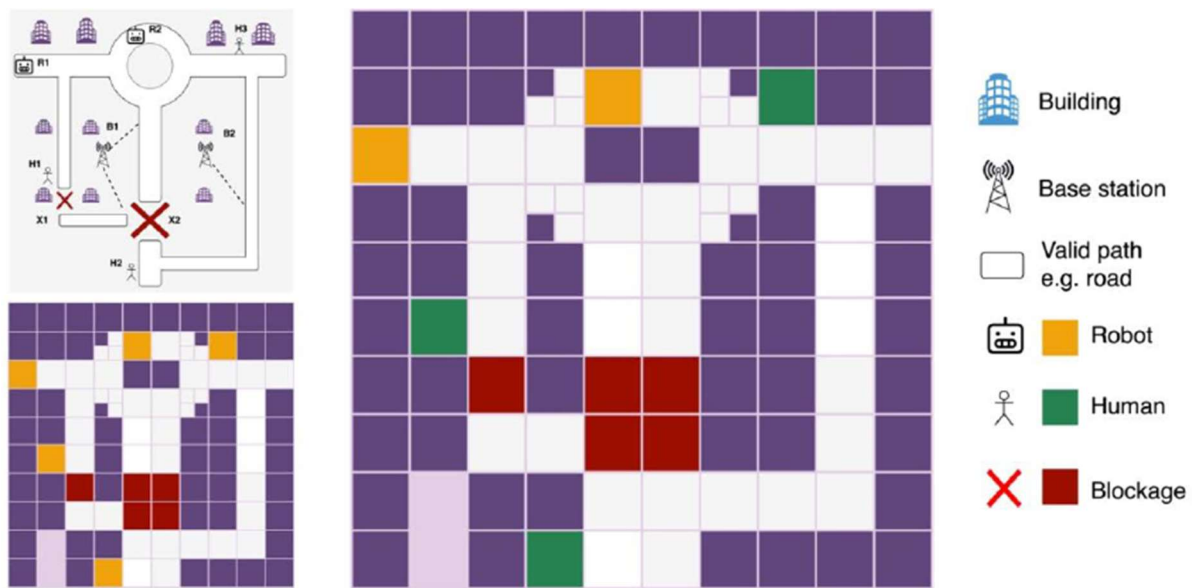
Η μετάβαση από το 5G στο 6G δεν αποτελεί απλώς μια γραμμική αύξηση της ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, αλλά μια θεμελιώδη αλλαγή παραδείγματος. Σύμφωνα με την ένωση **one6G** [2], η ενσωμάτωση δυνατοτήτων ασύρματης αντίληψης (wireless sensing), επικοινωνίας και υπολογιστικής ισχύος στα ρομποτικά συστήματα πρόκειται να βελτιώσει δραματικά την αξιοπιστία, την επιχειρησιακή τους ικανότητα και την αποδοτικότητα, μειώνοντας ταυτόχρονα την πολυπλοκότητα και το κόστος κατασκευής. Η βιομηχανία των κινητών επικοινωνιών εργάζεται εντατικά για να κατανοήσει τις απαιτήσεις του συστήματος των ρομποτικών εφαρμογών, προκειμένου να τροφοδοτήσει τον σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική του μελλοντικού συστήματος 6G [2].

Ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς όπου η τεχνολογία 6G καλείται να διαδραματίσει σωτήριο ρόλο είναι οι αποστολές Έρευνας και Διάσωσης. Όταν μια πόλη ή μια βιομηχανική εγκατάσταση πλήττεται από μια φυσική καταστροφή (π.χ. σεισμό), η άμεση εκτίμηση των ζημιών και ο εντοπισμός ανθρώπινων θυμάτων είναι ζωτικής σημασίας. Οι καθυστερήσεις στην απόκριση των ομάδων SAR, λόγω έλλειψης πληροφοριών για το ποιες περιοχές έχουν υποστεί τη μεγαλύτερη ζημιά, μπορούν να οδηγήσουν σε τραγικές απώλειες ανθρώπινων ζωών. Σε αυτό το πλαίσιο, η αξιολόγηση μέσω παραδοσιακών καμερών συχνά εμποδίζεται από τη χαμηλή ορατότητα (λόγω σκόνης ή καπνού), την καταστροφή του υλικού, ή την απουσία συνδεσιμότητας στο διαδίκτυο [2].

Το 6G επιλύει αυτά τα προβλήματα εισάγοντας τη συνδυαστική χρήση 3GPP και μη-3GPP πηγών αντίληψης, επιτρέποντας στα ρομπότ και τα δίκτυα να συνεργάζονται στενά (Connected Perception) για τη δημιουργία δυναμικών χαρτών και την αναγνώριση θυμάτων κάτω από συντρίμια.

6.2.1 Περιγραφή της Περίπτωσης Χρήσης

Η περίπτωση χρήσης "Αναγνώριση θυμάτων σε καταστάσεις καταστροφής" (Identification of casualties in disaster situations) ορίζεται από το one6G ως η ικανότητα του δικτύου να αξιοποιεί τις τηλεπικοινωνιακές του υποδομές ως αισθητήρες ραντάρ, παράλληλα με τα δεδομένα που συλλέγουν τα αυτόνομα ρομπότ στο πεδίο [2].



Εικόνα 6-1 Αναγνώριση θυμάτων σε περιβάλλον καταστροφής [2]

Για την αποτελεσματική πλοήγηση των συνεργατικών ρομπότ σε αυτά τα χαοτικά περιβάλλοντα, το δίκτυο πρέπει αρχικά να χαρτογραφήσει τον χώρο. Μετά από μια καταστροφή, οποιοσδήποτε αποθηκευμένος χάρτης θεωρείται παρωχημένος. Η χαρτογράφηση "on-the-fly" από τα ίδια τα ρομπότ είναι αναποτελεσματική λόγω των συχνών αδιεξόδων (dead ends) και των ερειπίων. Αντί αυτού, το δίκτυο 6G αναλαμβάνει να δημιουργήσει έναν Σημασιολογικό Χάρτη (Semantic Map) συγχωνεύοντας δεδομένα αντίληψης, ώστε να διαχωρίσει τον χώρο σε κελιά (grid of cells). Μέσα από αυτή τη διαδικασία, εντοπίζει ποια κελιά περιέχουν εμπόδια (blockages) και ποια κελιά παρουσιάζουν πιθανότητα ύπαρξης ανθρώπινων οντοτήτων (Εικόνα 6-1).

6.2.2 Προϋποθέσεις Λειτουργίας και Αρχιτεκτονική

Για να εκτελεστεί επιτυχώς ο εντοπισμός θυμάτων μέσω 6G, το one6G ορίζει συγκεκριμένες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται στο πεδίο:

- Διαθεσιμότητα Υποδομής 3GPP:

Οι λειτουργικοί Σταθμοί Βάσης και οι Συσκευές Χρήστη -δηλαδή τα ρομπότ- που βρίσκονται στην περιοχή της καταστροφής πρέπει να διαθέτουν εγγενή ικανότητα ασύρματης αντίληψης (wireless sensing) και ταξινόμησης υλικών (material classification).

- Μη Επίγεια Δίκτυα (Non - Terrestrial Networks - NTN) και UAVs:

Σε περιπτώσεις όπου η επίγεια υποδομή έχει καταρρεύσει πλήρως, το 6G υποστηρίζει την ταχεία ανάπτυξη κινητών μονάδων, όπως τα Μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAVs) και οι Σταθμοί Πλατφόρμας Υψηλού Ύψομέτρου (High-Altitude Platform Stations - HAPS). Ένα UAV μπορεί να μεταφέρει έναν ενσωματωμένο Σταθμό Βάσης τεχνολογίας NB-IoT (Narrowband IoT). Αυτός ο Σταθμός Βάσης έχει την ικανότητα να εκτελεί επεξεργασία συστοιχιών κεραιών (array processing) για την εκτίμηση της Κατεύθυνσης Άφιξης (Direction of Arrival - DoA) του σήματος.

- Εξουσιοδότηση SAR:

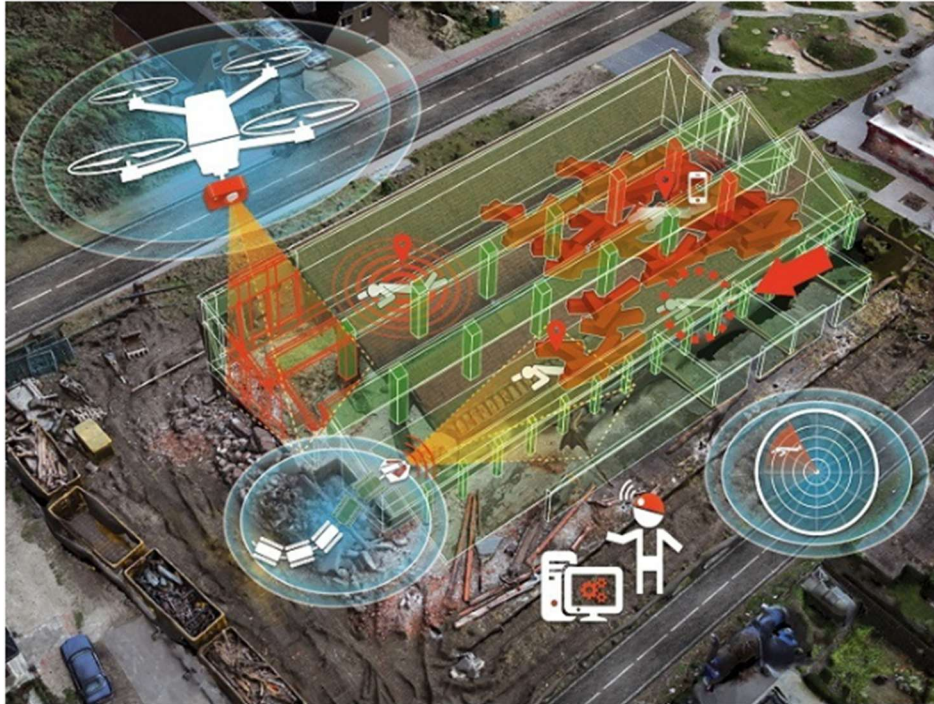
Το πλήρωμα Έρευνας και Διάσωσης διαθέτει την απαραίτητη εξουσιοδότηση από τον πάροχο του δικτύου για να κάνει χρήση των υπηρεσιών NB-IoT και ISAC της κινητής βάσης.

6.2.3 Αναλυτική Ροή Υπηρεσιών (Service Flows)

Η διαδικασία αναγνώρισης και εντοπισμού των θυμάτων ακολουθεί μια εξαιρετικά δομημένη ροή οκτώ (8) βημάτων, η οποία ενορχηστρώνεται πλήρως από το σύστημα 6G και τους διακομιστές στο Άκρο [2]:

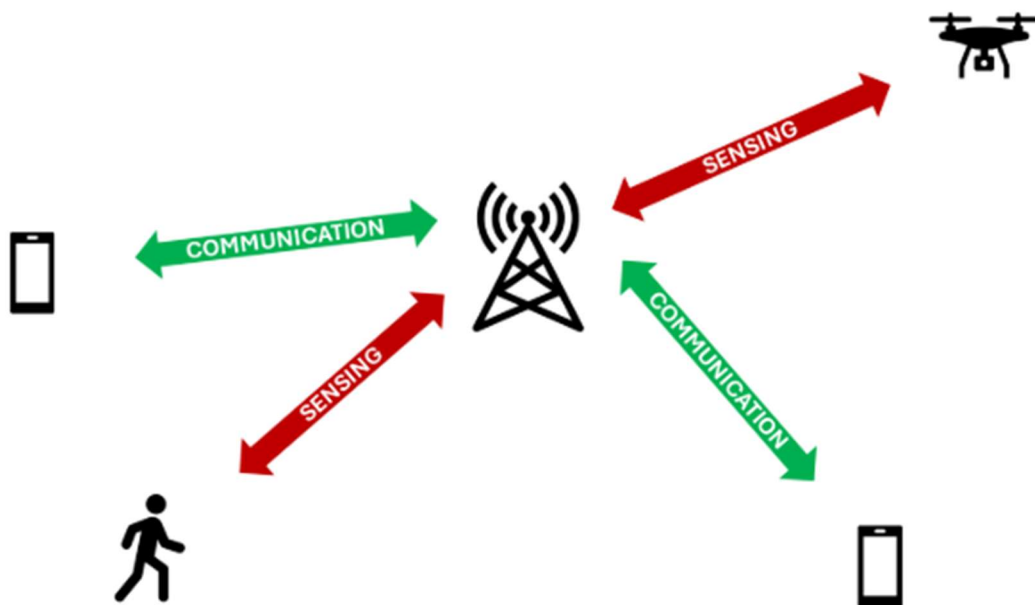
Βήμα 1ο: Το πλήρωμα SAR υποβάλλει αίτημα στον Πάροχο Κινητής Τηλεφωνίας (Mobile Operator X) για την παροχή "Υπηρεσίας Αντίληψης", με σκοπό τον εντοπισμό ανθρώπινων απωλειών στην πληγείσα πόλη.

Βήμα 2ο: Η ομάδα SAR προσδιορίζει τις πιθανές "Τοποθεσίες Αντίληψης" (Sensing Locations - SLs). Εναλλακτικά, οι τοποθεσίες αυτές μπορούν να εξαχθούν αυτόματα από έναν χάρτη που έχει δημιουργηθεί δυναμικά από μια άλλη υπηρεσία του δικτύου (π.χ. υπηρεσία χαρτογράφησης περιβάλλοντος Εικόνα 6-2).

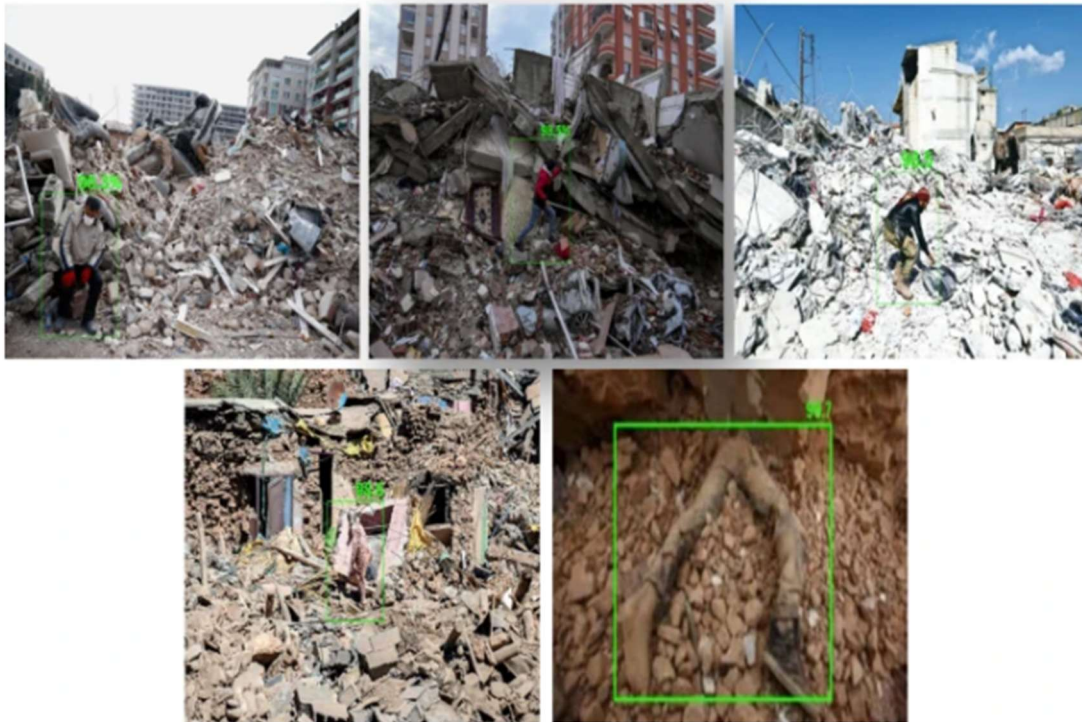


Εικόνα 6-2 Χαρτογράφηση με χρήση UAV [86]

Βήμα 3ο: Ο πάροχος του δικτύου διεξάγει ραδιο-ανίχνευση στις τοποθεσίες SL, χρησιμοποιώντας τους λειτουργικούς Σταθμούς Βάσης ή τα UEs. Οι Σταθμοί Βάσης εκτελούν κατά κύριο λόγο "Μονοστατική Ανίχνευση" (Monostatic Sensing), εκπέμποντας ραδιοκύματα και λαμβάνοντας οι ίδιοι την ηχώ της ανάκλασης (Εικόνα 6-3).



Εικόνα 6-3 ISAC σε περιβάλλον δικτύου [84]



Εικόνα 6-4 Αναγνώριση αντικειμένων – θυμάτων [87]

Βήμα 4ο: Παράλληλα, τα UEs που είναι ενσωματωμένα στα ρομπότ διάσωσης και βρίσκονται εντός εμβέλειας των τοποθεσιών SL, συλλέγουν πολυτροπικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης (multimodal data). Τα δεδομένα αυτά προέρχονται τόσο από πηγές 3GPP (ραδιοσυχνότητες) όσο και από μη-3GPP αισθητήρες (π.χ. κάμερες βάθους, LiDAR, θερμικές κάμερες).

Βήμα 5ο: Οι μετρήσεις αντίληψης μεταφέρονται από το Δίκτυο Ραδιοπρόσβασης (RAN) στον πυρήνα του δικτύου 6G ή στους διακομιστές στο άκρο (Edge Servers) για επεξεργασία.

Βήμα 6ο: Μέσα από τα επεξεργασμένα δεδομένα, τα αντικείμενα που ανιχνεύτηκαν στις τοποθεσίες SL χαρακτηρίζονται (characterised). Η εξαγωγή χαρακτηριστικών περιλαμβάνει το μέγεθος, το σχήμα, την ανίχνευση κίνησης και, κυρίως, την ταξινόμηση υλικού (material characterization). Αυτό επιτρέπει τη διαφοροποίηση μεταξύ του ανθρώπινου ιστού και των τσιμεντένιων ερειπίων (Εικόνα 6-4).

Βήμα 7ο: Το σύστημα υπολογίζει την Πιθανότητα (Likelihood) παρουσίας ανθρώπων σε κάθε μεμονωμένο SL. Ο χάρτης ψηφιοποιείται σε ένα πλέγμα κελιών. Εάν το σχήμα και το υλικό προσομοιάζουν σε ανθρωποειδή μορφή, η οντότητα ταξινομείται ως άνθρωπος (π.χ. αναπαρίσταται με πράσινο χρώμα στο ψηφιακό σύστημα), ενώ τα συμπαγή αντικείμενα ταξινομούνται ως εμποδία (αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα).

Βήμα 8ο: Τέλος, τα επεξεργασμένα αποτελέσματα της υπηρεσίας αντίληψης (δηλαδή η πιθανότητα ύπαρξης ανθρώπων, μαζί με επικουρικές πληροφορίες και συντεταγμένες), επιστρέφονται στο αξιόπιστο τρίτο μέρος, δηλαδή στο κέντρο ελέγχου της υπηρεσίας SAR. Αυτές οι πληροφορίες ενσωματώνονται απευθείας στους χάρτες πλοήγησης των διασωστών.



Εικόνα 6-5 Χάρτης αναγνώρισης προβληματικών υποδομών και αντικειμενων – θυμάτων [88]

Ως μετα-συνθήκη της παραπάνω ροής, οι βασικοί στόχοι (εμπόδια, ρομπότ, άνθρωποι) διαφοροποιούνται πλήρως μέσω της ταξινόμησης υλικών. Χάρη σε αυτή τη διαφοροποίηση, τα πληρώματα SAR μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις ενέργειές τους, να προσπεράσουν τα αδιέξοδα και να προσεγγίσουν τα θύματα ταχύτερα, σώζοντας εν δυνάμει ανθρώπινες ζωές.

6.2.4 Τεχνολογικοί Πυλώνες: ISAC, Sensor Fusion και AI/ML

Για την υποστήριξη της παραπάνω ροής, το 6G επιστρατεύει τρεις τεχνολογικούς πυλώνες [2]:

A. Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC):

Η λειτουργία ISAC αποτελεί τη ραχοκοκαλιά της υπηρεσίας. Αντί να βασίζονται αποκλειστικά σε εξωτερικά ραντάρ, τα ίδια τα τηλεπικοινωνιακά σήματα 6G χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση και ταξινόμηση αντικειμένων, από μία ή πολλαπλές πηγές εκπομπής.

B. Σύντηξη Δεδομένων (Multimodal Sensor Fusion):

Το δίκτυο 6G πρέπει να υποστηρίξει τη συγχώνευση δεδομένων αντίληψης σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα συνδυάζει τα δεδομένα RF (από την ISAC) με δεδομένα από θερμικούς αισθητήρες και μονάδες αναγνώρισης φωνής. Αυτή η πολυτροπική σύντηξη επιτρέπει την ανίχνευση κίνησης, τον εντοπισμό θερμοκρασίας σώματος και την ακρόαση ανθρώπινων φωνών κάτω από τόνους ερειπίων.

Γ. Κατανεμημένη Τεχνητή Νοημοσύνη και Split Inference:

Η επεξεργασία των πολυτροπικών δεδομένων απαιτεί τη χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης. Στο πλαίσιο του 6G, ο σχεδιασμός προβλέπει τον διαχωρισμό των μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης μεταξύ του ρομπότ/UAV και των διακομιστών άκρου (Edge Servers) του δικτύου. Ο διαμερισμός αυτός εξοικονομεί τεράστια ποσά ενέργειας από τη μπαταρία του ρομπότ. Η κατανομή του υπολογιστικού φόρτου απαιτεί ακραία αξιοπιστία δικτύου, καθώς οποιαδήποτε αναντιστοιγία στις

διαστάσεις των δεδομένων εισόδου ή στους πίνακες βαρών κατά τη μετάδοση της τοπολογίας του μοντέλου, θα καθιστούσε το νευρωνικό δίκτυο (π.χ. ένα CNN) άχρηστο.

6.2.5 Παράμετροι Επικοινωνίας και Αντίληψης (Communication parameters)

Για την υλοποίηση των παραπάνω λειτουργιών, ιδίως όσον αφορά τη χαρτογράφηση και τον εντοπισμό θυμάτων, το 5G και τα SDOs θέτουν εξαιρετικά αυστηρούς Βασικούς Δείκτες Απόδοσης (KPIs). Οι συγκεκριμένες παράμετροι διαμορφώνονται ως εξής:

- Ακρίβεια Θέσης (Position accuracy):

Απαιτείται ακρίβεια $< 1\text{m}$ στην κατακόρυφη κλίμακα [V] (Vertical) και $< 0.2\text{m}$ στην οριζόντια κλίμακα [H] (Horizontal). Η ακρίβεια αυτή είναι απαραίτητη για να γνωρίζουν οι διασώστες το ακριβές βάθος στο οποίο είναι θαμμένο ένα θύμα.

- Μέγιστη καθυστέρηση υπηρεσίας αντίληψης (Max sensing service latency):

Ο χρόνος που απαιτείται από την υποβολή του αιτήματος έως την παροχή του σημασιολογικού χάρτη με τις πιθανότητες εντοπισμού πρέπει να είναι μικρότερος των 10 δευτερολέπτων ($< 10\text{s}$).

- Ρυθμός ανανέωσης (Refresh rate):

Οι πληροφορίες θέσης των κινούμενων ρομπότ και οι μεταβολές στο περιβάλλον πρέπει να ανανεώνονται σε χρόνο μικρότερο του 1 δευτερολέπτου ($< 1\text{s}$).

- Αξιοπιστία ανίχνευσης (Detection reliability):

Στον εντοπισμό θυμάτων, το περιθώριο λάθους είναι μηδαμινό. Το ποσοστό αποτυχίας ανίχνευσης (missed detection) πρέπει να είναι αυστηρά $< 0.1\%$, ενώ το ποσοστό ψευδούς συναγερμού (false alarm) πρέπει να διατηρείται $< 1\%$.

- Ανάλυση Εμβέλειας (Range resolution):

Η διακριτική ικανότητα του ραντάρ 6G (ISAC) ορίζεται στα ≤ 0.25 μέτρα.

- Καθυστέρηση και Αξιοπιστία Διαμερισμού Τεχνητής Νοημοσύνης (AI/ML split inference):

Η μέγιστη επιτρεπόμενη end-to-end καθυστέρηση στην ανοδική ζεύξη (uplink) για τη μεταφορά δεδομένων στο άκρο (Edge) είναι 2 ms, με απαιτούμενη αξιοπιστία τηλεπικοινωνιακής σύνδεσης στο 99.9%.

Οι παραπάνω παράμετροι επικοινωνίας - όπως προκύπτουν από το Κεφάλαιο 5 (Πίνακας 5-6) - που διέπουν τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης και αντιστοιχίζονται είναι (Πίνακας 6-1):

Πίνακας 6-1 Αντιστοίχιση προτύπων - σενάριου χρήσης

	3GPP	ETSI	IEEE	ITU
ISAC	TR 22.837	GR ISC 001 V1.1.1	IEEE 802.11bf	ITU-R M.2160-0
Ultra-low latency	TS 22.104	--	IEEE 802.1 TSN	--
Real-time video streaming	TS 23.501	GS MEC 011-1	--	--
Ultra-high reliability	TS 23.503	ETSI GR THz 001	P802.11bn	ITU-R M.2410-0
Edge Computing	TS 23.548	ETSI GS MEC 003	IEEE 1934	ITU-T Y.3510

6.2.6 Ηθικές Διαστάσεις, Ιδιωτικότητα και Κοινωνικός Αντίκτυπος

Η μαζική ανάπτυξη υπερ-ευαίσθητων αισθητήρων (ISAC) ικανών να "βλέπουν" μέσα από τοίχους και να συλλέγουν βιομετρικά δεδομένα θυμάτων εγείρει σοβαρά ηθικά ζητήματα. Όπως τονίζεται στο whitepaper του one6G, η τεχνολογική ανάπτυξη του 6G πρέπει να συμβαδίζει με τη δημιουργία "Ηθικών Προφίλ" (Ethics Profiles) για τη διάσταση του δικτύου [2].

Αυτό προϋποθέτει την αναγνώριση πιθανών προκαταλήψεων (biases) στους αλγόριθμους Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση θυμάτων, καθώς και την αντιμετώπιση διλημάτων προστασίας της ιδιωτικής ζωής (privacy). Η προστασία και η υπευθυνότητα στη διαχείριση των δεδομένων που εξάγονται από τα θύματα (π.χ. ιατρική κατάσταση, τοποθεσία) είναι απαραίτητη για την οικοδόμηση δημόσιας εμπιστοσύνης. Οι προτάσεις του one6G περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση αυτών των ηθικών και νομικών κατευθυντήριων γραμμών στο επερχόμενο πρότυπο IEEE P1955 (Standard for 6G Empowering Robotics).

6.2.7 Περαιτέρω Μελέτη: Αναγνώριση Βιολογικών Χαρακτηριστικών

Ως ένα εξαιρετικά υποσχόμενο, ανοιχτό ερευνητικό πεδίο για την εξέλιξη των 6G ρομποτικών συστημάτων, προτείνεται η μελέτη της δυνατότητας του συστήματος να αναγνωρίζει βιολογικά χαρακτηριστικά.

Η χρήση ραδιοκυμάτων εξαιρετικά υψηλής συχνότητας (mmWave και Terahertz) στο 6G, επιτρέπει στην ISAC να παρέχει ανάλυση επιπέδου χιλιοστού [46]. Η έρευνα κατευθύνεται στην ανάπτυξη μοντέλων που θα αξιοποιούν το φαινόμενο micro-Doppler. Όταν ένα θύμα βρίσκεται παγιδευμένο κάτω από ερείπια (ακόμα και χωρίς οπτική επαφή - NLoS) και αδυνατεί να μιλήσει ή να κινηθεί, το σώμα του εκτελεί ασυναίσθητες, μικροσκοπικές κινήσεις. Το ραντάρ του δικτύου 6G δύναται να αναλύσει τις μετατοπίσεις συχνότητας που προκαλούνται από την αναπνοή (respiration) και τον ρυθμό συστολής-διαστολής της καρδιάς. Αυτή η ασύρματη μέτρηση ζωτικών ενδείξεων σε πραγματικό χρόνο θα επιτρέψει στις ομάδες SAR όχι μόνο να εντοπίσουν ένα σώμα, αλλά να επιβεβαιώσουν ακαριαία την κατάσταση της υγείας του (ζωντανό ή νεκρό) και τον βαθμό της κρισιμότητας, θέτοντας νέες βάσεις στη διάσωση ανθρώπων ζώων.

6.3 Χρονοπρογραμματισμός ζεύξεων για τον σχεδιασμό κίνησης σε επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης

6.3.1 Εισαγωγή: Το Όραμα για τα Σμήνη Διάσωσης

Σε επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (SAR), η ανάπτυξη πολυπράκτορων ρομποτικών συστημάτων (Multi-Robot Systems) αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ανεύρεση επιζώντων. Ωστόσο, στα χαοτικά περιβάλλοντα καταστροφών, η τηλεπικοινωνιακή υποδομή συχνά υπολειτουργεί και τα ρομπότ περιορίζονται δραματικά από την ενεργειακή τους αυτονομία (μπαταρίες).

Σύμφωνα με την ένωση one6G, η μετάβαση από το 5G στο 6G δεν αφορά απλώς την αύξηση της ταχύτητας, αλλά τον ριζικό επανασχεδιασμό της αρχιτεκτονικής μέσω της ενσωμάτωσης ασύρματης αντίληψης (wireless sensing), επικοινωνίας και υπολογιστικής ισχύος απευθείας στα ρομποτικά συστήματα. Για να επιβιώσουν και να λειτουργήσουν τα συνεργατικά ρομπότ (Cobots) σε αυτά τα περιβάλλοντα, η πλοήγηση και η επικοινωνία δεν μπορούν να σχεδιάζονται ανεξάρτητα. Αντιθέτως, απαιτείται ο Σχεδιασμός Κίνησης με Επίγνωση της Επικοινωνίας και ο δυναμικός Χρονοπρογραμματισμός Ζεύξεων (Link Scheduling) [18].

Βάσει αυτής της λογικής, το δίκτυο δεν παρέχει μόνιμα συνδέσεις υπερ-υψηλής απόδοσης σε όλα τα ρομπότ ανεξαιρέτως, αλλά κατανέμει τους τηλεπικοινωνιακούς πόρους έξυπνα, αναλύοντας το "τι ακριβώς" εκτελεί το κάθε ρομπότ τη δεδομένη στιγμή.

Για την υλοποίηση αυτής της αρχιτεκτονικής, το one6G ορίζει συγκεκριμένες παραμέτρους επικοινωνίας, οι οποίες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6-2):

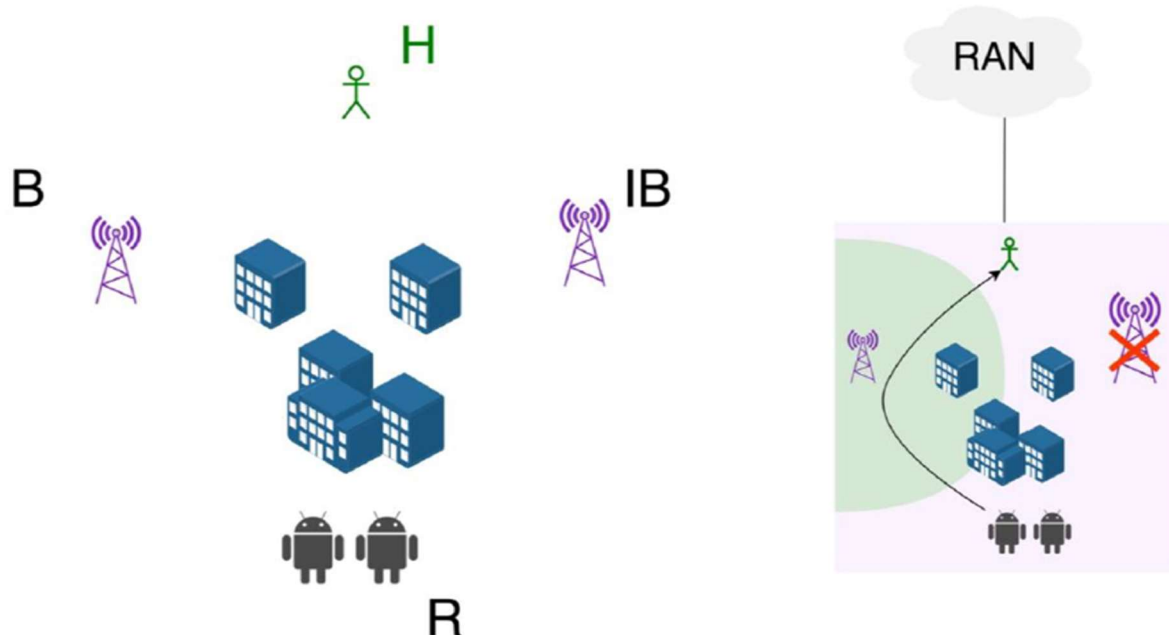
Πίνακας 6-2 Παράμετροι επικοινωνίας

Παράμετρος	Περιγραφή
Motion components	Ταξινόμηση κινήσεων (Διαχωρισμός σε macro-level και micro-level)
Link types	Τύποι συνδέσμων (Normal, Low latency & Ultra Low Latency / URLLC).
Resource Conservation	Εξοικονόμηση πόρων διακόπτοντας τη σύνδεση ή προσαρμόζοντας τους ρυθμούς αντίληψης.

6.3.2 Ταξινόμηση Κινήσεων (Motion Components) βάσει του one6G

Η ένωση one6G, καθορίζει ότι η υποστήριξη της ρομποτικής αυτονομίας απαιτεί την κατανόηση της φύσης των κινήσεων που εκτελεί ένα ρομπότ. Ένα συνολικό Σχέδιο Κίνησης (Motion Plan) ορίζεται ως η ακολουθία έγκυρων χωρικών διαμορφώσεων που εκτελεί ένα ρομπότ για να μεταβεί από μια πηγή σε έναν προορισμό [2].

Για την αποτελεσματική κατανομή των τηλεπικοινωνιακών πόρων, το one6G ταξινομεί τα συστατικά της κίνησης (Motion Components) σε δύο βασικές κατηγορίες:



Εικόνα 6-6 Ενδεικτικό σενάριο πλοήγησης ρομπότ [2]

A. Λειτουργίες Μακρο-επιπέδου (Macro-level operations):

Αυτές οι κινήσεις αφορούν τη γενική χωρική πλοήγηση (Εικόνα 6-6) του ρομπότ εντός της περιοχής καταστροφής [18] και περιλαμβάνουν:

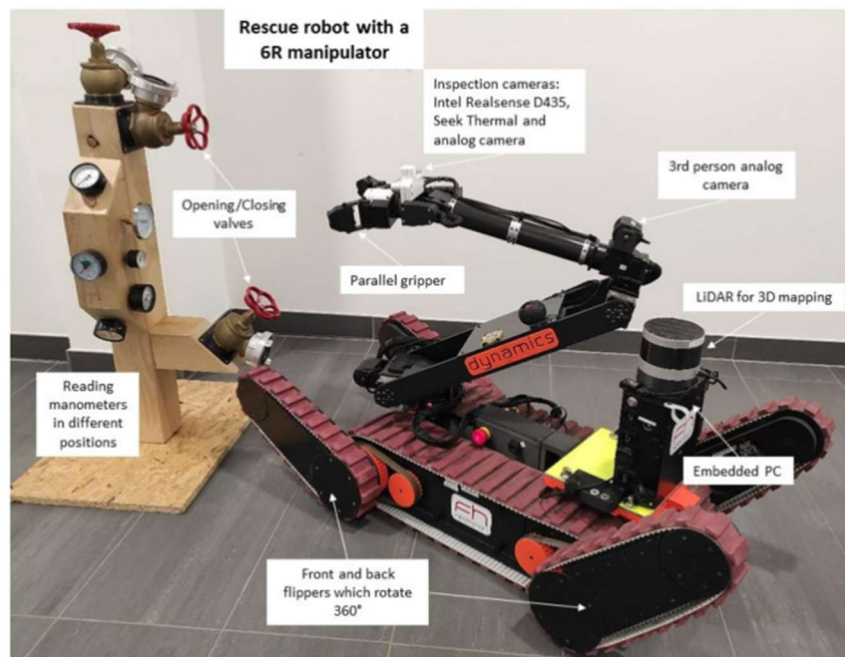
- Ελιγμούς (Manoeuvring) και Πλοήγηση: Η απλή μετακίνηση στον χώρο για εξερεύνηση.
- Εντοπισμό (Localization): Η χρήση του δικτύου 6G και των αισθητήρων για τη δημιουργία χαρτών (SLAM).
- Αποφυγή Συγκρούσεων (Collision Avoidance): Η αδρή αλλαγή πορείας για την παράκαμψη μεγάλων ερειπίων. Σε αυτό το επίπεδο, το ρομπότ καλύπτει μεγάλες αποστάσεις, αλλά οι απαιτήσεις για απόλυτη μηχανική ακρίβεια χιλιοστού είναι χαμηλότερες.

B. Εργασίες Μικρο-επιπέδου (Micro-level tasks):

Αφορούν τη λεπτή και εξαιρετικά κρίσιμη φυσική αλληλεπίδραση του ρομπότ με το περιβάλλον του (Εικόνα 6-7) ή με άλλα ρομπότ (Cobots). Περιλαμβάνουν:

- Προ-λαβή (Pre-grasp): Η φάση της ρομποτικής κίνησης που λαμβάνει χώρα πριν από τη σύλληψη ενός αντικειμένου. Το ρομπότ ρυθμίζει τη βάση του και τους βραχίονές του στην ιδανική θέση, χωρίς να υπάρχει ακόμη δυναμική αλληλεπίδραση με το βάρος του αντικειμένου.
- Σύλληψη και Χειρισμός (Grasping & Manipulation): Η άμεση φυσική επαφή. Σε ένα σενάριο SAR, αυτό μεταφράζεται στη συνεργατική ανύψωση ενός βαρέος ερειπίου από δύο ρομπότ για τον απεγκλωβισμό ενός θύματος.
- Τοποθέτηση (Picking and Placing): Η μεταφορά και εναπόθεση ιατρικού υλικού στο σημείο του θύματος.

Αυτός ο διαχωρισμός είναι θεμελιώδης για το δίκτυο 6G, καθώς κάθε κατηγορία εγείρει εντελώς διαφορετικές απαιτήσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας από τον εννοχρηστωτή του δικτύου.



Εικόνα 6-7 Ενδεικτική ρομποτική πλατφόρμα για λεπτό χειρισμό αντικειμένων [89]

6.3.3 Τύποι Συνδέσμων (Link Types) στο 6G

Βασιζόμενο στην ταξινόμηση των Motion Components, το δίκτυο 6G εκχωρεί δυναμικά τον κατάλληλο τύπο σύνδεσης (Link Type) στο εκάστοτε ρομπότ. Οι τρεις πυλώνες του 5G (eMBB, mMTC, URLLC) επεκτείνονται στο 6G για να καλύψουν τις ακραίες αυτές απαιτήσεις [18].

Το σύστημα διακρίνει τρεις βασικούς τύπους ζεύξεων:

1. Normal Link (Κανονικός/Μαζικός Σύνδεσμος) [18]:

Αντιστοιχεί στην εξέλιξη του mMTC σε Massive Communication. Αποδίδεται στα ρομπότ όταν εκτελούν απλές λειτουργίες Μακρο-επιπέδου, όπως η βασική πλοήγηση (Manoeuvring) σε ασφαλείς περιοχές. Σε αυτή τη φάση, το ρομπότ μεταδίδει στο δίκτυο δεδομένα τηλεμετρίας, αναφορές κατάστασης (status reports) και δεδομένα χαρτογράφησης χαμηλής προτεραιότητας. Ο κανονικός σύνδεσμος δεν απαιτεί ακραίες καθυστερήσεις και επιτρέπει στο δίκτυο να εξυπηρετεί ταυτόχρονα χιλιάδες αισθητήρες στο πεδίο.

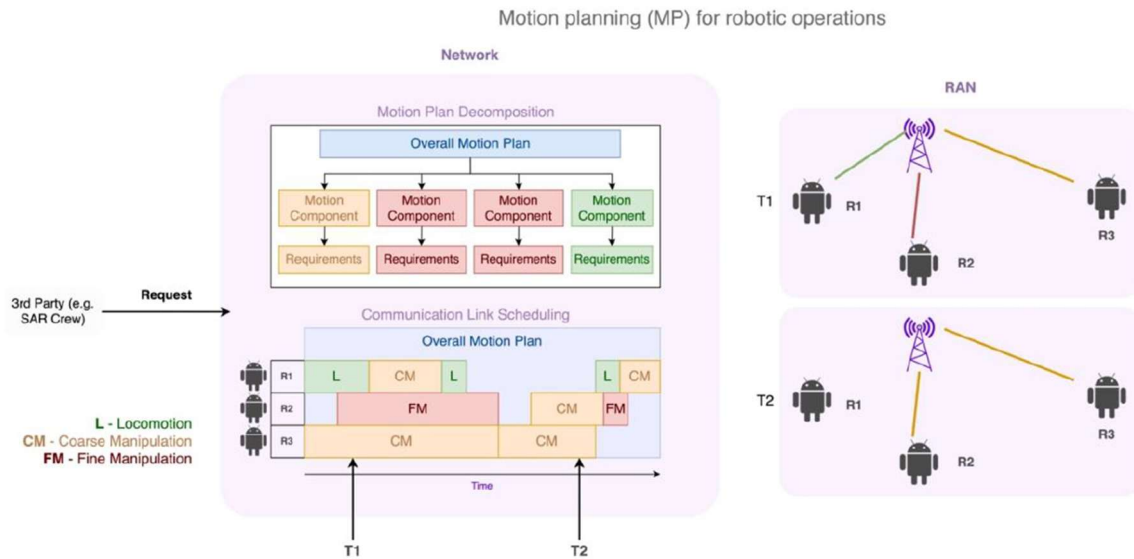
2. Low Latency Link (Σύνδεσμος Χαμηλής Καθυστερήσης) [18]:

Σχετίζεται με την εξέλιξη του eMBB σε Immersive Communication. Ο σύνδεσμος αυτός ενεργοποιείται όταν το ρομπότ προσεγγίζει δύσβατες περιοχές και απαιτείται προηγμένη Αποφυγή Συγκρούσεων ή σύνθετος σχεδιασμός διαδρομής. Επίσης, χρησιμοποιείται όταν το ρομπότ μεταδίδει δεδομένα από κάμερες υψηλής ανάλυσης (LIDAR, Point Clouds) στο δίκτυο του άκρου (Edge Network) για να υπολογιστεί το επόμενο βήμα του. Η καθυστέρηση εδώ πρέπει να είναι επαρκώς χαμηλή για να αποτρέψει την ασταθή συμπεριφορά κατά την κίνηση.

3. Ultra Low Latency Link (URLLC / HURLLC):

Στο πλαίσιο του 6G, η παραδοσιακή URLLC εξελίσσεται στην κατηγορία HURLLC. Αυτός ο υπερ-σύνδεσμος αποδίδεται αυστηρά και μόνο όταν το ρομπότ εισέρχεται στη φάση των Εργασιών Μικρο-επιπέδου (Micro-level tasks), όπως ο συνεργατικός χειρισμός (Cooperative Manipulation). Σύμφωνα με τα KPIs του one6G για ρομπότ-χειριστές, η καθυστέρηση (end-to-end latency) πρέπει να είναι μικρότερη από 7 ms (ή και υπο-χιλιοστο του δευτερολέπτου για αυστηρό έλεγχο) με αξιοπιστία 99.9999%. Εάν δύο ρομπότ επιχειρούν να ανυψώσουν από κοινού ένα εμπόδιο και η εντολή του ενός καθυστερήσει, η κατανομή βάρους θα αλλάξει απότομα, προκαλώντας πτώση του αντικειμένου και θανάσιμο κίνδυνο για το παγιδευμένο θύμα. Σε αυτή τη ζεύξη, ο όγκος των δεδομένων είναι μικρός (πακέτα ελέγχου), αλλά η εγγύηση άφιξης είναι απόλυτη.

Ο τύπος ζεύξης που επιλέγεται εξαρτάται από την βαρύτητα της κίνησης που προκύπτει από το σχέδιο κίνησης. Στο παράδειγμα της Εικόνας 6-8, το πλήρωμα SAR ζητά από τον Πάροχο X να υποστηρίξει ένα σχέδιο ρομποτικής κίνησης (robotic motion plan). Σε αυτό το σχέδιο, ένα κινητό ρομπότ (R1) προσεγγίζει ένα ανθρωποειδές ρομπότ (R2), το οποίο παραλαμβάνει ένα αντικείμενο από το R1 και στη συνέχεια το παραδίδει σε ένα τρίτο ανθρωποειδές ρομπότ (R3). Στην συνέχεια το δίκτυο αποσυνθέτει το σχέδιο κίνησης σε επιμέρους συνιστώσες κίνησης και αντιστοιχίζει τις κατάλληλες απαιτήσεις επικοινωνίας σε κάθε συνιστώσα, λαμβάνοντας υπόψη τη διαμόρφωση του δικτύου (δηλαδή τις δυνατότητες των UEs στα R1–R3 και τις δυνατότητες των τοπικών Σταθμών Βάσης). Έπειτα, δημιουργείται χρονοπρόγραμμα συνδέσεων επικοινωνίας με βάση τον προγραμματισμό των συνιστωσών κίνησης που περιλαμβάνονται στο σχέδιο ρομποτικής κίνησης. Τέλος, οι σύνδεσμοι επικοινωνίας εγκαθίστανται σύμφωνα με το χρονοπρόγραμμα. Για παράδειγμα, στη χρονική στιγμή T1, τα R1, R2 και R3 συνδέονται αντίστοιχα με κανονικές, χαμηλής καθυστέρησης και υπερ-χαμηλής



καθυστέρησης συνδέσεις. Στη χρονική στιγμή T2, το ρομπότ R1 δεν απαιτεί σύνδεση, ενώ τα ρομπότ R2 και R3 απαιτούν μόνο συνδέσεις χαμηλής καθυστέρησης.

6.3.4 Εξοικονόμηση Πόρων (Resource Conservation)

Μία από τις τέσσερις θεμελιώδεις αρχές του 6G, σύμφωνα με το one6G, είναι η Βιωσιμότητα (Sustainability). Η οικολογική σχεδίαση και η βελτιστοποίηση των πόρων αποτελούν αυτοσκοπό. Σε επιχειρήσεις διάσωσης, όπου τα ρομπότ τροφοδοτούνται από μπαταρίες και το διαθέσιμο φάσμα είναι κρίσιμο, η συνεχής διατήρηση συνδέσεων HRLLC θα οδηγούσε σε άμεση εξάντληση της ενέργειας.

Η παράμετρος Resource Conservation υλοποιείται από το δίκτυο 6G μέσω δύο βασικών μηχανισμών:

A. Διακοπή Σύνδεσης (No Link / Intermittent Connectivity):

Όταν το ρομπότ έχει λάβει ένα πλήρες και ασφαλές σχέδιο πλοήγησης (Motion Plan) για ένα χαρτογραφημένο τμήμα του κτιρίου, το δίκτυο μπορεί να διακόψει προσωρινά τη ζεύξη (σκόπιμη αποσύνδεση). Το ρομπότ συνεχίζει αυτόνομα, βασιζόμενο αποκλειστικά στους εσωτερικούς του αισθητήρες. Η επικοινωνία αποκαθίσταται μόνο όταν το ρομπότ φτάσει στον προορισμό του, όταν ανιχνεύσει ένα νέο εμπόδιο, ή όταν πρέπει να εισέλθει σε φάση Pre-grasp.

B. Προσαρμογή Αντίληψης (Sensing Adaptation):

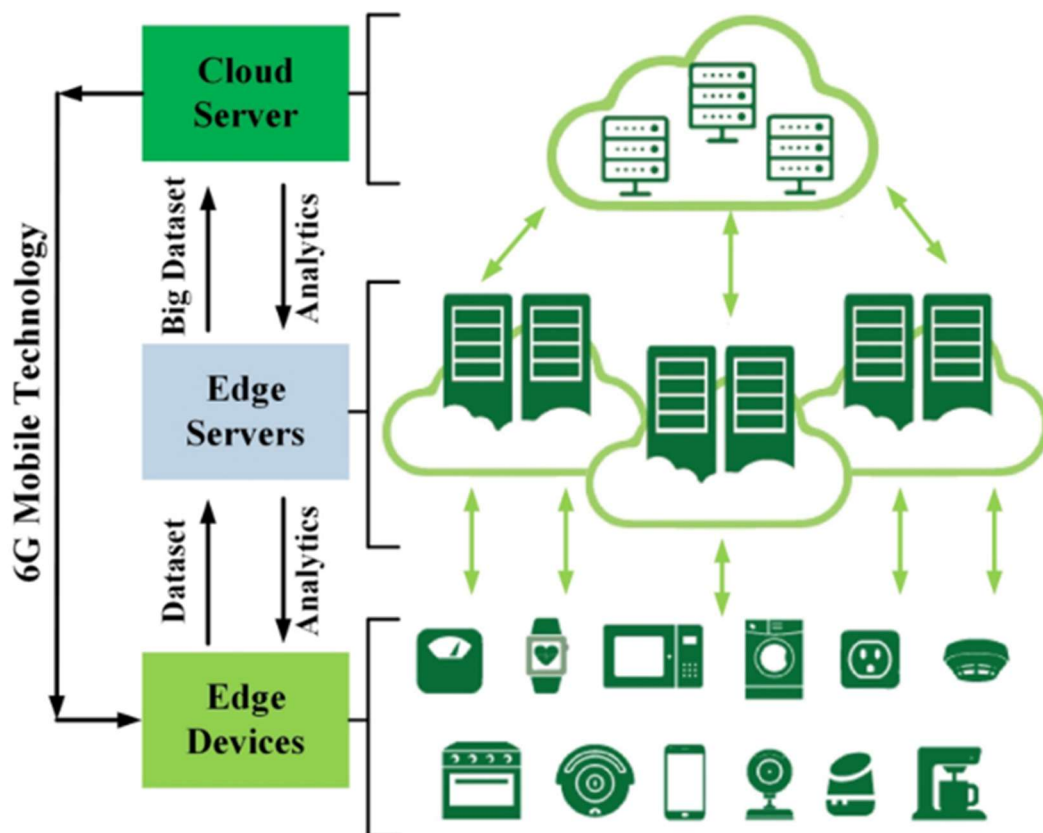
Όπως ορίζεται στα "Atomic Functions" του one6G [2], το δίκτυο εξοικονομεί πόρους προσαρμόζοντας τον ρυθμό ενημέρωσης (Update time) και τις πηγές αντίληψης ανάλογα με την εργασία. Για παράδειγμα, η περιοχή κάλυψης των αισθητήρων (ή ο ρυθμός ανανέωσης μεταβάλλονται δυναμικά με βάση τη δυναμικότητα του περιβάλλοντος. Αν ένα ρομπότ βρίσκεται σε στατική αναμονή, ο ρυθμός ανταλλαγής δεδομένων με τον σταθμό βάσης πέφτει στο ελάχιστο, απελευθερώνοντας ραδιο-πόρους για άλλα ρομπότ που ενδέχεται να εκτελούν κρίσιμες ενέργειες (όπως ιατρική περίθαλψη) εκείνη τη στιγμή.

6.3.5 Η Αρχιτεκτονική του Task Handler και ο Υπολογισμός στο Άκρο (Edge)

Η λήψη αποφάσεων για το πότε θα δοθεί ένας τύπος συνδέσμου ή πότε θα διακοπεί η σύνδεση δεν γίνεται τυχαία, αλλά ενορχηστρώνεται κεντρικά (ή ημι-αποκεντρωμένα). Η αρχιτεκτονική αυτή υποστηρίζεται μέσω συγκεκριμένων "Ατομικών Λειτουργιών" (Atomic Functions), και κυρίως του Task Handler.

Το 6G δίκτυο πρέπει να υποστηρίζει τον διαμοιρασμό ελέγχου (Split control). Σύμφωνα με το one6G, η λειτουργία "Task Handler: Multi-robot Path Plan" αξιοποιεί τον Υπολογισμό στο Άκρο (Edge Computing) (Εικόνα 6-9). Ειδικότερα:

- Το δίκτυο επιτρέπει υπολογισμούς εντός του δικτύου (in-network computing) ή μέσω έμπιστων εφαρμογών τρίτων (trusted 3rd-party applications), προκειμένου να πραγματοποιείται Υπολογιστική Εκφόρτωση (Computational Offloading) στο βαθύ άκρο του δικτύου (deep-edge).
- Ο διακομιστής άκρου (Edge) συγκεντρώνει τα δεδομένα αντίληψης (μέσω της λειτουργίας Perception Handler) από όλο το σμήνος. Έχοντας την παγκόσμια εικόνα, υπολογίζει τις παγκόσμιες διαδρομές (global path plans) για όλα τα ρομπότ.
- Ταυτόχρονα με το σχέδιο κίνησης, ο αλγόριθμος στο άκρο (Edge) χρονοπρογραμματίζει τους ραδιο-πόρους. Γνωρίζοντας ότι το Ρομπότ Α θα χρειαστεί να εκτελέσει "Λεπτό Χειρισμό" στο δευτερόλεπτο T10, του δεσμεύει προκαταβολικά μια σύνδεση HRLLC για εκείνη ακριβώς τη χρονική στιγμή, ενώ το Ρομπότ Β (που απλώς πλοηγείται) παραμένει σε Normal Link.



Εικόνα 6-9 Υπολογισμός στο άκρο [18]

Συμπεράσματα

Ο σχεδιασμός κίνησης με επίγνωση της επικοινωνίας αποτελεί τη βάση της ρομποτικής εξέλιξης στο 6G. Μέσω της αναλυτικής ταξινόμησης των κινήσεων (Macro vs Micro-level operations) και της δυναμικής απόδοσης προσαρμοσμένων τύπων συνδέσμων (Normal, Low, Ultra-low/URLLC), όπως ακριβώς οραματίζεται το one6G επιτυγχάνεται η βέλτιστη ισορροπία. Το δίκτυο δεν λειτουργεί πλέον ως ένας "τυφλός" αγωγός δεδομένων, αλλά ως ένας ευφυής εντοπιστής (μέσω των Task και Perception Handlers), εξασφαλίζοντας την απαραίτητη υπερ-αξιοπιστία στις κρίσιμες στιγμές, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα τεράστια εξοικονόμηση ενέργειας και φάσματος, διασφαλίζοντας την επιτυχή και βιώσιμη λειτουργία των σημανών διάσωσης.

Οι παραπάνω παράμετροι επικοινωνίας - όπως προκύπτουν από το Κεφάλαιο 5 (Πίνακας 5-6) - που διέπουν τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης και αντιστοιχίζονται είναι (Πίνακας 6-3):

Πίνακας 6-3 Αντιστοίχιση προτύπων – σενάριου χρήσης

	3GPP Standard	ETSI	IEEE	ITU
Tactile feedback	TR 22.847	--	IEEE P1918.1	--
Οργάνωση robot	TR 22.916	GR MEC-DEC 050	IEEE 1872	--
Ultra-low latency	TS 22.104	--	IEEE 802.1 TSN	--
Κινητικότητα	TS 23.502	ETSI TS 138 401	IEEE 802.21	ITU-R M.2150
Ultra-high reliability	TS 23.503	ETSI GR THz 001	P802.11bn	ITU-R M.2410-0
Edge Computing	TS 23.548	ETSI GS MEC 003	IEEE 1934	ITU-T Y.3510
Sidelink	TS 38.300	ETSI TS 138 355	--	ITU-R M.1890

6.4 Φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ συνεργατικών ρομπότ

6.4.1 Εισαγωγή: Από την Ανεξάρτητη Πλοήγηση στη Συνεργατική Επαφή

Κατά την εξέλιξη των αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων στις επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης (SAR) και στη βιομηχανία, η ολοκλήρωση μιας αποστολής σπάνια περιορίζεται στην απλή χαρτογράφηση, την παρακολούθηση ή τον οπτικό εντοπισμό ενός στόχου. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, απαιτείται η άμεση φυσική παρέμβαση, η οποία μεταφράζεται στην αλληλεπίδραση των μηχανών με το περιβάλλον, με τα αντικείμενα (π.χ. μεταφορά ερειπίων, μετακίνηση βαρέων φορτίων), με άλλα ρομπότ, αλλά και με τους ίδιους τους ανθρώπους (διασώστες ή θύματα).

Η ένωση one6G οραματίζεται ότι τα δίκτυα 6G θα παρέχουν τον απαραίτητο τεχνολογικό "ιστό" (technical fabric) ώστε τα ρομπότ να ξεπεράσουν τον απλό έλεγχο εντολών και να μετατραπούν σε γνήσια Συνεργατικά Ρομπότ (Cobots). Σε αυτά τα σενάρια, η Φυσική Αλληλεπίδραση (Physical Interaction) απαιτεί τον απόλυτο συγχρονισμό μεταξύ της ενσωματωμένης αντίληψης (ISAC), του υπολογισμού στο άκρο (Edge Computing) και των κατανεμημένων επικοινωνιών υπερ-υψηλής αξιοπιστίας (URLLC). Η ετερογένεια του περιβάλλοντος (π.χ. αντικείμενα διαφορετικού βάρους, ασύμμετρα ερείπια, εύθραυστα υλικά) επιβάλλει στο ρομποτικό σμήνος να μπορεί να αισθάνεται, να σχεδιάζει και να ασκεί ακριβείς δυνάμεις συλλογικά [85] [90].

Στο παρόν κεφάλαιο, αναλύεται το πλαίσιο της φυσικής αλληλεπίδρασης μέσα από τρεις βασικούς άξονες: τη Συνεργατική Μεταφορά Αντικειμένων (Robot-to-Robot), την Κοινόχρηστη Εργασία Διπλού Χρήστη (DUST) για την αλληλεπίδραση με ανθρώπους, και τους πολυτροπικούς μηχανισμούς ελέγχου (απτική ανάδραση και ασφάλεια).

6.4.2 Αρχιτεκτονική και Ροή Εργασιών στη Συνεργατική Μεταφορά (R2R Physical Interaction)

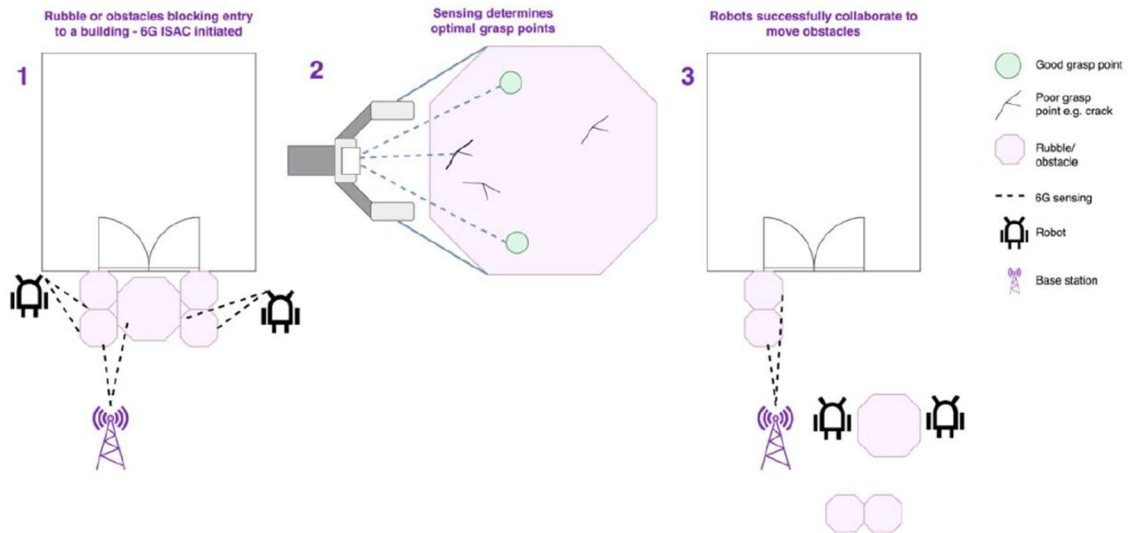
Μία από τις πιο εμβληματικές περιπτώσεις χρήσης του one6G είναι η "Φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ συνεργατικών ρομπότ" (Physical interaction between cooperative robots). Έστω ένα σενάριο Έρευνας και Διάσωσης όπου μια μεγάλη ποσότητα ερειπίων μπλοκάρει την είσοδο ενός κτιρίου, εμποδίζοντας την πρόσβαση των διασωστών. Τα εμπόδια αυτά είναι υπερβολικά βαριά ή ογκώδη για να μετακινηθούν από ένα μεμονωμένο ρομπότ. Απαιτείται Συνεργατική Μεταφορά Οντοτήτων (Cooperative Object Transport - COT), κατά την οποία πολλαπλά ρομπότ προσεγγίζουν, συλλαμβάνουν (grasp) και ανυψώνουν το ερείπιο συγχρονισμένα, εξισορροπώντας τις δυνάμεις για να αποφευχθεί η πτώση του [2].

Για να καταστεί εφικτή αυτή η αλληλεπίδραση, το one6G θέτει τις εξής αυστηρές προδιαγραφές στο σύστημα:

- Το σύστημα ενορχηστρώνεται από έναν Σχεδιαστή Εργασιών (Task Planner - TP), ο οποίος μπορεί να φιλοξενείται στο άκρο (Edge-Cloud) ή σε ένα κεντρικό ρομπότ (Master node).
- Κάθε συνεργατικό ρομπότ διαθέτει έναν ενσωματωμένο Σχεδιαστή Κίνησης (Motion Planner - MP) και έναν Τοπικό Ελεγκτή (Local Controller - LC).
- Ο Τοπικός Ελεγκτής (LC) λειτουργεί με ρυθμό ανανέωσης 1 χιλιοστού του δευτερολέπτου (1 ms), ώστε να προσαρμόζει ακαριαία τη ροπή και τη δύναμη (force control) των κινητήρων.
- Κάθε ρομπότ είναι εξοπλισμένο με ενσωματωμένο εξοπλισμό χρήστη (UE) που διαθέτει ικανότητες ISAC.

Η διαδικασία απομάκρυνσης του ερειπίου δεν είναι γραμμική, αλλά ακολουθεί μια κυκλική, δυναμική ροή 11 βημάτων που διαχειρίζεται το δίκτυο 6G [2]:

- Βήμα 1 (Αίτημα Αντίληψης): Ο Task Planner (Task Planner - TP) διαπιστώνει το φυσικό εμπόδιο και αιτείται από το δίκτυο 6G υψηλής ανάλυσης σάρωση (high-resolution sensing) του ερειπίου (Εικόνα 6-10 Βήμα 1).
- Βήμα 2 (Συνεργατική Σάρωση ISAC): Το δίκτυο 6G συγχρονίζει τα ρομπότ (μέσω των UEs τους) και τους τοπικούς Σταθμούς Βάσης (Base Stations). Οι σταθμοί βάσης συλλέγουν δεδομένα χαμηλότερης ανάλυσης αλλά ευρύτερου πεδίου (για να κατανοήσουν τη συνολική δομή του κτιρίου), ενώ τα UEs των ρομπότ συλλέγουν δεδομένα εξαιρετικά υψηλής ανάλυσης από την επιφάνεια του ερειπίου σε κοντινή απόσταση.
- Βήμα 3 (Σύντηξη Δεδομένων και Υπολογισμός Λαβών): Τα δεδομένα ανίχνευσης συγχωνεύονται (Sensor Fusion) στο άκρο (Edge). Ο TP αναλύει το υλικό, το σχήμα και το κέντρο βάρους του ερειπίου. Μέσω αυτών των πληροφοριών, υπολογίζει τα Βέλτιστα Σημεία Συλλογής/Λαβής (Optimal Grasp Points), αποφεύγοντας σαθρά σημεία ή ρωγμές (Εικόνα 6-10 Βήμα 2).



Εικόνα 6-10 Συνεργατικά ρομπότ [2]

- Βήμα 4 (Προ-λαβή / Pre-Grasp): Ο TP στέλνει τις συντεταγμένες των λαβών στους Motion Planners (MP) των ρομπότ. Τα ρομπότ κινούνται γύρω από το ερείπιο και προεκτείνουν τους βραχίονές τους στη σωστή θέση. Αυτή η φάση εκτελείται μέσω απλών δικτυακών συνδέσεων (Normal links), καθώς δεν υπάρχει ακόμη ανταλλαγή δυνάμεων.
- Βήμα 5 (Αίτημα HRLLC Σύνδεσης): Αμέσως μόλις ολοκληρωθεί η Προ-λαβή, ο κίνδυνος εκτινάσσεται. Ο TP αιτείται την εγκαθίδρυση μιας ζεύξης υπερ-χαμηλής καθυστέρησης και υψηλής αξιοπιστίας (HRLLC) μεταξύ των ρομπότ. Το δίκτυο 6G δεσμεύει τους απαραίτητους ραδιο-πόρους (Sidelink).
- Βήματα 6-8 (Συνεργατικός Χειρισμός και Εξισορρόπηση Δυνάμεων): Ο TP δίνει την εντολή της ανύψωσης. Οι βραχίονες πιάνουν το ερείπιο ταυτόχρονα. Κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, οι Τοπικοί Ελεγκτές (LCs) διαβάζουν τα δεδομένα από τους αισθητήρες δύναμης/ροπής και ανταλλάσσουν αυτά τα δεδομένα με τα συνεργαζόμενα ρομπότ κάθε 1 χιλιοστό του δευτερολέπτου (1 ms). Εάν το ρομπότ A νιώσει ότι το βάρος γέρνει προς το μέρος του, στέλνει ακαριαία σήμα στο ρομπότ B να αυξήσει την ανυψωτική του δύναμη (Decentralized adaptive control). Οποιαδήποτε καθυστέρηση εδώ (latency spike) θα οδηγούσε σε συντονισμό, αστάθεια (chattering) και πτώση του φορτίου.
- Βήματα 9-11 (Αποδέσμευση και Επανάληψη): Μόλις το ερείπιο αποθεθεί στο νέο σημείο, ο TP αιτείται το κλείσιμο της HRLLC ζεύξης για να εξοικονομηθούν πόροι (Resource Conservation). Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα επόμενα εμπόδια.

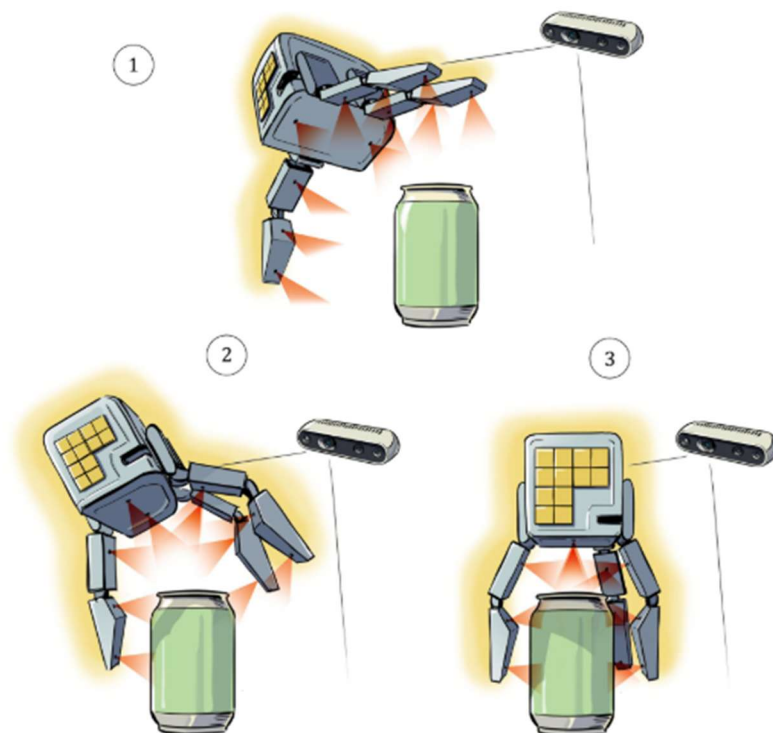
6.4.3 Προσύλληψη (Pre-Grasp) και Αντίληψη Εγγύτητας (Proximity Perception)

Η επιτυχία της φυσικής αλληλεπίδρασης, όπως περιγράφηκε στα Βήματα 1-3, βασίζεται σε μια τεχνολογία που ονομάζεται Αντίληψη Εγγύτητας (Proximity Perception). Προτού ένα ρομπότ ακουμπήσει ένα άγνωστο αντικείμενο στα ερείπια, πρέπει να γνωρίζει τις ιδιότητές του. Στα παραδοσιακά συστήματα, η οπτική κάμερα (Vision) αποτυγχάνει συχνά σε περιβάλλοντα διάσωσης λόγω καπνού, σκόνης ή πλήρους σκότους (Visual occlusions) [91].

Στο 6G, η τεχνολογία ISAC, συνδυασμένη με αισθητήρες ραντάρ χιλιοστομετρικού κύματος (mmWave), αισθητήρες υπερήχων και χωρητικούς αισθητήρες (capacitive sensors) τοποθετημένους πάνω στο δέρμα του ρομπότ (Robotic Skin), αναλαμβάνει τον ρόλο της όρασης [91]. Καθώς ο ρομποτικός βραχίονας πλησιάζει το αντικείμενο, τα ραδιοκύματα σαρώνουν τον χώρο (Εικόνα 6-11). Αυτό επιτρέπει στο ρομπότ να:

- Ταξινομεί τα Υλικά (Material Classification): Υπολογίζοντας τη διηλεκτρική σταθερά του στόχου μέσω της ανάκλασης των RF σημάτων, το ρομπότ γνωρίζει αν πρόκειται να πιάσει ένα κομμάτι μπετόν (μη αγώγιμο, σκληρό), έναν μεταλλικό σωλήνα (αγώγιμο), ή ακόμα και το χέρι ενός ανθρώπου (ανθρώπινος ιστός).
- Προσαρμόζει τη Λαβή του (Preshaping): Ο βραχίονας ευθυγραμμίζεται με την επιφάνεια του αντικειμένου και αναπροσαρμόζει τα δάχτυλα (contour following) πριν επέλθει η φυσική επαφή, αποφεύγοντας την άσκηση υπερβολικής πίεσης που θα μπορούσε να θρυμματίσει το αντικείμενο.

Όπως αναφέρει το οpe6G, η μεταφορά αυτού του τεράστιου όγκου ογκομετρικών δεδομένων (point clouds) για την εύρεση της βέλτιστης λαβής (optimal grasp points), απαιτεί ευρυζωνική σύνδεση της τάξεως του 6G, προκειμένου ο αλγόριθμος στο άκρο (Edge) να επιστρέψει την απόφαση σε πραγματικό χρόνο [2].



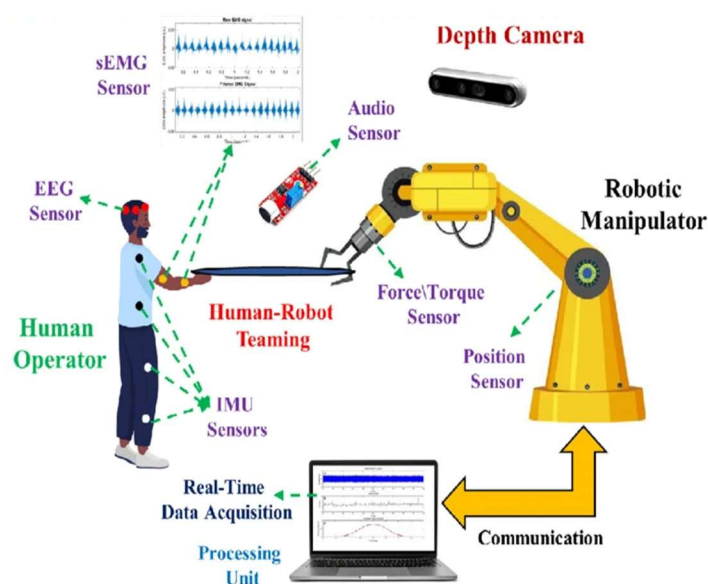
Εικόνα 6-11 Οι φάσεις αναγνώρισης αντικειμένου: (1) Αναγνώριση μέσω όρασης (2) Αναγνώριση μέσω των αισθητήρων (3) Αναγνώριση μέσω επαφής με το αντικείμενο [91]

6.4.4 Η Συμβίωση Ανθρώπου-Ρομπότ: Το Μοντέλο "Dual User Shared Task" (DUST)

Ενώ η αλληλεπίδραση R2R είναι εντυπωσιακή, η απόλυτη πρόκληση στα συστήματα SAR είναι η Φυσική Αλληλεπίδραση Ανθρώπου-Ρομπότ (HRI). Στο πεδίο της διάσωσης, οι διασώστες (ή και οι ίδιοι οι επιζώντες) βρίσκονται στον ίδιο στενό χώρο με τα ρομπότ και πρέπει να συνεργαστούν φυσικά, π.χ., ανυψώνοντας από κοινού ένα φορείο (Shared Control).

Το one6G εισάγει ένα νέο εννοιολογικό πλαίσιο για τη διαχείριση αυτών των καταστάσεων: το Dual User Shared Task (Dual User Shared Task - DUST) - Κοινόχρηστη Εργασία Διπλού Χρήστη. Το DUST αναφέρεται σε συνεργατικά σενάρια όπου δύο χρήστες (π.χ. δύο διασώστες ή ένας διασώστης και το θύμα) συνεργάζονται ταυτόχρονα με το ρομποτικό σύστημα για την επίτευξη ενός κοινού στόχου [12]. Τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του DUST περιλαμβάνουν (Εικόνα 6-12):

- **Κοινή Αντιπροσώπευση (Shared Agency):** Το πλαίσιο διευκολύνει τον διαμοιρασμένο έλεγχο. Τόσο οι άνθρωποι όσο και το ρομπότ συμμετέχουν ενεργά στη λήψη αποφάσεων (π.χ. πώς θα γυρίσουν το φορείο για να περάσει από μια στενή πόρτα). Η αυτονομία εξισορροπείται με την ανθρώπινη συνεργασία.
- **Προσαρμοστική Αλληλεπίδραση (Adaptive Interaction):** Το ρομπότ προσαρμόζεται στις προθέσεις των χρηστών του. Μέσω της τεχνολογίας 6G URLLC, το σύστημα διαβάζει τις μικροκινήσεις των διασωστών και αντιδρά σε πραγματικό χρόνο. Εάν ο διασώστης τραβήξει το φορείο πιο έντονα (force feedback), το ρομπότ "κατανοεί" την πρόθεση και ακολουθεί με μηδενική καθυστέρηση.
- **Πολυτροπική Αντίληψη (Multi-Modal Sensing):** Στα σενάρια DUST, το ρομπότ ενσωματώνει αισθητήρες δύναμης/ροπής (force sensors), ιχνηλάτες κίνησης (motion trackers), αλλά και βιομετρικούς αισθητήρες (biometric sensors) από τα wearables των διασωστών. Συνδυάζοντας τα δεδομένα (Sensor Fusion), το σύστημα αποκτά Αντίληψη του Πλαισίου (Contextual Awareness), γνωρίζοντας την κατάσταση κόπωσης του ανθρώπου, επιτρέποντας στο ρομπότ να αναλάβει μεγαλύτερο ποσοστό του βάρους αν χρειαστεί.



Εικόνα 6-12 Συνεργατική μεταφορά φορτίου/φορείου μεταξύ ανθρώπου και ρομποτικού συστήματος [12]

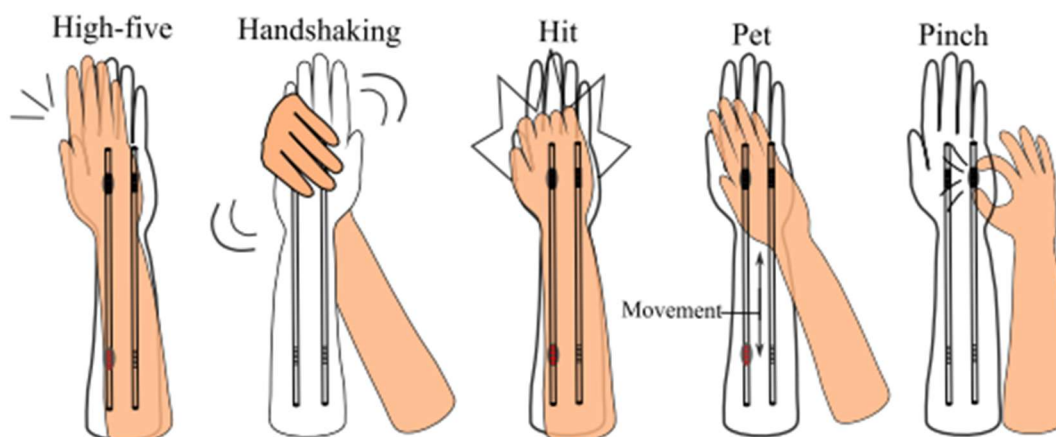
6.4.5 Πολυτροπική Επικοινωνία, Τηλεχειρισμός και Απτικό Διαδίκτυο

Όταν η άμεση συνύπαρξη δεν είναι εφικτή (π.χ. το περιβάλλον είναι άκρως τοξικό ή ραδιενεργό), ο έλεγχος των ρομπότ πρέπει να γίνεται εξ αποστάσεως (Teleoperation). Ωστόσο, στην εκτέλεση λεπτών φυσικών αλληλεπιδράσεων (όπως η παροχή ιατρικής βοήθειας σε ένα παγιδευμένο θύμα, π.χ. μέσω ενός φιδιοειδούς ρομπότ), η οπτική πληροφορία (βίντεο) από μόνη της δεν επαρκεί [92].

Εδώ εισέρχεται ο ρόλος της Οπτικο-απτικής Επικοινωνίας (Visual-Tactile Communication) και του Απτικού Διαδικτύου (Tactile Internet). Μέσω του 6G, το δίκτυο μεταδίδει την αίσθηση της αφής (Kinesthetic / Haptic feedback):

- Μετάδοση Δυναμικού Πεδίου (Dynamic Force Field): Αισθητήρες ινών (π.χ. Fiber Bragg Grating sensors) τοποθετημένοι στα δάχτυλα του ρομπότ (Εικόνα 6-13) (soft grippers) ανιχνεύουν μικρο-μεταβολές πίεσης της τάξης των mN (μιλινιούτον) όταν αγγίζουν το θύμα. Αυτά τα δεδομένα μεταδίδονται ασύρματα μέσω του 6G στο χειριστήριο του διασώστη (master device) [93].
- Κλειστός Βρόχος Δράσης (Closed-loop Control): Ο διασώστης μπορεί, σε πραγματικό χρόνο, να "νιώσει" την αντίσταση του ιστού του θύματος ή τη σκληρότητα του ερειπίου, επιτρέποντας επεμβάσεις ακριβείας (π.χ. απομάκρυνση μπάζων από πάνω του χωρίς να τον τραυματίσει περαιτέρω) [75].

Επιπρόσθετα, στην πλοήγηση ετερογενών ομάδων ανθρώπων-ρομπότ μέσα σε άγνωστα περιβάλλοντα, η απτική ανάδραση προσφέρει εναλλακτικούς τρόπους επικοινωνίας. Σε πειραματικές μελέτες (όπως το πλαίσιο Haptic-Enabled Decentralized Control), η σύνδεση μεταξύ του ανθρώπου και του σμήνους διατηρείται μέσω "απτικών περιβραχιόνιων" (vibrotactile armbands). Αντί ο διασώστης να κοιτάζει συνεχώς μια οθόνη (αποσπώντας την προσοχή του από τα ερείπια), το σύστημα υπολογίζει στο background την απόστασή του από τα άλλα ρομπότ (connectivity maintenance) και στέλνει προσαρμοσμένες δονήσεις στα χέρια του, καθοδηγώντας τον τυφλά προς την ασφαλέστερη διαδρομή και υποδεικνύοντας του πότε πρέπει να περιμένει τα ρομπότ να τον προφτάσουν [94].

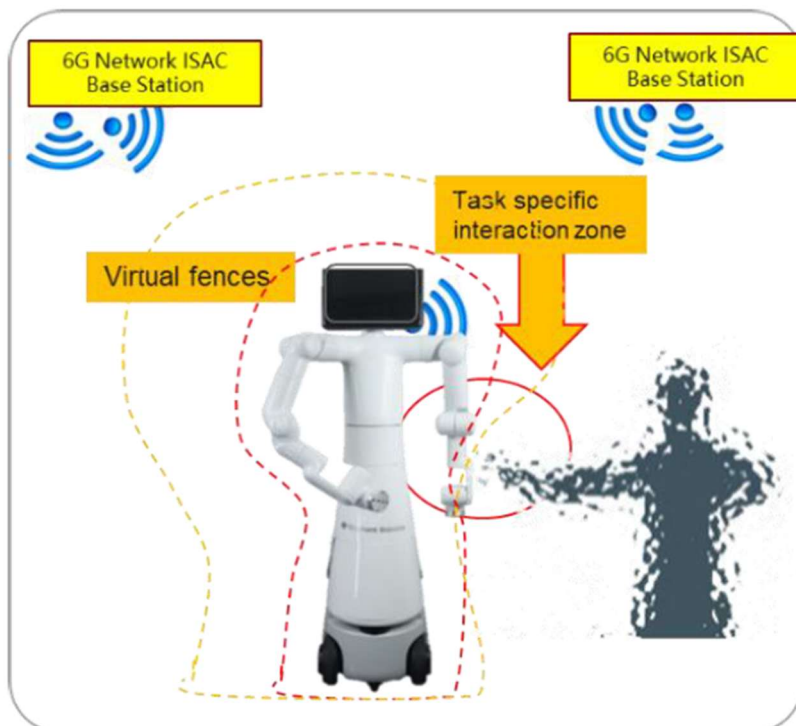


Εικόνα 6-13 Βασικές λειτουργίες αντίληψης μικρο-μεταβολών [93]

6.4.6 Ασφάλεια, Δυναμικές Ζώνες και Κανονιστική Συμμόρφωση

Η στενή φυσική αλληλεπίδραση εγκυμονεί εγγενείς κινδύνους συγκρούσεων και τραυματισμών. Για να εξασφαλιστεί ότι τα ρομπότ του 6G θα συνυπάρχουν αρμονικά με τους ανθρώπους (Coexistence and Safe Navigation), το 6G ενσωματώνει αυστηρούς μηχανισμούς ασφαλείας βασισμένους στα διεθνή πρότυπα ISO (π.χ. ISO 10218-1/2, ISO/TS 15066) [52]:

- Παρακολούθηση Ταχύτητας και Διαχωρισμού (Speed and Separation Monitoring - SSM): Η τεχνολογία ISAC αξιολογεί συνεχώς την απόσταση και τη σχετική ταχύτητα μεταξύ του συνεργατικού ρομπότ (Cobot) και των ανθρώπων διασωστών. Εάν ο άνθρωπος κάνει μια απότομη κίνηση προς τον χώρο εργασίας του ρομπότ, το σύστημα επεμβαίνει.
- Εικονικές Ζώνες Αλληλεπίδρασης (Virtual Interaction Zones - VIZ): Αντί για φυσικά προστατευτικά κάγκελα (τα οποία είναι αδύνατον να τοποθετηθούν σε μια φυσική καταστροφή), το 6G δημιουργεί ψηφιακούς, δυναμικούς "φράκτες" (virtual fences) γύρω από το ρομπότ, οι οποίοι προσαρμόζονται σε μέγεθος ανάλογα με την ταχύτητα και το φορτίο του ρομπότ τη δεδομένη στιγμή (Εικόνα 6-14) [12].
- Λειτουργίες Ασφαλείας Πραγματικού Χρόνου (Real-Time Interface Safety Functions - RTISF): Λειτουργίες που εγγυώνται ότι τα σήματα διακοπής έκτακτης ανάγκης (E-stop) θα παραδίδονται ακαριαία, αξιοποιώντας την αξιοπιστία 99.9999% της HRLLC.
- Αποφυγή Παροδικής Επαφής (Transient Contact Avoidance - TCA): Στρατηγικές που ελέγχουν τον κινηματικό βρόχο του ρομπότ ώστε, ακόμα και αν υπάρξει ακούσια σύγκρουση, η ενέργεια μεταβίβασης (momentum) και η κινητική δύναμη να παραμείνουν αυστηρά κάτω από το όριο ανοχής πόνου του ανθρώπινου σώματος [12].



Εικόνα 6-14 Εικονικές ζώνες Αλληλεπίδρασης [12]

6.4.7 Συμπεράσματα

Η Φυσική Αλληλεπίδραση συνιστά ίσως τον πιο απαιτητικό, αλλά και τον πιο ουσιαστικό τομέα της σύγχρονης ρομποτικής. Όπως αναδεικνύεται από την προσέγγιση της πρωτοβουλίας 5G, η μετάβαση στα Έξυπνα Συνεργατικά Σμήνη δεν είναι ζήτημα αποκλειστικά μηχανολογικό. Η ικανότητα πολλών ρομπότ να σηκώνουν ένα βάρος, να σχεδιάσουν από κοινού τα σημεία λαβής τους (ISAC sensing), να αναπροσαρμόσουν τη ροπή τους σε κλάσματα δευτερολέπτου (1ms loop) και να συνεργαστούν αρμονικά με τον άνθρωπο μοιραζόμενα το φορτίο (DUST), εξαρτάται ολοκληρωτικά από τον συν-σχεδιασμό (co-design) της δικτυακής αρχιτεκτονικής.

Η έλευση του 6G, με τις τεχνολογίες του Απτικού Διαδικτύου, του υπολογισμού στο άκρο (Edge Computing) και της HRLLC, παρέχει τελικά το πολυπόθητο "νευρικό σύστημα" που επιτρέπει στις μηχανές όχι μόνο να βλέπουν και να υπολογίζουν, αλλά να αισθάνονται και να παρεμβαίνουν φυσικά, ανοίγοντας τον δρόμο για τη διάσωση ανθρώπινων ζωών στα πιο εχθρικά περιβάλλοντα του πλανήτη.

Οι παραπάνω παράμετροι επικοινωνίας - όπως προκύπτουν από το Κεφάλαιο 5 (Πίνακας 5-6) - που διέπουν τη συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης και αντιστοιχίζονται είναι (Πίνακας 6-4):

Πίνακας 6-4 Αντιστοίχιση προτύπων – σενάριου χρήσης

	3GPP Standard	ETSI	IEEE	ITU
ISAC	TR 22.837	GR ISC 001 V1.1.1	IEEE 802.11bf	ITU-R M.2160-0
Tactile feedback	TR 22.847	--	IEEE P1918.1	--
Ultra-low latency	TS 22.104	--	IEEE 802.1 TSN (802.1Qbv, 802.1CB)	--
Επικοινωνία μεταξύ robot	TS 23.287	GS MEC 002 / MEC 022	IEEE 1872	ITU-R M.2083
Real-time video streaming	TS 23.501	GS MEC 011-1	--	--
Κινητικότητα	TS 23.502	ETSI TS 138 401	IEEE 802.21	ITU-R M.2150
Ultra-high reliability	TS 23.503	ETSI GR THz 001	P802.11bn	ITU-R M.2410-0
Edge Computing	TS 23.548	ETSI GS MEC 003	IEEE 1934	ITU-T Y.3510
Sidelink	TS 38.300	ETSI TS 138 355	--	ITU-R M.1890

Κεφάλαιο 7ο: Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

7.1 Γενικά Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερεύνησε την προτυποποίηση της ρομποτικής σε σχέση με τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα επόμενης γενιάς (5G-Advanced και 6G), με απώτερο σκοπό την εφαρμογή τους σε ακραία σενάρια Έρευνας και Διάσωσης (SAR).

Όπως καταδείχθηκε μέσα από την ανάλυση της σύγχρονης βιβλιογραφίας, η επιστήμη της ρομποτικής έχει οριστικά μεταβεί από την εποχή των απομονωμένων, τηλεχειριζόμενων μηχανών στο παράδειγμα του Διαδικτύου των Ρομποτικών Πραγμάτων (IoRT). Σε αυτό το νέο τοπίο, τα ρομπότ απαιτούν αδιάλειπτη συνδεσιμότητα για να εκφορτώνουν τον τεράστιο υπολογιστικό τους φόρτο (όπως η τρισδιάστατη χαρτογράφηση SLAM και η αναγνώριση θυμάτων) σε υποδομές υπολογισμού στο άκρο (Edge Computing). Εντούτοις, οι αυστηροί περιορισμοί καθυστέρησης (latency), αξιοπιστίας και εύρους ζώνης υπερβαίνουν τις δυνατότητες των υφιστάμενων δικτύων 5G, καθιστώντας την έλευση του 6G τον απόλυτο τεχνολογικό καταλύτη.

Η μελέτη ανέδειξε ότι το 6G δε θα αποτελεί απλώς ένα δίκτυο μεταφοράς δεδομένων, αλλά ένα "Εξυπνο Δίκτυο των Πάντων". Τεχνολογίες-κλειδιά όπως οι συχνότητες Terahertz (THz), οι Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS) και το Ultra-Massive MIMO, συνδυάζονται για να προσφέρουν πρωτοφανή ακρίβεια εντοπισμού θέσης (επιπέδου εκατοστού) και ακαριαία απόκριση. Ιδιαίτερα για τις αποστολές SAR, όπου η επίγεια υποδομή συχνά καταρρέει, η αρχιτεκτονική των Ενοποιημένων Δικτύων Διαστήματος-Αέρα-Εδάφους (SAGIN) αποτελεί τη μοναδική βιώσιμη λύση διασφάλισης πανταχού παρούσας και ανθεκτικής κάλυψης (disaster-resilient coverage). Παράλληλα, καινοτομίες όπως η Ενσωματωμένη Αντίληψη και Επικοινωνία (ISAC) μετατρέπουν τα ίδια τα ραδιοκύματα σε αισθητήρες ικανούς να εντοπίσουν θύματα κάτω από ερείπια, ενώ η Σημασιολογική Επικοινωνία (Semantic Communication) επιτρέπει στα σμήνη να ανταλλάσσουν μόνο τη "σημασία" της πληροφορίας, εξοικονομώντας κρίσιμους ενεργειακούς και τηλεπικοινωνιακούς πόρους.

Ωστόσο, το κεντρικό συμπέρασμα αυτής της εργασίας είναι ότι όλη αυτή η τεχνολογική υπεροχή παραμένει ανεκμετάλλευτη χωρίς ισχυρή, διεπιστημονική Προτυποποίηση (Standardisation). Για να συνεργαστούν αρμονικά ρομπότ από διαφορετικούς κατασκευαστές μέσω δικτύων επόμενης γενιάς, οι Οργανισμοί Ανάπτυξης Προτύπων (όπως το 3GPP, το ETSI και το IEEE) πρέπει να συγκεράσουν τις προδιαγραφές των τηλεπικοινωνιών με τα πρότυπα ρομποτικής ασφάλειας (π.χ. IEEE P1955, 3GPP TR 22.837, TR 22.104), γεφυρώνοντας το χάσμα.

7.2 Ανοιχτές Προκλήσεις

Παρά τη ραγδαία πρόοδο, η ανάπτυξη αυτόνομων ρομποτικών σμηνών που υποστηρίζονται από 6G δίκτυα αντιμετωπίζει σήμερα σημαντικές προκλήσεις, οι οποίες πρέπει να επιλυθούν:

- **Φυσικοί Περιορισμοί και Υλικό (Hardware Constraints):** Η χρήση συχνοτήτων THz πάσχει από ακραία απώλεια διαδρομής (path loss) και μοριακή απορρόφηση, ενώ απαιτεί ενισχυτές και κεραίες υψηλού κόστους και πολυπλοκότητας. Η ανάπτυξη μικροσκοπικών πομποδεκτών για ρομπότ (που υπόκεινται σε περιορισμούς βάρους και ισχύος) αποτελεί μείζον πρόβλημα.
- **Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Αυτονομία:** Σε αποστολές SAR, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των ιπτάμενων (UAVs) και τετράποδων ρομπότ είναι ο πιο περιοριστικός παράγοντας. Οι

ενεργοβόροι αλγόριθμοι Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning) δυσκολεύονται να εκτελεστούν τοπικά (on-board) δίχως να εξαντλήσουν ταχύως τα συστήματα.

- Χαώδη και Μη Γραμμικά Περιβάλλοντα (Harsh Environments): Η αποφυγή δυναμικών εμποδίων, ο συντονισμένος έλεγχος εσωτερικών δυνάμεων κατά τη φυσική εξαγωγή θυμάτων (casualty extraction) και η αξιοπιστία των αισθητήρων υπό συνθήκες έντονου καπνού, σκόνης ή έλλειψης GPS παραμένουν προβλήματα που η Τεχνητή Νοημοσύνη δεν έχει λύσει πλήρως με εγγύηση ασφάλειας.

7.3 Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας

Η ανασκόπηση των ανοιχτών ζητημάτων διαμορφώνει έναν ξεκάθαρο "οδικό χάρτη" (roadmap) για τους ερευνητές της επόμενης δεκαετίας. Οι βασικές κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας εντοπίζονται στους ακόλουθους τομείς:

7.3.1 Εξέλιξη Αρχιτεκτονικών SAGIN και Μη-Επίγειων Δικτύων (NTN)

Στον τομέα των δικτύων περιοχής καταστροφής, το μέλλον ανήκει στα Ενοποιημένα Δίκτυα Διαστήματος-Αέρα-Εδάφους (SAGIN). Μελλοντικές έρευνες πρέπει να εστιάσουν στη χρήση Κατανεμημένης Βαθιάς Ενισχυτικής Μάθησης (Multi-Agent DRL) για την ταχύτατη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης (routing) και την τοποθέτηση πυλών (gateway placement) μεταξύ δορυφόρων Χαμηλής Τροχιάς (LEO), εναέριων κόμβων (UAVs) και ρομπότ εδάφους.

7.3.2 Ψηφιακά Δίδυμα Δικτύου (Network Digital Twins - NDTs)

Τα Ψηφιακά Δίδυμα αποτελούν έναν τομέα που θα απασχολήσει εκτενώς την επιστημονική κοινότητα τα επόμενα χρόνια. Ειδικότερα, η δημιουργία Network Digital Twins (NDTs) για τα δίκτυα 6G θα επιτρέψει την ακριβή εικονική αναπαράσταση της φυσικής υποδομής. Η μελλοντική έρευνα πρέπει να επιλύσει προβλήματα κλιμάκωσης (scalability) και συγχρονισμού δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (real-time synchronization) μεταξύ φυσικού και ψηφιακού περιβάλλοντος. Έτσι, ο σχεδιασμός περίπλοκων αποστολών SAR και οι αλγόριθμοι δρομολόγησης των ρομπότ θα δοκιμάζονται και θα βελτιστοποιούνται σε κλάσματα δευτερολέπτου στον ψηφιακό κόσμο, προτού εκτελεστούν στο φυσικό περιβάλλον.

7.3.3 Πράσινα Δίκτυα και Ενεργειακή Αειφορία

Το όραμα του 6G ενσωματώνει θεμελιωδώς την έννοια της βιωσιμότητας. Απαιτείται έρευνα στην ελαχιστοποίηση του ενεργειακού αποτυπώματος με στόχο συστήματα που πλησιάζουν την αρχή "Μηδενικά Watt υπό Μηδενικό Φορτίο" (Zero watt @ Zero load). Οι Αναδιαμορφώσιμες Έξυπνες Επιφάνειες (RIS) θα διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο, καθώς επιτρέπουν την ανακατεύθυνση σημάτων εξαλείφοντας τη χρήση ενεργοβόρων ενισχυτών. Επίσης, τεχνολογίες ασύρματης μεταφοράς ενέργειας (Wireless Power Transfer - WPT) σε συσκευές IoT μηδενικής ενέργειας (Zero-Energy IoT) πρέπει να ερευνηθούν εντατικά.

7.3.4 Συνεχής Προσπάθεια Προτυποποίησης

Τέλος, το ερευνητικό και κανονιστικό έργο γύρω από την Προτυποποίηση (Standardisation) πρέπει να εντατικοποιηθεί. Μελετώντας το επερχόμενο πρότυπο Wi-Fi 8 (IEEE 802.11bn) για εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία, την προετοιμασία των Release 19 & 20 από τον 3GPP (με έμφαση στο ISAC) και το

πρότυπο IEEE P1955 για τη Ρομποτική στο 6G, οι μελλοντικές μελέτες οφείλουν να επικεντρωθούν στη συγγραφή ενιαίων πρωτοκόλλων.

7.4 Επίλογος

Η Έρευνα και Διάσωση (SAR) δοκιμάζει τα όρια τόσο της ανθρώπινης αντοχής όσο και της μηχανικής. Οι καταστροφές δεν προειδοποιούν και ο χρόνος που μεσολαβεί —οι χρυσές 72 ώρες— δεν συγχωρεί καθυστερήσεις και λάθη. Σε αυτό το πλαίσιο, τα δίκτυα 6G και η Ρομποτική δε συνιστούν απλώς ακαδημαϊκές ασκήσεις πολυτέλειας ή δείκτες οικονομικής ανάπτυξης. Όταν οι τεχνολογίες αυτές φτάσουν στο στάδιο της ώριμης εμπορικής και επιχειρησιακής υλοποίησης —υποστηριζόμενες από ένα παγκόσμιο, εναρμονισμένο πλαίσιο προτυποποίησης— θα μετατραπούν στην πιο ισχυρή συλλογική ασπίδα της ανθρωπότητας, δημιουργώντας τα θεμέλια για ένα μέλλον όπου κάθε ανθρώπινη ζωή που κινδυνεύει, θα μπορεί να εντοπιστεί και να διασωθεί, όσο αντίξοες κι αν είναι οι συνθήκες.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] C.X. Wang et al., "On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies and Testbeds," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 905-974, 2023.
- [2] One6G White Paper, "6G & Robotics: Identifying Use Cases and Potential Service Requirements - Methodology and Examples," One6G, 2024.
- [3] G. Gkagkas, D. J. Vergados, A. Michalas and M. Dossis, "The Advantage of the 5G Network for Enhancing the Internet of Things and the Evolution of the 6G Network," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2455, 2024.
- [4] Luong N. et al., "Advanced Learning Algorithms for Integrated Sensing and Communication (ISAC) Systems in 6G and Beyond: A Comprehensive Survey," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 28, pp. 2572-2611, 2026.
- [5] M., Ghassemian et al., "Standardisation landscape for 6G robotic services," in *IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Munich, Germany, 2023.
- [6] D. Wen, Y. Zhou, X. Li, Y. Shi, K. Huang and K. Letaief, "A Survey on Integrated Sensing, Communication, and Computation," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 27, no. 5, pp. 3058-3098, 2025.
- [7] Zhang P. et al., "ComAI: The Convergence of Communication and Artificial Intelligence," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 28, pp. 2163-2197, 2026.
- [8] M. Dorigo, G. Theraulaz and V. Trianni, "Swarm robotics: Past, present, and future," in *Proceedings of the IEEE*, 2021.
- [9] Du Z. et al., "A Survey on Autonomous and Intelligent Swarms of Uncrewed Aerial Vehicles (UAVs)," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 26, no. 10, pp. 14477-14500, Oct. 2025.
- [10] J. Krejčí, M. Babiuch, J. Suder, V. Krys and Z. & Bobovský, "Internet of Robotic Things: Current Technologies, Challenges, Applications, and Future Research Topics," *Sensors*, vol. 25, no. 3, p. 765, 2025.
- [11] J. Bravo-Arrabal, R. Vasquez-Martin, J. Fernandez-Lozano and A. Garcia-Cerezo, "Strengthening Multi-Robot Systems for SAR: Co-Designing Robotics and Communication Towards 6G," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 10, no. 2, pp. 305-312, 2026.
- [12] One6G White Paper, "6G Empowering Future Robotics: Mapping Requirements and Advancements for the IMT-2030 Framework," One6G, 2025.
- [13] T. Halsted, O. Shorinwa, J. yu and M. Schwager, "A Survey of Distributed Optimization Methods for Multi-Robot Systems," arXiv.org, 2021. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2103.12840>. [Accessed 08 01 2026].

- [14] H. Farivamejad and S. Berman, "Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems Multirobot Control Strategies for Collective Transport," *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.* 2022, vol. 5, p. 2021, 2022.
- [15] W. Song and M. Myntaha, "Collaborative Task Allocation with Reinforcement Learning and Heterogeneous Graph Attention," *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 13, pp. 8313-8330, 2026.
- [16] I. Ansari, A. Mohammed, Y. Ansari, M. Yusuf Ansari and E. Feo Flushing, "CoLoSSI: Multi-Robot Task Allocation in Spatially-Distributed and Communication Restricted Environments," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 132838-132855, 2024.
- [17] Strinati E. et al., "Goal-Oriented and Semantic Communication in 6G AI-Native Networks: The 6G-GOALS Approach," in *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Belgium, 2024.
- [18] M. Banafaa, I. Shayea, . J. Din, M. Hadri Azmi , A. Alashbi , I. Daradkeh Y and A. Alhammadi, "6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 64, pp. 245-274, 2023.
- [19] K. Chen, L. Zhang and J. Zhong, "Space-Air-Ground Integrated Network (SAGIN) in Disaster Management: A Survey," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 22, no. 5, pp. 4021-4049, 2025.
- [20] Saputra R. et al., "Rescue Robots for Casualty Extraction: A Comprehensive Review," *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, vol. 13, pp. 209164-209196, 2025.
- [21] Solmaz S. et al., "Robust Robotic Search and Rescue in Harsh Environments: An Example and Open Challenges," in *IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, Chemnitz, Germany, 2024.
- [22] M. Dai, N. Huang, Y. Wu, J. Gao and Z. Su, "Unmanned-Aerial-Vehicle-Assisted Wireless Networks: Advancements, Challenges, and Solutions," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 5, pp. 4117-4147, 2023.
- [23] A. Romero, C. Delgado, L. Zanzi, R. Suarez and X. Costa-Perez, "Cellular-enabled Collaborative Robots Planning and Operations for Search-and-Rescue Scenarios," in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Yokohama, Japan, 2024.
- [24] Z. Hou, C. She, Y. Li, D. Niyato, M. Dohler and B. Vucetic, "Intelligent Communications for Tactile Internet in 6G: Requirements, Technologies, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 12, pp. 82-88, 2021.
- [25] J. Zhang, R. Xi, Y. He, Y. Sun, X. Guo, W. Wang, X. Na, Y. Liu, Z. Shi and T. Gu, "A Survey of mmWave-Based Human Sensing: Technology, Platforms and Applications," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 25, no. 4, pp. 2052-2087, 2023.
- [26] N. Dousai and S. Lonearic, "Detecting Humans in Search and Rescue Operations Based on Ensemble Learning," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 26481-26492, 2022.

- [27] A. Albanese, V. Sciancalepore and X. Costa-Perez, "SARDO: An Automated Search-and-Rescue Drone-Based Solution for Victims Localization," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 21, no. 9, pp. 3312-3325, 2022.
- [28] 3GPP, "Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains TS 22.104," 3rd Generation Partnership Project, 2018.
- [29] T. F. Rahman, A. S. Abdalla, K. Powell, W. AlQwide and V. Marojevic, "Network and Physical Layer Attacks and countermeasures to AI-Enabled 6G O-RAN," arXiv.org, 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2106.02494>. [Accessed 15 5 2026].
- [30] 3GPP, "Study on Integrated Sensing and Communication TR 22.837," 3rd Generation Partnership Project, 2022.
- [31] 3GPP, "Study on supporting tactile and multi-modality communication services TR 22.847," 3rd Generation Partnership Project, 2022.
- [32] 3GPP, "System architecture for the 5G System (5GS) 3GPP TS 23.501," 3rd Generation Partnership Project, 2017.
- [33] 3GPP, "5G System Enhancements for Edge Computing; Stage 2 TS 23.548," 3rd Generation Partnership Project, 2021.
- [34] ETSI, "Integrated Sensing And Communications (ISAC);Use Cases and Deployment Scenarios ETSI GR ISC 001 V1.1.," European Telecommunications Standards Institute, 2025.
- [35] ETSI, "TeraHertz modeling (THz);Identification of use cases for THz communication systems ETSI GR THz 001," European Telecommunications Standards Institute, 2024.
- [36] K. Abbas, T. A. Khan, M. Afaq and W. C. Song, "Network Slice Lifecycle Management for 5G Mobile Networks: An Intent-Based Networking Approach," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 80128-80146, 2021.
- [37] ETSI, "Multi-access Edge Computing (MEC);ESTIMED Use Cases & Recommendations ETSI GR MEC-DEC050," European Telecommunications Standards Institute, 2025.
- [38] ITU, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond ITU-R M.2160-0," International Telecommunication Union, 2023.
- [39] IEEE, "Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group," [Online]. Available: <https://1.ieee802.org/tsn/>. [Accessed 3 3 2026].
- [40] IEEE, "IEEE Standard for Haptic Codecs for the Tactile Internet 1918.1.1," Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2024.
- [41] IEEE, "IEEE Standard for Autonomous Robotics (AuR) Ontology IEEE 1872.2," European Telecommunications Standards Institute, 2021.
- [42] M. Oitzman , "The Robot Report," 25 9 2025. [Online]. Available: <https://www.therobotreport.com/ieee-study-group-publishes-framework-for-humanoid-standards/>. [Accessed 15 5 2026].

- [43] A. Kaushik et al., "Toward Integrated Sensing and Communications for 6G: Key Enabling Technologies, Standardization, and Challenges," *IEEE communications standards magazine*, vol. 8, no. 2, p. 52–59, 2024.
- [44] F. Liu et al., "Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 6, p. 1728–1767, 2022.
- [45] R. Shekhar, "Techedgewireless," 18 12 2024. [Online]. Available: <https://www.techedgewireless.com/post/isac-integrated-sensing-and-communication-in-6g>. [Accessed 15 5 2026].
- [46] V. Shatov et al., "Integrated Radio Sensing Capabilities for 6G Networks: AI/ML Perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 28, p. 5081–5120, 2026.
- [47] H. Li, J. Xu, C. Sun, S. Wang, X. Wang and a. H. Zhang, "Integrated Sensing and Communication: 3GPP Standardization Progress," in *2023 21st International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, Singapore, Singapore, 2023.
- [48] 3GPP, "Integrated Sensing and Communication TS 22.137," 3rd Generation Partnership Project, 2023.
- [49] "ITU-R Recommendations," ITU, 2026. [Online]. Available: <https://www.itu.int/publ/R-REC/en>. [Accessed 7 4 2026].
- [50] IEEE, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 4: Enhancements for Wireless LAN Sensing IEEE 802.11bf," Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2025.
- [51] O. Vermesan et al., "Internet of Robotic Things Intelligent Connectivity and Platforms," *Frontiers*, 2020. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/journals/robotics-and-ai/articles/10.3389/frobt.2020.00104/full>. [Accessed 2 3 2026].
- [52] F. Finn, P. Barattini, R. Chaparadza and a. P. Gonçalves, "Landscape of Robotics Standards," StandICT, 2024. [Online]. Available: <https://standict.eu/landscape-analysis-report/landscape-robotics-standards>. [Accessed 2 3 2026].
- [53] 3GPP, "LTE; Application layer support for Vehicle-to-Everything (V2X) services; Functional architecture and information flows (3GPP TS 23.286 version 18.6.0 Release 18).".
- [54] L. Qiao, Y. Zhou, Y. Shi, S. Wu and T. H. Luan, "UAV-Assisted Mobile Edge Computing With Digital Twin," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 74, no. 11, p. 17985–17998, 2025.
- [55] 5G-ACIA, "5G-ACIA," [Online]. Available: <https://5g-acia.org/whitepapers/using-5g-sidelink-in-industrial-factory-applications/>. [Accessed 15 5 2026].
- [56] 3GPP, "NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 TR 38.300," 3rd Generation Partnership, 2022.

- [57] Y. Gao et al., "Sidelink Positioning: Standardization Advancements, Challenges and Opportunities," arXiv.org, 2025. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2512.24803>. [Accessed 5 2 2026].
- [58] 3GPP, "Application layer support for Vehicle-to-Everything (V2X) services; Functional architecture and information flows TS 23.286," 3rd Generation Partnership Project, 2019.
- [59] 3GPP, "Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle-to-Everything (V2X) services TS 23.287," 3rd Generation Partnership Project, 2019.
- [60] ETSI, "5G;NR;Sidelink Positioning Protocol (SLPP);Protocol Specification TS 138.355," European Telecommunications Standards Institute, 2026.
- [61] ITU, "Operational radiocommunication objectives and requirements for advanced Intelligent Transport Systems ITU-R M.1890-1," International Telecommunication Union, 2019.
- [62] S. E. Trevlakis et al., "Localization as a Key Enabler of 6G Wireless Systems: A Comprehensive Survey and an Outlook," *IEEE open journal of the Communications Society*, vol. 4, pp. 2733-2801, 2023.
- [63] R. Giuliano, "From 5G-Advanced to 6G in 2030: New Services, 3GPP Advances and Enabling Technologies," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 63238-63270, 2024.
- [64] P. Kehl et al., "Prototype of 5G Integrated with TSN for Edge-Controlled Mobile Robotics," *Electronics*, vol. 11, no. 11, p. 1666, 2022.
- [65] 3GPP, "Policy and charging control framework for the 5G System (5GS); Stage 2 TS 23.503," 3rd Generation Partnership Project, 2022.
- [66] ITU, "Framework for the support of network slicing in the IMT-2020 network ITU-R M.2150-3," International Telecommunication Union, 2018.
- [67] ITU, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface ITU-R M.2410-0," International Telecommunication Union, 2017.
- [68] K. D. Santos, "1st Workshop on Agentic AI and Wireless Physical Layer Foundation Models," one6G - Taking communications to the next level, 19 Sep. 2025. [Online]. Available: <https://one6g.org/one6g-releases-the-5th-edition-of-the-6g-technology-overview-white-paper/>. [Accessed 8 1 2026].
- [69] A. Santi Seisa, G. Damigos, S. Gajanan Satpute, A. Koval and G. Nikolakopoulos, "Edge Computing Architectures for Enabling the Realisation of the Next Generation Robotic Systems," in *2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Vouliagmeni, Greece, 2022.
- [70] 3GPP, "Study on Network of Service Robots with Ambient Intelligence TR 22.916," 3rd Generation Partnership Project, 2023.
- [71] 3GPP, "5G System (5GS); Study on traffic characteristics and performance requirements for AI/ML model transfer TR 22.874," 3rd Generation Partnership Project, 2021.

- [72] ETSI, "Multi-access Edge Computing (MEC);Edge Platform Application Enablement GR MEC-DEC-V4.1.1," European Telecommunications Standards Institute, 2024.
- [73] IEEE, "IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing IEEE 1934," Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018.
- [74] ITU, "Cloud computing infrastructure requirements, ITU-T Y.3510," International Telecommunication Union, 2026.
- [75] C. Pacchierotti and a. D. Prattichizzo, "Cutaneous/Tactile Haptic Feedback in Robotic Teleoperation: Motivation, Survey, and Perspectives," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 40, pp. 978-998, 2024.
- [76] Z. Chen, N. L. Sun, X. Li, Y. Wang and Chih-Lin, "Enabling Mobile AI Agent in 6G Era: Architecture and Key Technologies," *IEEE Network*, vol. 38, no. 5, pp. 66-75, 2024.
- [77] Shakra Mehak et al., "A roadmap for improving data quality through standards for collaborative intelligence in human-robot applications," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 11, 2024.
- [78] 3GPP, "Procedures for the 5G System (5GS), TS 32.240," 3rd Generation Partnership Project, 2025.
- [79] ETSI, "5G;NG-RAN;Architecture description ETSI TS 138 401 V17.," European Telecommunications Standards Institute, 2022.
- [80] IEEE, "IEEE 802.21," [Online]. Available: <https://www.ieee802.org/21/>. [Accessed 24 2 2026].
- [81] ISO, "Robotics - Safety requirements, ISO 10218-1:2025," International Organization for Standardization, 2025.
- [82] ITU, "High efficiency video coding, H.265," International Telecommunication Union, 2026.
- [83] S. Robitzsch et al., "Architecture Considerations for ISAC in 6G," arXiv.org, 2025. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2508.13736>. [Accessed 5 2 2026].
- [84] H. Pennanen, T. Hanninen, O. Tervo, A. Tolli and M. Latva-Aho, "6G: The Intelligent Network of Everything," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 1319-1421, 2025.
- [85] M. A. Uusitalo et al., "Hexa-X The European 6G flagship project," in *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Porto, Portugal, 2021.
- [86] C. EU, "New technology and tools to improve urban search and rescue operations," CORDIS, 04 10 2019. [Online]. Available: <https://cordis.europa.eu/article/id/407042-new-technology-and-tools-to-improve-urban-search-and-rescue-operations>. [Accessed 20 5 2026].
- [87] R. Jadeja, T. Trivedi and J. Surve, "Survivor detection approach for post earthquake search and rescue missions based on deep learning inspired algorithms," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, 2024.

- [88] A. Blog, "A.I Enabled Disaster Response," ArcGIS , 14 11 2019. [Online]. Available: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/arcgis-enterprise/public-safety/a-i-enabled-disaster-response>. [Accessed 5 20 2026].
- [89] M. Anschober, R. Edlinger, R. Froschauer and A. Nüchter, "Inverse Kinematics of an Anthropomorphic 6R Robot Manipulator Based on a Simple Geometric Approach for Embedded Systems," *Robotics*, vol. 12, no. 4, p. 101, 2023.
- [90] J. P. Queralta et al, "Collaborative Multi-Robot Systems for Search and Rescue: Coordination and Perception," arXiv.org, 2020. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2008.12610>. [Accessed 22 05 2026].
- [91] Escaida Navarro, Stefan et al., "Proximity Perception in Human-Centered Robotics: A Survey on Sensing Systems and Applications," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 38, no. 3, pp. 1599-1620, 2022.
- [92] Z. Wang, M. Chen and Q. Liu, "A review on multimodal communications for human-robot collaboration in 5G: from visual to tactile," *Intelligence and Robotics*, vol. 5, no. 3, pp. 579-606, 2025.
- [93] Gaitán-Padilla, María et al., "Touch-Sensitive Hand Interactions for Social Robots Using Fiber Bragg Grating Sensors," in *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, Hangzhou, China, 2025.
- [94] M. Aggravi, A. Elsherif, P. Giordano and C. Pacchierotti, "Haptic-Enabled decentralized control of a heterogeneous human-robot team for search and rescue in partially-known environments," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 4843-4850, 2021.
- [95] X. Zhu, J. Liu, L. Lu, T. Zhang, T. Qiu, C. Wang and Y. Liu, "Enabling Intelligent Connectivity: A Survey of Secure ISAC in 6G Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 27, no. 2, pp. 748-781, 2025.
- [96] K. Shi, S. He, Z. Shi, A. Chen, Z. Xiong, J. Chen and J. Luo, "Radar and Camera Fusion for Object Detection and Tracking: A Comprehensive Survey.," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 28, pp. 3478-3520, 2026.