



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

"Time sensitive networking για 5G Δίκτυα"

"Time sensitive networking for 5G Networks"

ΦΟΙΤΗΤΗΣ:

ΤΣΕΒΑΣ ΦΩΤΙΟΣ (2931)

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:

ΠΟΛΙΤΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ MSc, PhD , ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ 2022

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή,

ΠΑΤΡΑ, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

- 1.
- 2.
- 3.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....	6
ΕΙΚΟΝΕΣ.....	9
ΠΙΝΑΚΕΣ.....	10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΓΕΝΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

1.1 Ορισμός ασύρματου δικτύου.....	11
1.2 Ιστορική εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών.....	11
1.3 1G σε 5G	12
1.4 Σύγκριση 5G με τις προηγούμενες γενειές	14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: INDUSTRY 4.0

2.1 Ορισμός	16
2.2 Δυνατότητες του Industry 4.0	16
2.3 Cyber Physical System.....	20
2.4 Βασικά χαρακτηριστικά & θεμελιώδεις αρχές.....	22

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΚΤΥΑ 5^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ (5G)

3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	28
3.2 Αρχιτεκτονική 5G.....	31
3.3 Τεχνολογίες δικτύων 5 ^{ης} γενιάς.....	33
3.4 Εφαρμογές 5G.....	37
3.5 Μειονεκτήματα και ανησυχίες.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: TIME SENSITIVE NETWORK (TSN)

4.1 Χαρακτηριστικά.....	42
4.2 Γενική αρχιτεκτονική TSN.....	43
4.3 Βασικά συστατικά – εργαλεία TSN.....	46
4.4 Γιατί TSN;	48
4.5 Used cases.....	51

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 5G ME TIME SENSITIVE NETWORK

5.1 Περιγραφή.....	54
--------------------	----

5.2 Ενσωμάτωση & Αξιοπιστία.....	56
5.3 Αρχιτεκτονική.....	59
5.4 Ανάπτυξη 5G-TSN σε εργοστάσιο.....	65
5.5 Περιπτώσεις Δοκιμών -Κοινοπραξίες.....	71
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	74
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην πτυχιακή αυτή εργασία εξετάζεται η συνύπαρξη του time sensitive networking με τα 5G δίκτυα. Αρχικά παρουσιάζεται η ιστορική εξέλιξη των γενιών των ασύρματων δικτύων από το 1G στο 5G.

Στην συνέχεια γίνεται εκτεταμένη αναφορά στο Time Sensitive Networking (TSN) το οποίο αποτελεί μια επέκταση στα παραδοσιακά δίκτυα Ethernet. Το TSN παρέχει ντετερμινιστική καθυστέρηση και απώλεια πακέτων υπό συμφόρηση, επιτρέποντας τη σύγκλιση κρίσιμης και μη κρίσιμης κίνησης στο ίδιο δίκτυο και μπορεί να κατανέμει με ακρίβεια το χρόνο στο δίκτυο.

Ακολουθεί ακριβής περιγραφή των δικτύων 5^{ης} γενιάς (5G) τα οποία αποτελούν την επόμενη γενιά σύνδεσης κινητών συσκευών στο διαδίκτυο, προσφέροντας πιο γρήγορες από ποτέ ταχύτητες αλλά και πιο αξιόπιστες συνδέσεις. Το 5G δίκτυο έχει ως κύριο σκοπό να συνδυάσει δραστικές λύσεις για να διασφαλίσει περισσότερη χωρητικότητα, χαμηλότερη καθυστέρηση, περισσότερη εμπιστευσιμότητα και εξοικονόμηση ενέργειας.

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση (Βιομηχανία 4.0) καθώς είναι η συνεχιζόμενη αυτοματοποίηση των παραδοσιακών βιομηχανικών και βιομηχανικών πρακτικών, χρησιμοποιώντας σύγχρονη έξυπνη τεχνολογία. Επειδή, η επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή μεγάλης κλίμακας (M2M) και το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) είναι ενσωματωμένα για αυξημένο αυτοματισμό, βελτιωμένη επικοινωνία και αυτοπαρακολούθηση και παραγωγή έξυπνων μηχανών που μπορούν να αναλύσουν και να διαγνώσουν ζητήματα χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, βρίσκει εφαρμογή το TSN με το 5G.

Τέλος, αναπτύσσεται το πεδίο της συνεργασίας του 5G με το TSN μέσω θεωρητικής και πρακτικής εφαρμογής και δοκιμών.

ABSTRACT

This diploma thesis examines the coexistence of time sensitive networking with 5G networks. Firstly, the historical evolution of the generations of wireless networks from 1G to 5G is presented.

Then there is an extensive reference to Time Sensitive Networking (TSN) which is an extension of traditional Ethernet networks. TSN provides deterministic latency and packet loss, allowing critical and non-critical traffic to converge on the same network and can accurately allocate time on the network.

The following is an accurate description of 5th generation (5G) networks which are the next generation of mobile internet connection, offering faster than ever speeds but also more reliable connections. The main purpose of the 5G network is to combine drastic solutions to ensure more capacity, lower latency, more reliability and energy savings.

Chapter 4 describes the fourth industrial revolution (Industry 4.0) as it is the ongoing automation of traditional industrial and industrial practices, using modern smart technology. Because, large-scale machine-to-machine (M2M) communication and Internet of Things (IoT) are integrated for increased automation, improved communication and self-monitoring, and the production of intelligent machines that can analyze and diagnose issues without the need for human intervention, finds TSN application with 5G.

Finally, the field of 5G cooperation with TSN is developed through theoretical and practical application and testing.

AKPΩNYMIA

1G	First Generation
2G	Second Generation
3G	Third Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Fourth Generation
5G	Fifth Generation
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industry and Automation
AF	Application Function
AGV	Automated Guided Vehicle
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
AVB	Audio/Video Bridging
BDMA	Beam Division Multiple Access
C2C	Controller-to-Controller
C2D	Controller-to-Device
CBS	Credit Based Shaper
CNC	Central Network Controller
CoMP	Coordinated Multi Point
CPS	CyberPhysical Systems
CUC	Centralized User Configuration
D2Cmp	Device-to-Compute communications
D2D	Device to Device
DS-TT	Device-side TSN Translator
E2E	End-to-End
EDGE	Enhanced Data rates for Global Evolution

eMBB	enhanced Mobility Broad Band
ERP	Enterprise Resource Planning
FCC	Federal Communications Commision
FRER	Frame Replication and Elimination for Reliability
FWA	Fixed Wireless Access
Gb/s	Gigabit per second
Gbps	GigaBits
GHz	Gigahertz
GPRS	General Packet Radio Service
gPTP	generic Precision Time Protocol
GSM	Global System for Mobile
GUI	Graphical User Interface
HSPA	High Speed Packet Access
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIC	Industrial Internet Consortium
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IT	Information Technology
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine

MES	Manufacturing Execution System
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
mMTC	machine Massive Type Communication
NFV	Network Functions Virtualization
NR	New Radio
NTP	Network Time Protocol
NW-TT	Network-Side TSN Translator
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OPC/UA	Open Platform Communications United Architecture
OT	Operational Technology
PLC	Programmable Logic Controller
PTP	Precision Time Protocol
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
SDN	Software-Defined Networking
SSB	Single-Sideband Modulation
SMS	Short Message Service
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TSN	Time Sensitive Network
UE	User Equipment
UDD	Ultra Dense Deployments
UPF	User Plane Function
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
WAN	Wide Area Network

WAP	Wireless Application Protocol
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network
WWAN	Wireless Wide Area Network
ΤΠ	Τεχνολογία Πληροφοριών

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1.1	Εξέλιξη ασύρματων δικτύων επικοινωνιών.
Εικόνα 1.2	Η πορεία για τα 5G δίκτυα
Εικόνα 2.1	Εννέα τεχνολογίες – καταλύτες εξέλιξης της βιομηχανικής παραγωγής (Industry 4.0)
Εικόνα 2.2:	Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT) – εφαρμογή στο πλαίσιο του Industry 4.0.
Εικόνα 2.3:	Παράδειγμα εφαρμογής Cyber-Physical Συστημάτων σε μοντέλο παραγωγής και διανομής βάση της ζήτησης (Just-In-Time)
Εικόνα 2.4	κύκλωμα ελέγχου και επεμβάσεων στη παραγωγή είτε συνολικά ή σε μεμονωμένες μονάδες
Εικόνα 2.5	Έξυπνο Εργοστάσιο (Smart Factory
Εικόνα 2.6	Παραδοσιακή γραμμή παραγωγής έναντι γραμμής παραγωγής έξυπνου εργοστασίου.
Εικόνα 2.7	Τοπολογία δικτύου στο έξυπνο εργοστάσιο
Εικόνα 3.1	Η επίδραση των τεχνολογιών δικτύων στις διάφορες συχνότητες από το 2017 έως το 2022.
Εικόνα 3.2	Γενική Αρχιτεκτονική 5G
Εικόνα 3.3	Μαζικές κεραίες MIMO
Εικόνα 3.4	Αρχιτεκτονική SDN

Εικόνα 3.5	Εφαρμογές, τεχνολογίες και υπηρεσίες 5ης γενιάς δικτύων
Εικόνα 4.1	Το TSN επιτρέπει αυτό που συχνά περιγράφεται ως "σύγκλιση IT και OT".
Εικόνα 4.2	TSN ροή δικτύου
Εικόνα 4.3	Μετατροπή της πυραμίδας αυτοματισμού
Εικόνα 4.4	Παράδειγμα εφαρμογής TSN
Εικόνα 5.1	Αναπαράσταση συνεργασίας 5G με TSN
Εικόνα 5.2	Λειτουργία παραγωγικής διαδικασίας με 5G και TSN
Εικόνα 5.3	Ευέλικτη χρήση ραδιοφωνικών πόρων σε 5G NR.
Εικόνα 5.4	Απεικόνιση του τεμαχισμού RAN.
Εικόνα 5.5	Υποστήριξη 5G – TSN για συγχρονισμό χρόνου
Εικόνα 5.6	Αλληλεπίδραση 5G – TSN για την διαχείριση της βιομηχανικής επικοινωνίας
Εικόνα 5.7	Υιοθέτηση 5GS στον βιομηχανικό αυτοματισμό
Εικόνα 5.8	Παράδειγμα εισαγωγής του TSN σε εργοστάσιο
Εικόνα 5.9	Υιοθέτηση 5G στον βιομηχανικό αυτοματισμό

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1	Εξέλιξη της παραγωγής.
Πίνακας 5.1	Τύποι επισκεψιμότητας βιομηχανικών αυτοματισμών, απαιτήσεις υπηρεσιών και συναφείς λειτουργίες TSN

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΓΕΝΙΩΝ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

1.1 Ορισμός ασύρματου δικτύου

Ασύρματο δίκτυο καλείται ένα δίκτυο όπου η επικοινωνία τόσο των χρηστών όσο και των δομικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται μπορεί να πραγματοποιηθεί πλήρως ή μερικώς χωρίς τη χρήση καλωδίων.

Ένα ασύρματο δίκτυο χρησιμοποιεί ως φορείς της πληροφορίας ραδιοκύματα. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα ενός ασύρματου δικτύου είναι η ευελιξία του, αφενός γιατί δεν χρειάζονται καλώδια για τη σύνδεση τερματικών και αφετέρου διότι είναι εφικτή η κινητικότητα των χρηστών. Στην κατηγορία των ασύρματων δικτύων ανήκουν:

- Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας.
- Οι δορυφορικές επικοινωνίες.
- Τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα WMAN (Wireless Metropolitan Area Network).
- Τα ασύρματα τοπικά δίκτυα WLAN (Wireless Local Area Network).
- Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα WPAN (Wireless personal Area Network).
- Τα ασύρματα δίκτυα ευρείας περιοχής WWAN (Wireless wide area network).¹

1.2 Ιστορική εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών

Ο G. Marconi, Ιταλός εφευρέτης, έκανε την αρχή για την πορεία των επικοινωνιών του σήμερα. Οδήγησε την πορεία των ασύρματων επικοινωνιών αποστέλλοντας το γράμμα “S” σε μια απόσταση 3 χιλιομέτρων με την χρήση του κώδικα Morse με την βοήθεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.²

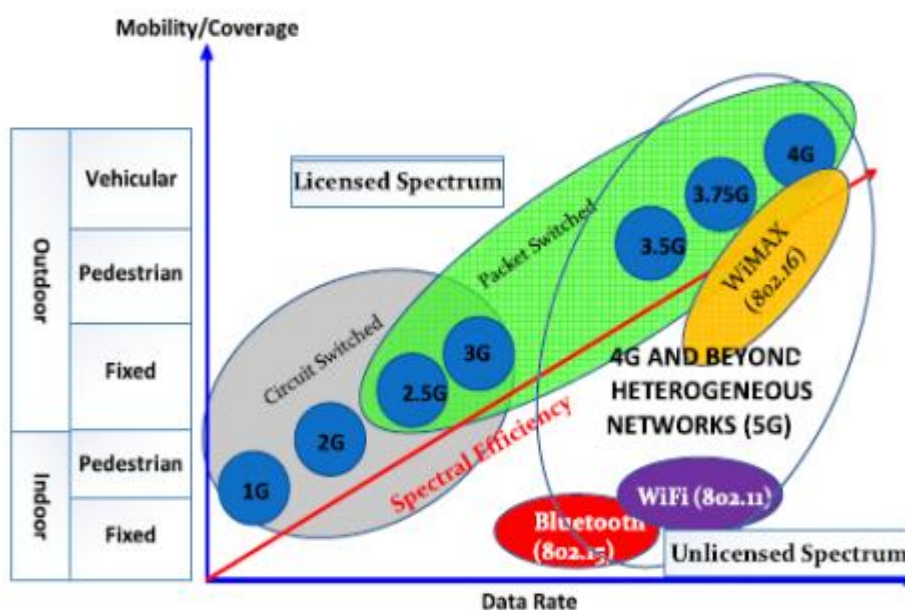
Οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν γίνει αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του σήμερα αλλά και του αύριο. Η δορυφορική επικοινωνία, η τηλεόραση και το ραδιόφωνο συντέλεσαν στον τρόπο που με τον οποίο λειτουργεί η κοινωνία μας σήμερα. Όσο οι ασύρματες τεχνολογίες αυξάνονται, ο ρυθμός δεδομένων, η κινητικότητα και η φασματική αποτελεσματικότητα είναι αναπόφευκτο να αυξηθούν επίσης.

Οι τεχνολογίες στις πρώιμες γενιές δικτύων κινητής τηλεφωνίας, δηλαδή οι τεχνολογίες 1^{ης} γενειάς (1G) και 2^{ης} γενειάς (2G) χρησιμοποιούν εναλλαγή κυκλώματος ενώ οι

¹ Παπαϊωάννου Ε. Κινητά και ασύρματα δίκτυα

² Simons,R “Guglielmo Marconi και πρώιμα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας”

τεχνολογίες 2.5G και 3^{ης} γενιάς (3G) χρησιμοποιούν την εναλλαγή κυκλώματος και πακέτων. Τον ίδιο τρόπο χρησιμοποιούν και οι τεχνολογίες και οι επόμενες 3.5G έως και τα 5^{ης} γενιάς (5G). Μαζί με τις εναλλαγές που χρησιμοποιούνται, διαφοροποιείται επίσης το αδειοδοτημένο φάσμα με το μη-αδειοδοτημένο φάσμα. Όλες οι εξελισσόμενες γενιές χρησιμοποιούν το αδειοδοτημένο φάσμα ενώ τεχνολογίες όπως το Wi-Fi, το Bluetooth και το WiMax χρησιμοποιούν το μη αδειοδοτημένο φάσμα. (Εικόνα 1.1)



Εικόνα 1.1: Εξέλιξη ασύρματων δικτύων επικοινωνιών. Πηγή :Gupta, Akhil. 2015

1.3 Από 1G σε 5G

Πριν από τα δίκτυα 1^{ης} γενιάς όλες οι ασύρματες επικοινωνίες ήταν φωνητικές και χρησιμοποιήθηκαν αναλογικά συστήματα με μονοδιάστατη διαμόρφωση SSB (Single-Sideband Modulation)³

Δίκτυα 1^{ης} Γενιάς (1983): Τα πρώτα δίκτυα έκαναν την εμφάνισή τους τη δεκαετία του 1980. Όλες οι ασύρματες επικοινωνίες ήταν φωνητικές. Το 1966, το Bell Labs πήρε την απόφαση να υιοθετήσει αναλογικά συστήματα για ένα κινητό σύστημα μεγάλης χωρητικότητας, για το λόγο ότι τα ψηφιακά ραδιοσυστήματα ήταν πολύ ακριβά.

³ R. Baldemair et al., "Evolving wireless communications: Addressing the challenges and expectations of the future,"

Δίκτυα 2^{ης} Γενιάς 2G (1990): Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, όλες οι ασύρματες επικοινωνίες ήταν φωνητικές. Το ευρωπαϊκό GSM (Global System for Mobile) αποτέλεσε ένα ψηφιακό σύστημα και χρησιμοποιούσε πολυπλεξία TDMA (Time Division Multiple Access). Δεδομένου ότι η AT & T (American Telephone and Telegraph Company) πωλήθηκε το 1980, κανένα ερευνητικό ίδρυμα (όπως το Bell Labs) δεν θα μπορούσε να αναπτύξει ένα εξαιρετικό σύστημα 2G όπως και για το σύστημα 1G στη Βόρεια Αμερική. Έπειτα το GSM ονομάστηκε 2G. Η μετάβαση από 1G σε 2G σημαίνει ουσιαστική μετάβαση από το αναλογικό σύστημα στο ψηφιακό σύστημα.

2.5G (1995): Όλες οι ασύρματες επικοινωνίες είναι κυρίως για φωνή υψηλής χωρητικότητας με περιορισμένη υπηρεσία δεδομένων.

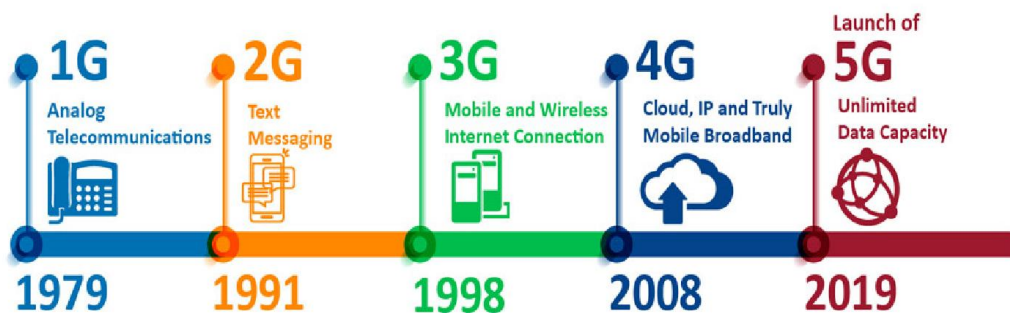
Δίκτυα 3^{ης} Γενιάς 3G (1999): Σε αυτή τη γενιά, οι ασύρματες επικοινωνίες έχουν φωνή και δεδομένα. Το 3G είναι το πρώτο διεθνές τυποποιημένο σύστημα που κυκλοφόρησε από την ITU (International Telecommunication Union), εν αντίθεση με τα συστήματα προηγούμενης γενιάς. Το 3G εκμεταλλεύεται το WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) με χρήση εύρους ζώνης 5 MHz. Συνεπώς θα μπορούσαμε να επισημάνουμε ότι κατά τη μετάβαση από 2G σε 3G συστήματα πραγματοποιήθηκε η εξέλιξη από φωνητικά συστήματα σε συστήματα με βάση τα δεδομένα.

Δίκτυα 4^{ης} Γενιάς 4G (2013): Το 4G είναι ένα σύστημα ταχύτητας δεδομένων υψηλής ταχύτητας και φωνή. Υπάρχουν δύο συστήματα 4G. Ο Οι Ηνωμένες Πολιτείες έχουν αναπτύξει το WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) ,ενώ υπάρχει και το σύστημα LTE (Long Term Evolution) που αναπτύχθηκε αργότερα από το WiMAX. Το εύρος ζώνης και των δύο συστημάτων είναι 20 MHz. Συνεπώς θα μπορούσαμε να πούμε ότι η μετάβαση από 3G σε 4G σημαίνει μετατόπιση από χαμηλές ταχύτητες δεδομένων για Internet σε ταχύτητες δεδομένων υψηλής ταχύτητας για κινητά βίντεο.

Δίκτυα 5^{ης} Γενιάς 5G (2021): 5G εξακολουθεί να ορίζεται επίσημα από τους οργανισμούς τυποποίησης. Αποτελεί ένα σύστημα δεδομένων εξαιρετικά υψηλής χωρητικότητας και εξαιρετικά υψηλής ταχύτητας με νέες απαιτήσεις σχεδίασης.^{4 5}
(Εικόνα 1.2)

⁴ Jonathan Rodriguez. (2015). Fundamentals of 5G Mobile Network

⁵ 5G System Design. Patrick Marsch , Omer Bulakci, Olav Queseth , Mauro Boldi . (2018) . Architectural and Functional Considerations and Long Term Research.



Εικόνα 1.2: Η πορεία για τα 5G δίκτυα. Πηγή <https://blog.plaisio.gr/guides/diktyosi-5g-i-technologiki-epanastasi-poy-tha-allaxei-ti-zoi-mas/>

1.4 Σύγκριση 5G με προηγούμενες γενιές

Ο λόγος ανάπτυξης των ασύρματων δικτύων επικοινωνίας πέμπτης γενιάς είναι οι προκλήσεις και οι απαιτήσεις που δημιουργούνται με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας, τις οποίες τα δίκτυα 4ης γενιάς δε μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά. Κάποιες από αυτές τις απαιτήσεις είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα, μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης, μικρότερη καθυστέρηση και μαζική συνδεσιμότητα συσκευών και φυσικά μειωμένο κόστος.

Κρίνεται απαραίτητο να αναφέρουμε τις διαφορές μεταξύ του 5G και των προγενέστερων δικτύων και γιατί είμαστε έτοιμοι να υποδεχτούμε την νέα γενιά τώρα. Είναι γεγονός ότι στην περίοδο που διανύουμε η επικράτηση των ασύρματων επικοινωνιών έχει φτάσει σε επίπεδα που δεν ήταν εύκολο να φανταστούμε ότι θα φτάναμε ποτέ. Πλέον τα ασύρματα δίκτυα χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία μεταξύ υπολογιστών διαφόρων τύπων.

Η βασικές διαφορές μεταξύ 5G με προηγούμενες γενιές κινητών δικτύων είναι:

- Τα δίκτυα 5G επεκτείνουν τις ευρυζωνικές ασύρματες επικοινωνίες εκτός του κινητού διαδικτύου σε Internet of Things.
- Τα δίκτυα 4.5G (LTE Advanced) διπλασίασαν τις ταχύτητες δεδομένων από 4G.
- Τα δίκτυα 4G έφεραν όλες τις υπηρεσίες IP (Voice και Data), μια γρήγορη εμπειρία ευρυζωνικού διαδικτύου, με αρχιτεκτονικές και πρωτόκολλα ενοποιημένων δικτύων.
- Τα δίκτυα 3.5G έφεραν μια πραγματική πανταχού παρούσα εμπειρία κινητού διαδικτύου οδηγώντας στην επιτυχία τα οικοσυστήματα των εφαρμογών για κινητά.

- Τα δίκτυα 3G έφεραν καλύτερη εμπειρία στο διαδίκτυο μέσω κινητού τηλεφώνου, αλλά με περιορισμένη επιτυχία για την απελευθέρωση μαζικών υιοθεσιών υπηρεσιών δεδομένων.
- Τα δίκτυα 2.5G και 2.75G παρουσίασαν βελτίωση στις υπηρεσίες δεδομένων αντίστοιχα με GPRS (General Packet Radio Service) και EDGE (Enhanced Data rates for Global Evolution) .
- Τα δίκτυα 2G έφεραν ψηφιακές κυψελωτές φωνητικές υπηρεσίες και βασικές υπηρεσίες δεδομένων (SMS, Internet WAP browsing) καθώς και υπηρεσίες περιαγωγής σε δίκτυα.
- Τα δίκτυα 1G έφεραν την κινητικότητα σε αναλογικές φωνητικές υπηρεσίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: INDUSTRY 4.0

2.1 Ορισμός

Η υιοθέτηση της τεχνολογίας της Πληροφορικής και των Τηλεπικοινωνιών στη μεταποιητική βιομηχανία ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970. Ωστόσο, οι βασικές ιδέες του Industry 4.0 δημοσιεύθηκαν για πρώτη φορά το 2011⁶. Την ίδια χρονιά υπήρξε μια στρατηγική πρωτοβουλία της γερμανικής κυβέρνησης η οποία συμπεριλήφθηκε στο «Σχέδιο δράσης για τη στρατηγική υψηλής τεχνολογίας έως το 2020». Παρόμοιες στρατηγικές έχουν επίσης προταθεί σε άλλες βιομηχανικές χώρες, π.χ. σε ευρωπαϊκό επίπεδο ο αντίστοιχος όρος είναι "Εργοστάσια του μέλλοντος", στις ΗΠΑ "Βιομηχανικό Διαδίκτυο" και στην Κίνα "Internet +".

Παρά το μεγάλο ενδιαφέρον για το Industry 4.0 παγκοσμίως, δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος ορισμός για αυτό. Ορίζεται ως «η ολοκλήρωση σύνθετων φυσικών μηχανών και συσκευών με δίκτυα αισθητήρων και προγραμμάτων λογισμικού, με το τελευταίο να χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη, τον έλεγχο και το σχεδιασμό καλύτερων επιχειρηματικών και κοινωνικών αποτελεσμάτων»⁷. Ένας άλλος ορισμός είναι «ένα νέο οργανωτικό και διοικητικό επίπεδο στην αλυσίδα αξίας σε όλη τη διάρκεια ζωής των προϊόντων»⁸. Επίσης έχει αναφερθεί και ως ένας «συλλογικός όρος για τεχνολογίες και ιδέες στην οργάνωση της αλυσίδας αξίας»⁹.

2.2 Δυνατότητες του Industry 4.0

Η έννοια του Industry 4.0 μπορεί να γίνει αντιληπτή ως στρατηγική για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας στο μέλλον. Επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της αλυσίδας αξίας των προϊόντων λόγω της εφαρμογής αυτοτελούς ελέγχου και δυναμικής παραγωγής. Καλύπτει το σχεδιασμό και την υλοποίηση ανταγωνιστικών προϊόντων και υπηρεσιών, τη διοίκηση ισχυρών και ευέλικτων συστημάτων εφοδιασμού και παραγωγής¹⁰.

Τεχνολογικές τάσεις στην βιομηχανική παραγωγή 4.0

⁶ Kagermann H, Helbig J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0

⁷ Consortium, The Industrial Internet. (2018)

⁸ Kagermann H, Helbig J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0

⁹ Hermann M, Pentek T, Otto B. (2015). Design principles for Industrie 4.0

¹⁰ Kempf. (2018, 05 02). Introduction to Industrie 4.0

Εννέα τεχνολογικές τάσεις έχουν προσδιορισθεί ως κύρια εργαλεία για τη διαμόρφωση της βιομηχανικής παραγωγής 4.0.¹¹



Εικόνα 2.1: Εννέα τεχνολογίες – καταλύτες εξέλιξης της βιομηχανικής παραγωγής (Industry 4.0). Πηγή: M. Rüßmann et al.

1. Ανάλυση Μεγάλου Όγκου Δεδομένων (Big Data Analytics)

Ο τομέας της σύγχρονης μεταποίησης βρίσκεται αντιμέτωπος με την αύξηση του όγκου των δεδομένων από διάφορες πηγές και υπάρχει ανάγκη να συγκεντρωθούν όλα αυτά τα δεδομένα, να ταξινομηθούν και οργανωθούν με συνεκτικό τρόπο και να γίνει χρήση εργαλείων ανάλυσης για την υποστήριξη των διαφόρων αποφάσεων της διοίκησης.

Οι επιχειρήσεις δεν έχουν πλέον την πολυτέλεια να αγνοούν τα δεδομένα που εισέρχονται, καθώς θα μπορούσαν να αποδειχθούν πολύ χρήσιμα για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, της ποιότητας και της εξυπηρέτησης, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της παραγωγικής διαδικασίας.

¹¹ M. Rüßmann et al. (2018, 05 08). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries

Για παράδειγμα, τα δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν από τις διάφορες φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας. Οι μεγάλοι όγκοι δεδομένων θα αναλυθούν σε συσχέτιση μεταξύ τους, προκειμένου να προσδιοριστούν οι φάσεις με περιττές διαδικασίες που μπορούν να εξορθολογιστούν. Οι συσχετίσεις αυτές είναι:

- συνδέσεις που σχετίζονται με αισθητήρες και δίκτυα.
- Εικονικό μοντέλο παραγωγής.
- Περιεχόμενο / πλαίσιο παραγωγής.
- Κοινή χρήση και συνεργασία μεταξύ ενδιαφερομένων.
- Προσαρμογή βάσει κριτηρίων.

2. Ρομποτική

Η χρήση ρομπότ στη παραγωγική διαδικασία δεν είναι κάτι το καινοτόμο. Ωστόσο, τα ρομπότ υπόκεινται επίσης σε βελτιώσεις και εξέλιξη. Οι δημιουργοί τους τα σχεδιάζουν να είναι αυτόνομα και διαδραστικά, έτσι ώστε να μην είναι πλέον απλά εργαλεία που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο, αλλά να είναι ήδη ενσωματωμένες μονάδες εργασίας που λειτουργούν μαζί με τους ανθρώπους.

3. Προσομοίωση

Σε προηγούμενες φάσεις, αν οι κατασκευαστές ήθελαν να ελέγξουν εάν μια διαδικασία λειτουργεί αποδοτικά και αποτελεσματικά, απαιτούνταν δοκιμές και σφάλματα. Το Industry 4.0 χρησιμοποιεί μηχανισμούς αποαύλοποίησης για τη δημιουργία ψηφιακών δίδυμων που χρησιμοποιούνται για προσομοίωση μοντέλων και δοκιμών. Οι μηχανισμοί προσομοίωσης θα διαδραματίσουν σημαντικότερους ρόλους στη βελτιστοποίηση της παραγωγής, καθώς και τη ποιότητα των μελλοντικών προϊόντων.

4. Οριζόντια και κάθετη ολοκλήρωση συστημάτων

Το να υπάρχουν ολοκληρωμένα λειτουργικά/παραγωγικά και πληροφοριακά συστήματα είναι κάτι στο οποίο στοχεύει το Industry 4.0. Ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα σενάριο όπου η μηχανική, η παραγωγή, η εμπορία, και η εξυπηρέτηση μετά την πώληση θα είναι στενά συνδεδεμένα. Ομοίως, οι εταιρείες στην αλυσίδα εφοδιασμού επίσης, να είναι πιο ολοκληρωμένες, δημιουργώντας δίκτυα ενσωμάτωσης δεδομένων, συνεργασίες σε επίπεδα αυτοματοποίησης και αλυσίδες αξίας που είναι πλήρως αυτοματοποιημένες.

5. Βιομηχανικό Διαδίκτυο Αντικειμένων

Ενσωματωμένοι μικρο-υπολογιστές και η επέκταση των δικτύων υπολογιστών επιτρέπουν τη σύνδεση μορφοτροπέων (transducers) και συσκευών καθώς αυτό

αποτελεί ουσιαστικό μέρος του Industry 4.0. Το βιομηχανικό Διαδίκτυο των Αντικειμένων (Industrial -IoT) θα το καταστήσει εφικτό, καθώς οι μορφοτροπείς και οι νέες συσκευές στο παραγωγικό πεδίο έχουν σχεδιαστεί να είναι συμβατές με το IoT (Internet of Things). Είναι εξοπλισμένες με ασύρματη δικτύωση χαμηλής ισχύος για να τους επιτρέψουν να αλληλοεπιδρούν και να επικοινωνούν μεταξύ τους, ενώ ταυτόχρονα συνδέονται μέσω πύλης σε ένα επίπεδο ελέγχου και διαχείρισης. Με τον τρόπο αυτό θα γίνει πανταχού παρούσα σε όλο το Έξυπνο Εργοστάσιο και την αλυσίδα εφοδιασμού.

6. Κυβερνο-ασφάλεια

Τα βιομηχανικά συστήματα γίνονται όλο και πιο ευάλωτα σε απειλές, όπως αυτό προέκυψε από τις πρόσφατες επιθέσεις κατά βιομηχανικών στόχων τα τελευταία τρία χρόνια. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, πρέπει να θεσπιστούν μέτρα για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο που να αναγνωρίζουν τα νέα τρωτά σημεία και τις προκλήσεις που φέρνει στον βιομηχανικό έλεγχο, διαδικασίες και συστήματα, η σύνδεση με το Διαδίκτυο.

7. Υπολογιστικό Νέφος

Οι μεγάλοι όγκοι δεδομένων που εμπλέκονται στο Industry 4.0 σημαίνουν ότι η ανταλλαγή δεδομένων δεν θα είναι μόνο επιθυμητή αλλά επιτακτική ανάγκη για να αξιοποιηθούν οι πλήρεις δυνατότητες του μέσα στην αξιακή αλυσίδα. Ωστόσο, λίγες μονάδες παραγωγής θα έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης και ανάλυσης τεράστιου όγκου δεδομένων που συλλέγονται.

Παρόλα αυτά, οι πάροχοι υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους έχουν την ικανότητα και μπορούν να δημιουργήσουν ιδιωτικά δίκτυα υπηρεσιών υπολογιστικού νέφους κατάλληλα για την αποθήκευση και επεξεργασία παραγωγικών δεδομένων.

8. Προσθετική Κατασκευή

Η προσθετική κατασκευή όπως η εκτύπωση τρισδιάστατων (3D) αντικειμένων επιτρέπει στους κατασκευαστές να σχεδιάζουν πρωτότυπα και μοντέλα νέων ιδεών, τα οποία μειώνουν σημαντικά τον σχεδιαστικό χρόνο και προσπάθεια. Η προσθετική κατασκευή επιτρέπει επίσης την παραγωγή σε μικρές παρτίδες προϊόντων που είναι προσαρμοσμένα σε ομάδες προτιμήσεων και προσφέρουν περισσότερη αξία στους πελάτες ή τους τελικούς χρήστες, μειώνοντας παράλληλα το κόστος και την αναποτελεσματικότητα του κατασκευαστή.

9. Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality)

Οι επιχειρήσεις προσπαθούν όλο και περισσότερο να μειώσουν τα έξοδα συντήρησης και κατάρτισης που σχετίζονται με την παραγωγή, το μάρκετινγκ και την υποστήριξη μετά την πώληση. Οι κατασκευαστές στρέφονται προς συστήματα που βασίζονται στην επαυξημένη πραγματικότητα για να βελτιώσουν τις διαδικασίες συντήρησής τους, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος της παρουσίας ειδικών συμβούλων στο χώρο τους.

2.3 Cyber Physical System (CPS)

Προκειμένου να επιτευχθεί η διόγκωση της αυτοματοποίησης, οι τεχνολογικές έννοιες των Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων (CyberPhysical Systems-CPS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να λειτουργήσουν αυτόνομα και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον παραγωγής τους μέσω μικροελεγκτών, ενεργοποιητών, αισθητήρων και διεπαφών επικοινωνίας ¹². Ωστόσο, η εισαγωγή τόσο του CPS όσο και του IoT, όπου τα αντικείμενα πρέπει να ξεκινήσουν μια διαδικασία προετοιμασίας, σχεδιασμού, προγραμματισμού, βελτιστοποίησης, καθώς επίσης εργασίες για εργαλεία, και ανθρώπινο δυναμικό αν είναι απαραίτητο, οδηγεί σε μία 4η Βιομηχανική Επανάσταση στο εγγύς μέλλον (Πίνακας 2.1).

	Παρελθόν	Παρόν	Μέλλον
Σύστημα επικοινωνιών	Αναλογικό	Διαδίκτυο και Εσωτερικό Δίκτυο	Δίκτυο Αντικειμένων Δίκτυο Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων
Έννοια	Νέο-Τειλορισμός	Λιτή Παραγωγή (Lean Manufacturing)	Έξυπνη Παραγωγή
Λύση	Μηχανοποίηση και Αυτοματισμός	Αυτοματοποίηση και εφαρμογή υπολογιστικής	Απούλοποίηση (Virtualisation) και ολοκλήρωση

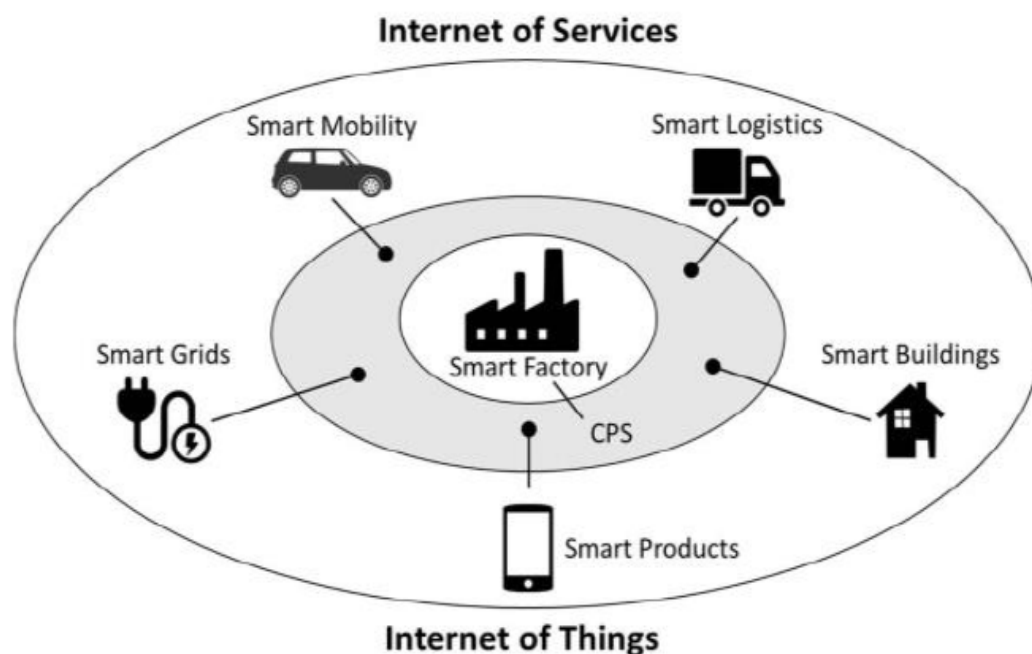
Πίνακας 2.1: Εξέλιξη της παραγωγής. Πηγή Broy M, Kargermann H, Achatz R. (2010).

Το CPS είναι παρόμοιο με το IoT, καθώς μοιράζεται την ίδια βασική αρχιτεκτονική. Ωστόσο, παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό συνδυασμού και συντονισμού μεταξύ φυσικών και υπολογιστικών στοιχείων.

¹² Broy M, Kargermann H, Achatz R. (2010). Agenda cyberphysical systems: outlines of a new research

Το Industry 4.0 χαρακτηρίζεται επιπρόσθετα από τις εξής έννοιες: έξυπνο προϊόν, έξυπνο μηχάνημα και ενισχυμένος χειριστής. Η κύρια ιδέα του έξυπνου προϊόντος είναι να αλλάξει το ρόλο του τεμαχίου εργασίας από ένα παθητικό σε ένα ενεργό μέρος του συστήματος. Σε ένα τέτοιο σύστημα τα προϊόντα έχουν μνήμη για την αποθήκευση των λειτουργικών δεδομένων και των μεμονωμένων απαιτήσεων, και μπορούν να ζητήσουν τους απαιτούμενους πόρους και να συντονίσουν τις διαδικασίες παραγωγής για την ολοκλήρωσή τους.

Η έννοια της Έξυπνης Μηχανής επικεντρώνεται στην αντικατάσταση της παραδοσιακής ιεραρχίας στη παραγωγή από μία αποκεντρωμένη που οργανώνεται από μόνη της παραγωγή με επίκεντρο τα CPS συστήματα. Σε ένα τέτοιο σύστημα ανοικτά δίκτυα και σημασιολογικές περιγραφές επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ των αυτόνομων CPS στοιχείων, ενώ τεχνητή νοημοσύνη σε επίπεδο μονάδας επιτρέπει την επικοινωνία με άλλες συσκευές, μονάδες παραγωγής και προϊόντα που κάνουν τη γραμμή παραγωγής ευέλικτη και αρθρωτή. Αυτό οδηγεί στην αυτο-οργάνωση των μηχανών εντός του δικτύου παραγωγής, την αυτόματη ενσωμάτωση και χωρίς προγραμματισμό ή ακόμα και αντικατάσταση νέων παραγωγικών μονάδων. (Εικόνα 2.2)



Εικόνα 2.2: Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IoT) – εφαρμογή στο πλαίσιο του Industry 4.0. Πηγή Wagner T. et al.(2017).

Τέλος, ο Ενισχυμένος Χειριστής ασχολείται με την αυτοματοποίηση των γνώσεων καθιστώντας τη φυσική οντότητα πιο ευέλικτο και προσαρμοστικό μέρος στο σύστημα παραγωγής. Ένας τέτοιος εργαζόμενος έχει μπροστά του τη πρόκληση νέων θέσεων εργασίας όπως ο ορισμός προδιαγραφών, η παρακολούθηση και η επαλήθευση στρατηγικών παραγωγής. Την ίδια στιγμή μπορεί να παρεμβαίνει χειροκίνητα στο αυτόνομο οργανωμένο σύστημα παραγωγής. Του παρέχεται η υποστήριξη μέσα από κινητές, ευέλικτα διασυνδεδεμένες διεπαφές και συστήματα υποστήριξης φιλικές προς τον χρήστη. Του επιτρέπει να εκπληρώσει τις δυνατότητες και να έχει το ρόλο του στρατηγικά υπεύθυνου για τη λήψη αποφάσεων. Επίσης έχει τη γνώση ευέλικτων μηχανισμών επίλυσης προβλημάτων στη σταδιακά αυξανόμενη τεχνική πολυπλοκότητα.

2.4 Βασικά χαρακτηριστικά & θεμελιώδεις αρχές

Το Βιομηχανικό Διαδίκτυο είναι η σύνθεση αρκετών βασικών τεχνολογιών. Οι τελευταίες εξελίξεις στις τεχνολογίες των αισθητήρων, για παράδειγμα, συμβάλλουν στο να παράγονται περισσότερα δεδομένα, διαφορετικοί τύποι δεδομένων, με περισσότερα ακρίβεια, αυτογνωσία και δυνατότητα πρόβλεψης για την εναπομένουσα ωφέλιμη ζωή τους. Παρομοίως, οι αισθητήρες πάνω στις παραγωγικές μηχανές διαθέτουν ειδικούς ελεγκτές που μπορούν να αυτο-αναλύσουν, αυτο-προβλέψουν και αυτο-συγκρίνουν, για παράδειγμα τις τρέχουσες ρυθμίσεις παραμέτρων και περιβάλλοντος με προκαθορισμένα βέλτιστα δεδομένα και κατώτατα όρια. Αυτό συμβάλλει στην αυτό-διάγνωση. Η τεχνολογία των αισθητήρων έχει μειωθεί δραματικά τα τελευταία χρόνια σε κόστος και μέγεθος. Αυτό έκανε τον χειρισμό των μηχανημάτων, διαδικασιών ακόμη και των ανθρώπινου δυναμικού οικονομικά και τεχνικά εφικτό.

Προηγμένες τεχνικές ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων (bigdataanalytics) αποτελούν επίσης βασικό μοχλό και παράγοντα που βοηθάει στην καλύτερη δυνατή επεξεργασία του ιστορικών δεδομένων, και να προβλέψει για το τι πραγματικά συμβαίνει μέσα σε μια μηχανή ή μια διαδικασία. Οι παραπάνω τεχνικές ανάλυσης και προβλέψεων μπορούν να παράσχουν ακριβή χρονοδιαγράμματα συντήρησης για μηχανήματα και παραγωγικά στοιχεία, διατηρώντας παράλληλα την παραγωγική τους λειτουργία και περιορίζοντας τις αναποτελεσματικές και το κόστος της περιττής συντήρησης. Αυτό επίσης επιταχύνθηκε από την εμφάνιση του υπολογιστικού νέφους την τελευταία δεκαετία, όπου οι πάροχοι υπηρεσιών όπως το Microsoft Azure,

Amazon Web Services (AWS) παρέχουν τεράστιες υποδομές υπολογιστών, αποθήκευσης και δικτύωσης που μειώνουν το κόστος της ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων.

Οι υποστηρικτές του νέου εγχειρήματος του Industry 4.0 ονομάζουν τέσσερα βασικά και ξεχωριστά χαρακτηριστικά:¹³

1. Κάθετη ολοκλήρωση των έξυπνων συστημάτων παραγωγής

Τα έξυπνα εργοστάσια, τα οποία είναι ουσιαστικά ο πυρήνας του Industry 4.0, δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε αυτόνομη βάση. Υπάρχει ανάγκη για τη δικτύωση έξυπνων εργοστασίων, έξυπνων προϊόντων, και άλλα έξυπνων συστημάτων παραγωγής. Ο βασικός σκοπός της κάθετης ολοκλήρωσης πηγάζει από τη χρήση των CPS συστημάτων τα οποία επιτρέπουν στα εργοστάσια και παραγωγικές μονάδες να αντιδρούν γρήγορα και ευέλικτα στις όποιες παραμέτρους όπως επίπεδα ζήτησης, επίπεδα αποθεμάτων, σφάλματα στις μηχανές και απρόβλεπτες καθυστερήσεις.

2. Οριζόντια ολοκλήρωση μέσω παγκόσμιων δικτύων αλυσίδας αξιών

Η ολοκλήρωση θα διευκολύνει τη δημιουργία και διατήρηση δικτύων που δημιουργούν και προσθέτουν αξία. Ειδικά αυτή μεταξύ επιχειρήσεων και πελατών. Ωστόσο, αυτό θα μπορούσε να σημαίνει και την ολοκλήρωση νέων επιχειρηματικών μοντέλων κατά μήκη και πλάτη χωρών και ηπείρων διαμορφώνοντας ένα παγκόσμιο δίκτυο.

3. Διάφανη υλοποίηση σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας

Ολόκληρη η αλυσίδα αξίας στη βιομηχανία υπόκειται σε αυτό που ονομάζεται διάφανη υλοποίηση, κατά την οποία ο πλήρης κύκλος ζωής του προϊόντος ιχνηλατείτε από την παραγωγή έως τη απόσυρση. Σύμφωνα με άλλους μεταποιητικούς κλάδους, την ένδυση για παράδειγμα, το επίκεντρο θα ήταν στη διαδικασία μεταποίησης μόνο, δηλαδή στη διαμόρφωση, πώληση και διανομή του τελικού προϊόντος, ενώ κατόπιν η διαδικασία αδιαφορεί σχετικά με αυτό.

4. Επιτάχυνση της παραγωγής

Οι επιχειρησιακές δραστηριότητες, ιδίως εκείνες που εμπλέκονται στη παραγωγή κάνουν χρήση πολλών τεχνολογιών, οι περισσότερες δεν είναι καινοτόμες ή ακριβές, και οι περισσότερες από αυτές ήδη υπάρχουν. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω

¹³ Pereira AC, Romero F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept.

τέσσερα χαρακτηριστικά του Industry 4.0, το νέο πλαίσιο επικεντρώνεται κατά πολύ στην έννοια της αλυσίδας αξίας.¹⁴

- Διαλειτουργικότητα (Interoperability)

Η διαδικασία παραγωγής δεν ακολουθεί απλώς ένα προκαθορισμένο σύνολο μεθόδων ή βήματα και δεν αφορά μόνο τους ανθρώπους, τις μηχανές και τις διαδικασίες που είναι άμεσα εμπλεκόμενοι. Η διαλειτουργικότητα απαιτεί την αλληλεπίδραση μέσα ένα ολόκληρο περιβάλλον και την ευέλικτη συνεργασία μεταξύ όλων των στοιχείων. Για παράδειγμα, οι σταθμοί συναρμολόγησης δεν ξεχωρίζουν από τα προϊόντα που δημιουργούνται ή από τους ανθρώπους που δουλεύουν πάνω σε αυτούς.

Η διαλειτουργικότητα αναφέρεται στη δυνατότητα όλων των οντοτήτων να συνδέονται, επικοινωνούν και να λειτουργούν μεταξύ τους μέσω του Διαδικτύου των Αντικειμένων (IoT). Αυτό περιλαμβάνει τους ανθρώπους, τα έξυπνα εργοστάσια και τις σχετικές τεχνολογίες.

- Αποϋλοποίηση (Virtualisation)

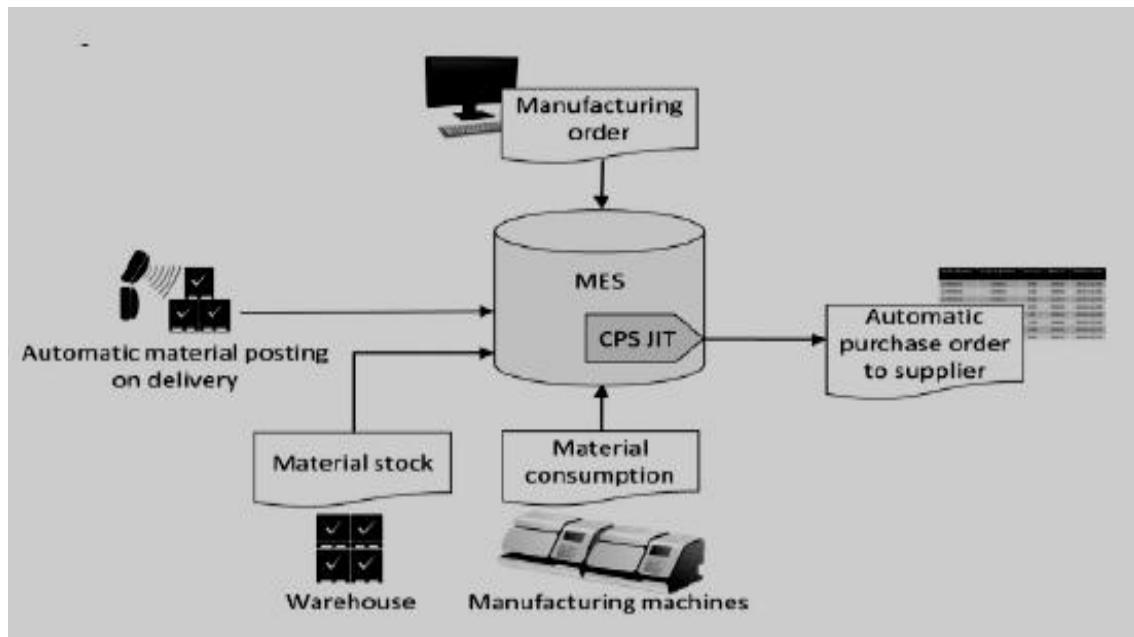
Η παρακολούθηση των πραγματικών διεργασιών και φυσικών μηχανών πραγματοποιείται στο φυσικό κόσμο και τα δεδομένα που λαμβάνονται από τους αισθητήρες θα είναι διαθέσιμα σε εικονικά μοντέλα ή μοντέλα που δημιουργούνται μέσω προσομοίωσης. Οι μηχανικοί και οι σχεδιαστές επί των παραγωγικών διαδικασιών μπορούν τότε να προσαρμόσουν, να αλλάξουν και να δοκιμάσουν αλλαγές ή αναβαθμίσεις σε ένα εικονικό περιβάλλον, χωρίς να επηρεάσουν τις φυσικές διαδικασίες.

Οι παραγωγικές επιχειρήσεις στην εγκατάσταση του Industry 4.0 θα χρησιμοποιήσουν τότε ένα «εικονικό δίδυμο» (virtualtwin) του σχεδίου ενός έξυπνου εργοστασίου για να ενισχύσουν σημαντικά τις υπάρχουσες διαδικασίες και προϊόντα δημιουργώντας νέες παραγωγικές διαδικασίες και μειώνοντας το χρόνο δημιουργίας κερδών από τη διαθεσιμότητα νέων προϊόντων.

- Αποκέντρωση (Decentralisation)

Το Industry 4.0 υποστηρίζει την αποκέντρωση, η οποία επιτρέπει στα διάφορα συστήματα μέσα στο έξυπνο εργοστάσιο να λαμβάνουν αποφάσεις αυτόνομα, χωρίς να αποκλίνουν από την πορεία προς τον ενιαίο, τελικό οργανωτικό στόχο.

¹⁴ Tjahjono B. et al. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain?



Εικόνα 2.3: παράδειγμα εφαρμογής Cyber-Physical Συστημάτων σε μοντέλο παραγωγής και διανομής βάση της ζήτησης (Just-In-Time). Πηγή :Wagner T. et al, 2017

- Δυνατότητα λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο (Real-time capability)

Οι προσπάθειες του Industry 4.0 επικεντρώνονται επίσης στην υλοποίηση των πάντων σε πραγματικό χρόνο, κάτι το οποίο απαιτεί τη συλλογή δεδομένων από την παραγωγική διαδικασία, την ανατροφοδότηση και τη παρακολούθηση των διαδικασιών επίσης σε πραγματικό χρόνο.

Για παράδειγμα (Εικόνα 2.3) σε ένα μοντέλο παραγωγής και διανομής βάση της ζήτησης (Just—in-time) η λειτουργία και ο έλεγχος αυτής γίνεται σε τέσσερα βασικά σημεία:

a. Φυσικός κόσμος: Ο σχεδιασμός και υλοποίηση της ροής των φυσικών υλικών βασίζεται σε παραμέτρους όπως οι βιομηχανικές παραγγελίες, το απόθεμα στην αποθήκη, η κατανάλωση των υλικών και η παράδοση/διαθεσιμότητα των υλικών.

b. Συλλογή δεδομένων: Η συλλογή εκτελείται σε συγκεκριμένες γεωγραφικές/τοπολογικές διαστάσεις και επικεντρώνεται στη συγκέντρωση επαρκούς δείγματος.

c. Κυβερνο-κόσμος: οι παραγωγικές διαδικασίες μοντελοποιούνται σε ένα εικονικό κόσμο που αναπαριστούν τη ροή των υλικών ακόμη και τη παραγγελία των πρώτων υλών.

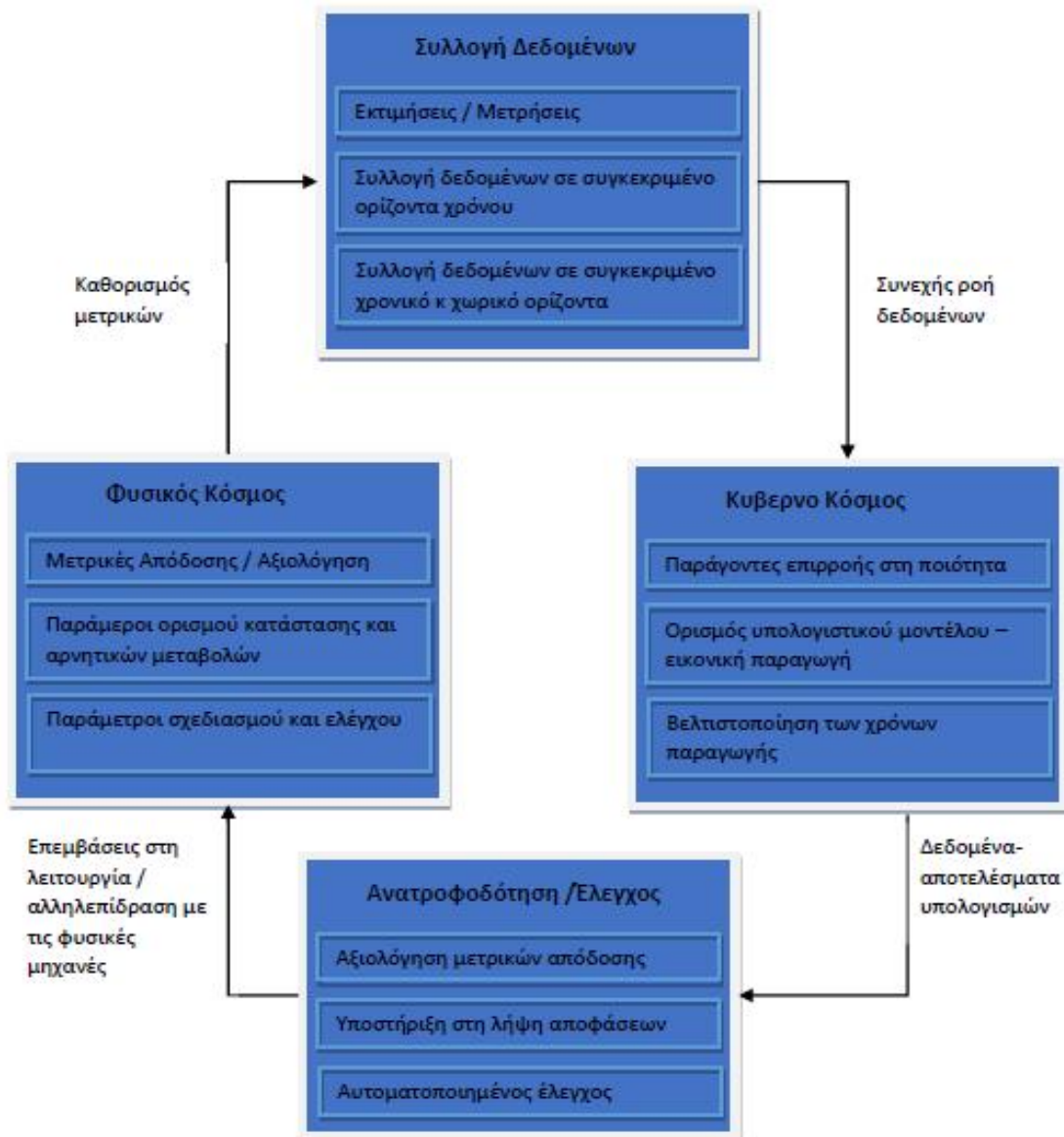
d. Ανατροφοδότηση / Έλεγχος: Η διαδικασία ανατροφοδότησης ελέγχεται αυτόματα όπως επίσης και οι αποφάσεις σχετικά με διορθωτικές ενέργειες εκτελούνται αυτόματα, είναι όμως ορατές / προσβάσιμες στο ανθρώπινο δυναμικό.

- Υπηρεσιο-Κεντρική Αρχιτεκτονική (ServiceOrientation)

Το IoT δημιουργεί δυνητικές υπηρεσίες τις οποίες μπορούν προγράμματα ή υπηρεσίες τρίτων να κάνουν χρήση. Συνεπώς, εσωτερικές και εξωτερικές υπηρεσίες θα εξακολουθήσουν να απαιτούνται από τα έξυπνα εργοστάσια, για αυτό και το IoT είναι τόσο σημαντικό συστατικό στοιχείο του Industry 4.0.

- Οργάνωση σε ενότητες (Modularity)

Η ευελιξία είναι επίσης μια άλλη βασική αρχή στο σχεδιασμό του Industry 4.0 έτσι ώστε τα έξυπνα εργοστάσια να μπορούν εύκολα να προσαρμόζονται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες και τις απαιτήσεις. Σχεδιάζοντας και παράγοντας προϊόντα, γραμμές παραγωγής και παραγωγικά συστήματα, το έξυπνο εργοστάσιο διαθέτει την ευελιξία και την ευκολία της προσαρμογής να μπορεί να αλλάξει κάτι από τα παραπάνω. Με λίγα λόγια, οι παραγωγικές μονάδες θα μπορούν να εξασφαλίσουν ότι θα μπορούν μεμονωμένες γραμμές παραγωγής να αντικατασταθούν, χωρίς να επηρεάσουν τον κορμό της παραγωγής (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: κύκλωμα ελέγχου και επεμβάσεων στη παραγωγή είτε συνολικά ή σε μεμονωμένες μονάδες.
 Πηγή :Wagner T. et al

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΙΚΤΥΑ 5^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ (5G)

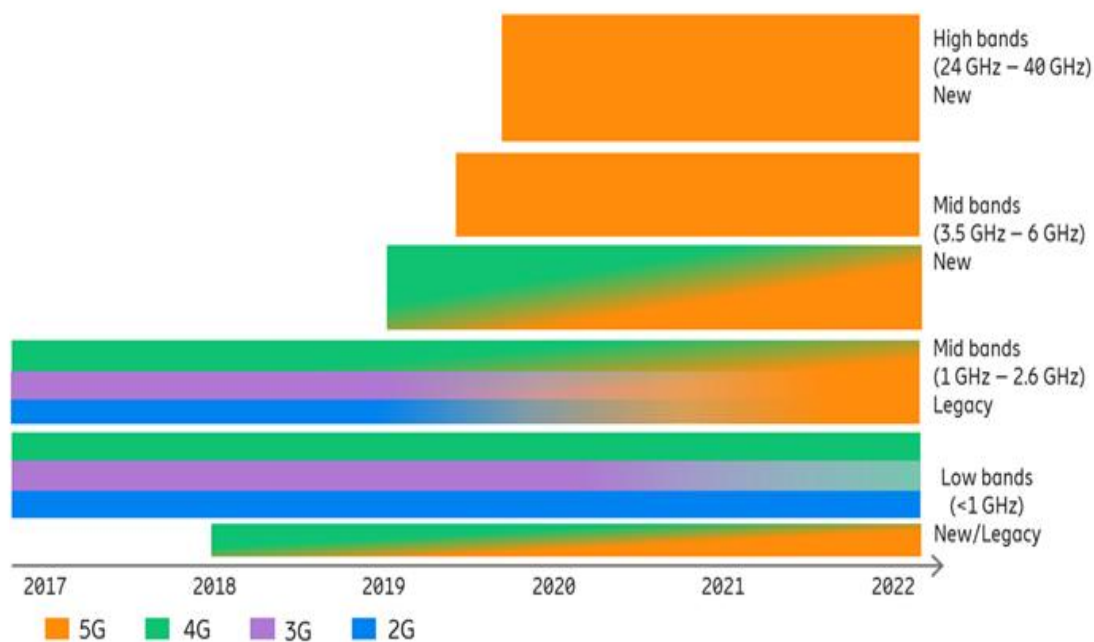
3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το δίκτυο 5G πρόκειται να λειτουργήσει σε ένα εύρος υψηλής συχνότητας του ασύρματου φάσματος, κάπου μεταξύ 30-300 GHz. Η μεγαλύτερη συχνότητα συνεπάγεται μεγαλύτερη ταχύτητα και μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Σε αυτό το φάσμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η μεταφορά δεδομένων γίνεται σε άκρως υψηλές ταχύτητες, ταυτοχρόνως όμως τα δεδομένα δεν μπορούν να μεταφερθούν τόσο μακριά όσο στα δίκτυα 4G καθώς διαθέτουν χαμηλές συχνότητες.

Επιπλέον, η καινούρια τεχνολογία θα διαθέτει και μεγαλύτερη χωρητικότητα το οποίο θα επιτρέπει την ταυτόχρονη σύνδεση περισσότερων συσκευών στο ίδιο δίκτυο.

Το προγενέστερο δίκτυο δεν κατείχε το απαιτούμενο εύρος ζώνης προκειμένου να διαχειριστεί τις ογκώδεις ποσότητες δεδομένων που μεταδίδουν οι συσκευές. Επομένως, με το 5G θα εξουδετερωθεί η χρονοκαθυστέρηση μεταξύ των συσκευών και του διακομιστή. Αυτό σημαίνει όμως πως οι υπάρχοντες εταιρίες παροχής ασύρματου διαδικτύου θα πρέπει να αντικαταστήσουν και να πολλαπλασιάσουν τις κεραιές προκειμένου να χτιστεί το 5G ώστε να υπάρχει η ίδια κάλυψη τοποθετώντας τις κεραιές αυτές σε κάθε φανάρι, σε κάθε πλευρά κτιρίου ίσως και σε κάθε δωμάτιο.

Στα υπάρχοντα όμως δίκτυα 4G αυτό δεν συμβαίνει καθώς οι κεραιές μπορούν να είναι απομακρυσμένες η μία από την άλλη και τα εμπόδια δεν αποτελούν σοβαρό πρόβλημα. Αυτό σημαίνει πως ακόμα και με την κυκλοφορία του δικτύου πέμπτης γενιάς, το δίκτυο αυτό δεν θα αντικαταστήσει τον προκάτοχο του αλλά θα αποτελέσει συμπλήρωμά του, τουλάχιστον για τα πρώτα χρόνια κυκλοφορίας και χρήσης του. Στην κινητή τηλεφωνία χρησιμοποιούνται ραδιοσυχνότητες, οι οποίες χωρίζονται σε μπάντες και κάθε μία έχει κάποια χαρακτηριστικά. Το 4G δίκτυο χρησιμοποιεί ραδιοσυχνότητες μικρότερες των 6 GHz, ενώ το 5G θα επεκταθεί και σε μπάντες με υψηλότερες συχνότητες (30-90 GHz), με μήκη κύματος που ονομάζονται και millimeter waves (mmWaves) γιατί βρίσκονται μεταξύ 1 και 10 milli-meters (χιλιοστά). (Εικόνα 3.1)



Εικόνα 3.1: Η επίδραση των τεχνολογιών δικτύων στις διάφορες συχνότητες από το 2017 έως το 2022.

Πηγή: <https://www.ericsson.com/en/ran/spectrum-sharing>

Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας, με απλά λόγια υψηλή συχνότητα σημαίνει μικρότερο μήκος κύματος. Μικρότερο μήκος κύματος σημαίνει μετάδοση περισσότερων πληροφοριών, γι' αυτό και το 5G είναι έως και 10 φορές πιο γρήγορο από το 4G, στα 10 Gb/s, κάνοντας παράλληλα την καθυστέρηση μηδενική. Για παράδειγμα αντί να κάνουμε download ένα μεγάλο αρχείο σε 5 λεπτά, θα γίνεται τώρα σε 30 δευτερόλεπτα. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί κάθε σταθμός μετάδοσης θα περιέχει περισσότερες κεραιές, μεταδίδοντας έτσι παραπάνω πληροφορία. Δύστυχος όμως υπάρχει ένα μεγάλο πρόβλημα. Το μικρότερο μήκος κύματος συνεπάγεται επίσης ότι το σήμα είναι πιο ευαίσθητο σε θόρυβο.

Οι πληροφορίες δηλαδή δεν μπορούν να μεταδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις και είναι εύκολο να αλλοιωθούν από εμπόδια. Τα millimeter waves του 5G έχουν εύρος λιγότερο από μισό χιλιόμετρο, σε σχέση με το 4G που φτάνει έως τα 16 χιλιόμετρα. Δεν είναι αρκετά ισχυρά ώστε να διαπερνούν τείχους, ακόμα και η βροχή μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητά τους.¹⁵

¹⁵ <https://gr.pcmag.com/network/31435/5g-nea-tekhnologgia-kai-anesukhies>

Η λύση είναι η εγκατάσταση σταθμών σε πολλά σημεία, ώστε το σήμα να μεταδίδεται από τον έναν στον άλλο, περνώντας έτσι γύρω από τα εμπόδια. Οι σταθμοί αυτοί δεν είναι σαν τους ογκώδεις πύργους που έχουμε συνηθίσει να βλέπουμε σε μεγάλο υψόμετρο, καθώς έχουν μικρότερο μέγεθος και είναι πιο εύκολο να εγκατασταθούν σε διάφορα σημεία της πόλης, όπως για παράδειγμα σε κολώνες.

Η ύπαρξη πολλών μικρών σταθμών βάσης φέρνει το beamforming. Αντί λοιπόν να υπάρχει ένας μεγάλος σταθμός που εκπέμπει παντού στο χώρο, πολλοί μικροί τέτοιοι σταθμοί θα εκπέμπουν σήμα που θα κατευθύνεται στον στόχο, σαν μια ευθεία. Έτσι λοιπόν θα μειωθούν οι παρεμβολές, και θα έχουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας μαζί με πιο γρήγορες ταχύτητες.

Σε αντίθεση με το LTE, το 5G λειτουργεί σε τρεις διαφορετικές ζώνες φάσματος. Ενώ αυτό μπορεί να μην φαίνεται σημαντικό, θα έχει δραματική επίδραση στην καθημερινή σας χρήση.

Το φάσμα χαμηλής ζώνης μπορεί επίσης να περιγραφεί ως φάσμα υπό 1 GHz. Το φάσμα χαμηλής ζώνης προσφέρει μεγάλη περιοχή κάλυψης και διείσδυση τοίχων. Οι κορυφαίες ταχύτητες δεδομένων θα ξεπεράσουν τα 100Mbps.

Το μεσαίο εύρος ζώνης παρέχει γρηγορότερες ταχύτητες και χαμηλότερη καθυστέρηση από τη χαμηλή ζώνη. Εντούτοις, αποτυγχάνει να διεισδύσει στα κτίρια τόσο αποτελεσματικά όσο ένα φάσμα χαμηλής ζώνης. Αναμένονται μέγιστες ταχύτητες έως 1Gbps στο φάσμα των μέσων ζωνών.

Το φάσμα υψηλών συχνοτήτων είναι αυτό που προσφέρει τις υψηλότερες επιδόσεις για 5G, αλλά με μεγάλες αδυναμίες. Συχνά αναφέρεται ως mmWave. Το φάσμα υψηλών συχνοτήτων μπορεί να προσφέρει μέγιστες ταχύτητες μέχρι 10Gbps και έχει εξαιρετικά χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση. Το κύριο μειονέκτημα της υψηλής ζώνης είναι ότι έχει χαμηλή περιοχή κάλυψης και η διείσδυση του κτιρίου είναι κακή.

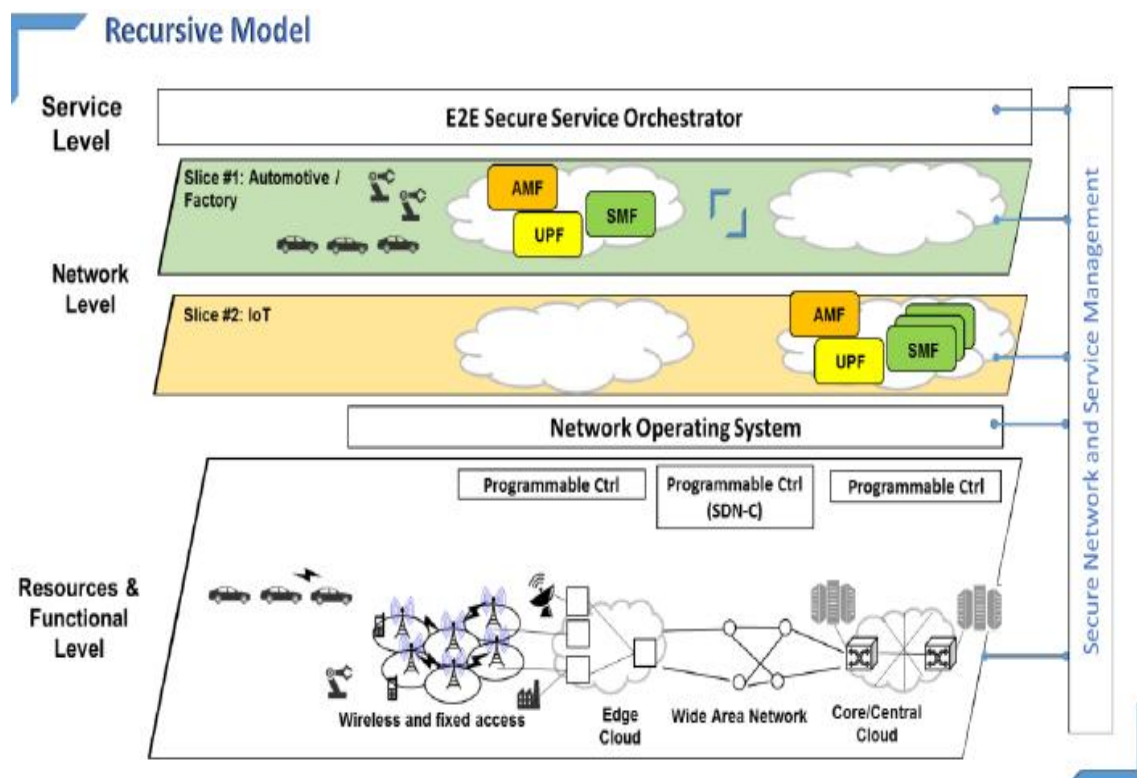
Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως χρειάζεται μία αναδιάρθρωση της αρχιτεκτονικής του δικτύου όπως την ξέραμε μέχρι σήμερα, για να μπορέσει να υποστηρίξει πολλά “εικονικά” (virtual) δίκτυα σε μία κοινή φυσική υποδομή επιτρέποντας έτσι την ανάδειξη ενός προγραμματίσιμου δικτύου στο οποίο πολλές λειτουργίες του μπορούν να επιτευχθούν μέσω αλλαγής κώδικα. Πάνω σε αυτό το σκεπτικό στηρίζονται οι ερευνητές έχοντας καταλήξει στο συμπέρασμα πως το 5G πρέπει να κινείται πάνω στο virtualization, δηλαδή την εικονοποίηση του δικτύου, και όχι μόνο στην στήριξη των φυσικών υποδομών που μας είναι διαθέσιμες. Αυτή η προσέγγιση θα επιφέρει

επαναστατικές αλλαγές στη διαμόρφωση του δικτύου και στη διαχείριση των πόρων του, καθώς θα ανοίξει νέους δρόμους που θα μπορούν να υποστηρίξουν τις πολυποίκιλες απαιτήσεις των χρηστών και των εφαρμογών που όλο και αυξάνονται. Στο virtualization του δικτύου θα βοηθήσουν κάποια εργαλεία και μέθοδοι, όπως το SDN (Software-Defined Networking) και το NFV (Network Functions Virtualization).

3.2 Αρχιτεκτονική 5G

Τα ευρυζωνικά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας τα τελευταία χρόνια υπόκεινται σε πολλές αλλαγές και αναβαθμίσεις έτσι ώστε να μπορέσει η αρχιτεκτονική τους και η τεχνολογία τους να συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις των πελατών.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί πληθώρα αρχιτεκτονικών για το 5G δίκτυο έτσι ώστε να μπορούν να καλυφθούν οι ανάγκες σε πόρους, ταχύτητα εξυπηρέτησης όλων των αιτημάτων κτλ.



Εικόνα 3.2: Γενική Αρχιτεκτονική 5G. Πηγή: 5GPPP Architecture Working Group, “view on 5G architecture,” White Pap.

Στην εικόνα 3.2, παρουσιάζεται η γενική αρχιτεκτονική των ευρυζωνικών δικτύων πέμπτης γενιάς και απεικονίζει περιληπτικά τις βασικές οντότητες που υπάρχουν στο

5G και παίζουν εξαιρετικά σημαντικό ρόλο. Παρακάτω θα κάνουμε μία σύντομη αναφορά στο καθένα.¹⁶

Resource & Functional Level

Το επίπεδο αυτό περιέχει τους φυσικούς πόρους που χρησιμεύουν για την επικοινωνία, τους υπολογισμούς και την αποθήκευση των Core Network, Internet κτλ. Πιο αναλυτικά έχουμε:

- Wireless and Fixed Access: Πρόκειται για μία τεχνολογία που παρέχει πρόσβαση στο Internet στα σπίτια, χρησιμοποιώντας τεχνολογία ασύρματου δικτύου αντί για γραμμές που είχαμε μέχρι τώρα. Παρόλο που η τεχνολογία FWA είναι αρκετά πιο απλή και γρήγορη, το μόνο μειονέκτημά της είναι η απόδοση σε σχέση με τις fixed γραμμές. Παρόλα αυτά, έχει γνωστοποιηθεί πως τα επόμενα στάδια της FWA θα χρησιμοποιούν τεχνολογίες 5G όπως το beamforming και τα mmWaves, ώστε να βελτιωθεί δραστικά η απόδοση της.
- Wide Area Network: Είναι ένα σύνολο υπολογιστών που εκτείνονται σε μία ευρεία γεωγραφική περιοχή και δημιουργούν μεταξύ τους ένα δίκτυο επικοινωνίας. Τυπικά ένα WAN διασυνδέει μεταξύ τους τοπικά δίκτυα υπολογιστών. Για τη διασύνδεση αυτή χρησιμοποιούνται σχεδόν πάντα μισθομένες δημόσιες τηλεπικοινωνιακές γραμμές ή μερικές φορές και δορυφορικές τηλεπικοινωνίες. Το γνωστότερο WAN είναι το Internet.
- Core/Central Cloud.

Network Operating System & Network level

Συνεργάζονται με τα Programmable Network Control Units. Και τα δύο βοηθάνε στο virtualization του physical network. Πιο συγκεκριμένα το Network Operating System πρόκειται για ένα λειτουργικό σύστημα που έχει σχεδιαστεί αποκλειστικά και μόνο για την υποστήριξη workstations, sharing βάσεων δεδομένων, sharing εφαρμογών μεταξύ διαφορετικών υπολογιστών στο δίκτυο. Μερικά παραδείγματα Network Operating Systems είναι τα Artisoft's LANtastic, Banyan VINES, Novell's NetWare και Microsoft's LAN Manager κτλ.

Τα Network Operating Systems και Programmable Network Control Units πραγματοποιούν virtualization του φυσικού δικτύου όπως αναφέραμε και πιο πάνω και έτσι δημιουργούνται τα διάφορα network slices που το καθένα εκτελεί μία

¹⁶ 5GPPP Architecture Working Group, "view on 5G architecture "

συγκεκριμένη λειτουργία και εξυπηρετεί κάποιο σκοπό. Το network level φιλοξενεί όλα αυτά τα slices που το καθένα χρησιμοποιεί διαφορετικούς πόρους (υπολογιστικούς, δικτυακούς κτλ.) για να παρέχει υπηρεσίες στους πελάτες.

Service Level

Πρόκειται για ένα από τα πιο σημαντικά επίπεδα στην αρχιτεκτονική του 5G. Η δυνατότητα του να μπορούμε να υποστηρίξουμε μία πληθώρα υπηρεσιών ταυτόχρονα και με δυναμικό τρόπο, είναι το στοιχείο που θα διαφοροποιήσει το 5G από τα δίκτυα προηγούμενων γενεών.

Στο service level, τα slices που αναφέραμε παραπάνω είναι οργανωμένα και ακολουθούν έναν προκαθορισμένο συντονισμό μέσω συναρτήσεων management.

3.3 Τεχνολογίες δικτύων 5^{ης} γενιάς

Για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του χρήστη και για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που απαιτούνται για να θεωρείται ένα σύστημα 5ης γενιάς τότε χρειάζεται μια δραστική αλλαγή στο σχεδιασμό της κυβελοειδούς αρχιτεκτονικής του 5G.

Για να ικανοποιηθούν τα πιο πάνω πρέπει να ακολουθηθούν και να υλοποιηθούν τεχνικές όπως SDN (Software-Defined Networking) και NFV (Network Functions Virtualization). Το 5G θα σχεδιαστεί στοχεύοντας στην καλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα για αυτό το λόγο οι πάροχοι υπηρεσιών θα ενσωματώσουν τις τεχνολογίες που αναφέρθηκαν αλλά και άλλες για αντιμετώπιση άλλων προβλημάτων. Μια γενική προεπισκόπηση έδειξε ότι ασύρματοι χρήστες ενός δικτύου μένουν εντός γύρω στο 80 τις εκατό και εκτός το υπόλοιπο. Στα ασύρματα δίκτυα σήμερα είναι σημαντικό ένας χρήστης να μπορεί να επικοινωνεί είτε είναι εντός η εκτός. Για αυτό το λόγο οι χρήστες θα πρέπει να μπορούν να επικοινωνήσουν με ένα σταθμό βάσης, με τα σήματα να μπορούν να ταξιδέψουν μέσω εμποδίων μειώνοντας όμως έτσι την απόδοση του φάσματος.

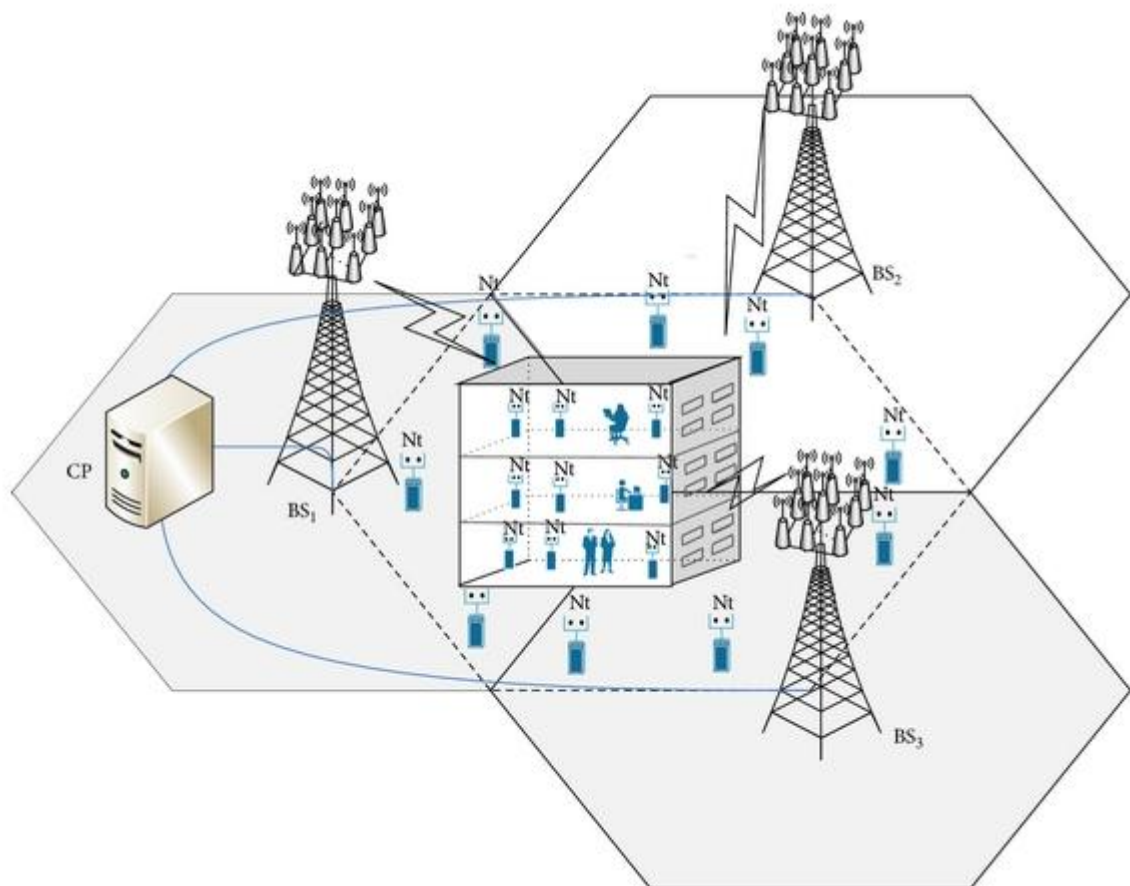
Για να αντιμετωπιστεί αυτό προτάθηκε η τεχνολογία MIMO (Multiple Input, Multiple Output) με πολλαπλές κεραιές για ενίσχυση του σήματος αλλά και για κάλυψη μεγαλύτερης περιοχής. Για τις επικοινωνίες εντός, τεχνολογίες όπως Wi-Fi, Small Cell, Ultra Wideband, Millimeter Wave και οπτικές ίνες είναι χρήσιμες για επικοινωνία μικρής κάλυψης με μεγάλο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων.

1. Νέες ραδιοσυχνότητες

Η εναέρια διεπαφή που ορίστηκε από τον οργανισμό 3GPP (3rd Generation Partnership Project) για το 5G είναι γνωστή ως NR (New Radio) και διαιρείται σε δύο ζώνες συχνοτήτων. Την FR1 (κάτω από 6GHz) και FR2 (mmWave) και η καθεμία με διαφορετικές ικανότητες.

2. Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)

Οι μαζικές κεραιές MIMO αυξάνουν την απόδοση του τομέα και την πυκνότητα χωρητικότητας χρησιμοποιώντας μεγάλο αριθμό κεραιών και πολλαπλών χρηστών MIMO. Κάθε κεραία ελέγχεται μεμονωμένα και μπορεί να ενσωματώνει εξαρτήματα ραδιοφωνικού πομποδέκτη. (Εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.3: Μαζικές κεραιές MIMO. Πηγή <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2014/614061/fig1/>

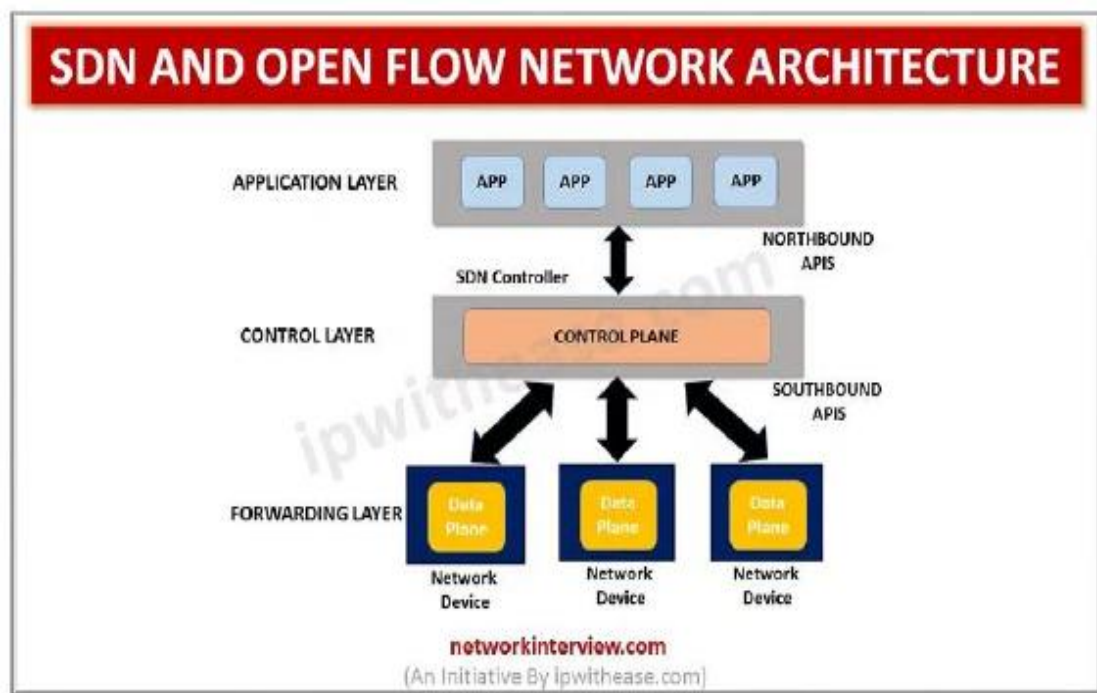
3. Beamforming

Το beamforming χρησιμοποιείται για να κατευθύνει τα ραδιοκύματα σε συγκεκριμένο στόχο-χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας στοιχεία με τέτοιο τρόπο ώστε τα σήματα σε συγκεκριμένες γωνίες να δέχονται σωστή παρέμβαση ενώ άλλα δέχονται

καταστροφικές παρεμβολές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιώσει την ποιότητα του σήματος και τις ταχύτητες μεταφοράς δεδομένων. Η πέμπτη γενιά ασύρματων δικτύων χρησιμοποιεί μορφοποίηση στη δέσμη με τη χρήση κεραιών σταδιακής συστοιχίας.

4. SDN (Software Defined Networking)

Η τεχνολογία SDN είναι μια αρχιτεκτονική στην οποία οι σταθμοί βάσης είναι προγραμματιζόμενοι και ελεγχόμενοι από έναν κεντρικό ελεγκτή. Η αρχιτεκτονική SDN χωρίζεται σε τρία στοιχεία, εφαρμογής, ελέγχου και υποδομής. Πρόκειται για μια προσέγγιση που για τα ασύρματα δίκτυα που επιτρέπει στους διαχειριστές να ελέγχουν και να διαχειρίζονται τους εξυπηρετητές από το χαμηλότερο επίπεδο λειτουργικότητας. (Εικόνα 3.4)



Εικόνα 3.4: Αρχιτεκτονική SDN. Πηγή <https://networkinterview.com>

5. NFV (Network Function Virtualization)

Το NFV είναι υπεύθυνο για την κληρονομικότητα. Με αυτό θέλουμε να πούμε ότι το NFV εικονοποιεί σύνολο λειτουργιών του δικτύου οι οποίες συγκεντρώνονται και συνδέονται ούτως ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν υπηρεσίες που υπήρχαν σε προηγούμενες γενιές δικτύων. Το NFV διαδέχεται τον κλασικό server virtualization που μπορεί με πολλές εικονικές μηχανές να προγραμματίσει διάφορα λειτουργικά συστήματα, λογισμικά και λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα μεταφέρει εφαρμογές

δικτυακού ή τηλεπικοινωνιακού τύπου που λειτουργούν σε εξειδικευμένες πλατφόρμες.

6. UDD (Ultra Dense Deployments)

Η ποσότητα του διαθέσιμου φάσματος δεν μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της ανερχόμενης τεχνολογίας 5G. Τα 5G δίκτυα θα λειτουργούν σε φάσμα συχνοτήτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις προηγούμενες γενεές δικτύων. Ένα βασικό κομμάτι των 5G είναι η πυκνή τοποθέτηση Small Cells που θα συνυπάρχουν μαζί με Microcells και Macrocells αλλά και με άλλα συστήματα όπως Wi-Fi, LTE/A και HSPA δημιουργώντας ετερογενή δίκτυα. Έτσι δημιουργούνται πολύ πυκνά cells. Η πύκνωση λοιπόν που προκύπτει στα δίκτυα παίζει σημαντικό ρόλο καθώς οδηγούν στην μέγιστη επαναχρησιμοποίηση του εύρους ζώνης αλλά και στη μείωση της απώλειας μετάδοσης.

7. Millimeter Wave (mmWave)

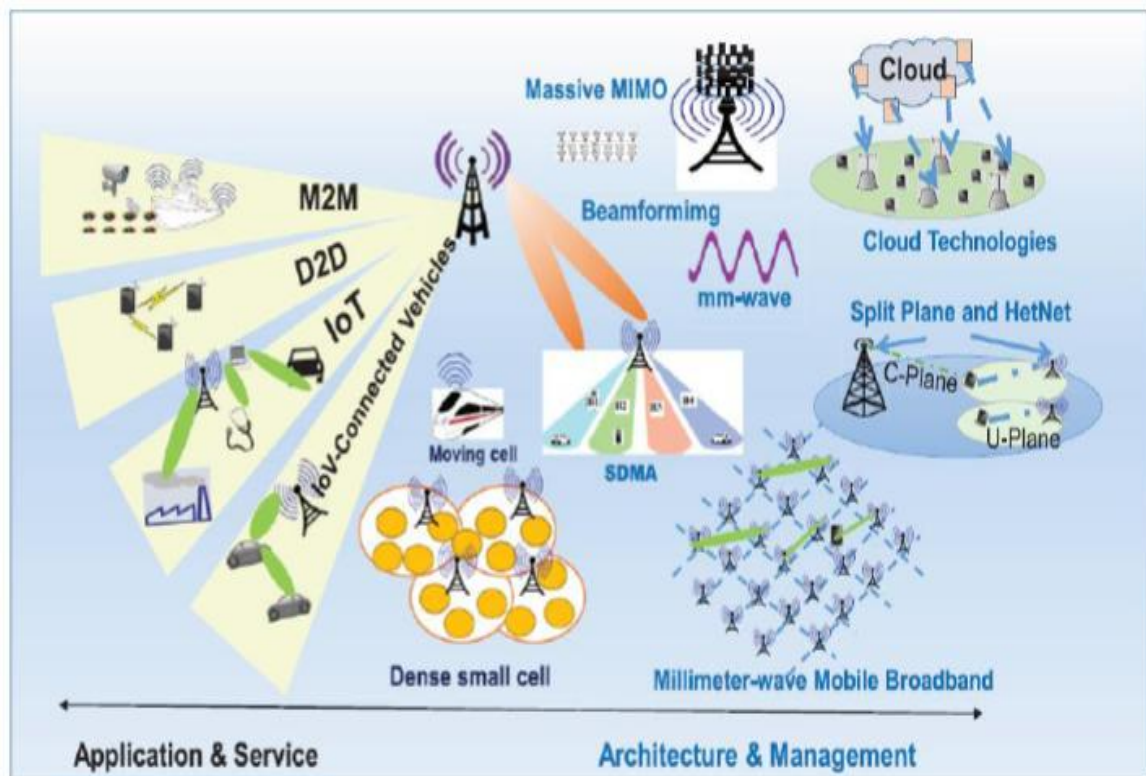
Πιο πάνω αναφέραμε τις νέες ραδιοσυχνότητες που προσφέρουν τα 5G δίκτυα και τις δύο κατηγορίες FR1, FR2 που θα εκπέμπουν. Η FR2 (mmWave) είναι μια πολύ υποσχόμενη τεχνολογία για τα 5G δίκτυα καθώς παρέχει πολλαπλά giga bits ανά δευτερόλεπτο στη συσκευή του χρήστη. Λειτουργεί σε μια ζώνη συχνοτήτων του εύρους των 30 GHz έως 300 GHz. Χρησιμοποιώντας την D2D (Device to Device) επικοινωνία στα mmWave κυψελωτά δίκτυα τότε μπορούμε να έχουμε ένα αριθμό άμεσων ταυτόχρονων συνδέσεων το οποίο οδηγεί στην αυξημένη χωρητικότητα του δικτύου.

8. HetNets (Heterogenous Networks)

Ένας τρόπος αντιμετώπισης της τεράστιας αύξησης στην κίνηση στα ασύρματα δίκτυα είναι η δημιουργία μεγάλου αριθμού μικρών κυψελών δημιουργώντας έτσι τα ετερογενή δίκτυα. Αποτελούνται από μικρές κυψέλες με χαμηλή απόδοση ισχύος με αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου και την αύξηση της κάλυψης του σταθμού βάσης.

9. D2D Communication (Device to Device)

Η επικοινωνία D2D στα κινητά δίκτυα ορίζεται ως η άμεση επικοινωνία που επιτυγχάνεται μεταξύ δύο χρηστών χωρίς την παρέμβαση του σταθμού βάσης ή του πυρήνα του δικτύου. Οι επικοινωνίες D2D σε συγκεκριμένα σενάρια μπορούν να αυξήσουν σημαντικά τη φασματική απόδοση του δικτύου. (Εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5: Εφαρμογές, τεχνολογίες και υπηρεσίες 5ης γενιάς δικτύων. Πηγή <http://www.techtrained.com/what-are-the-major-architectural-changes-in-5g-and-resulting-applications-and-services/>

3.4 Εφαρμογές 5G

Νέες υπηρεσίες και περιπτώσεις χρήσης προβλέπονται για το 5G, όπου θα παίξουν κυρίαρχο ρόλο στην τεχνολογία. Κάποιες περιπτώσεις χρήσης ίσως απαιτούν πολλαπλές διαστάσεις για βελτιστοποίηση ενώ άλλες εστιάζουν μόνο σε έναν δείκτη απόδοσης. Πάντως, μια από τις κύριες προκλήσεις για το 5G θα είναι να υποστηρίξει τέτοιες ποικίλες περιπτώσεις με έναν ευέλικτο και αξιόπιστο τρόπο. Οι γενικές υπηρεσίες που αναμένεται να προσφερθούν κατηγοριοποιούνται ως αυξημένη κινητή ευρύ-ζωνικότητα (enhanced Mobility Broad Band - eMBB), μαζική επικοινωνία συσκευών (machine Massive Type Communication - mMTC) και αξιόπιστη και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία (Ultra Reliable Low Latency Communication - URLLC).

Ένας πιο αναλυτικός χαρακτηρισμός των υπηρεσιών αυτών μπορεί να επεξηγηθεί ως εξής:

- **eMBB.** Η υπηρεσία κινητής ευρείας ζώνης μπορεί να υποστηρίξει σταθερές συνδέσεις με πολύ υψηλό ρυθμό δεδομένων, αλλά και αξιόλογους ρυθμούς για τους χρήστες σε οριακές συνθήκες κελιού.

- mMTC. Η υπηρεσία μαζικής επικοινωνίας συσκευών τύπου μηχανής, είναι σε θέση να υποστηρίξει συσκευές του Internet of Things, που σποραδικά αναμεταδίδουν μόνο μικρά πακέτα πληροφορίας.
- URLLC. Οι επικοινωνίες που απορρέουν από την παρούσα υπηρεσία υποστηρίζουν χαμηλές καθυστερήσεις για μεταδόσεις μικρών όγκων δεδομένων, με πολύ υψηλή αξιοπιστία.

Στα πλαίσια των παραπάνω υπηρεσιών, έχουν καθοριστεί ομάδες χρήσης, στις οποίες αναπτύσσονται οι κατηγορίες υπηρεσιών. Ομάδες χρήσης αποτελούν τα πυκνά περιβάλλοντα (Dense Urbans), τα διασυνδεδεμένα οχήματα (Connected Vehicles), τα μελλοντικά έξυπνα σπίτια (Smart Homes), δίκτυα IoT καθώς και το απτικό διαδίκτυο (Tactile Internet).

Μια πιο τυπική κατάταξη των ομάδων χρήσης είναι:

- Υπηρεσίες broadband - Χαμηλό εύρος ζώνης για IoT
- Μελλοντικά έξυπνα γραφεία - Διασυνδεδεμένα οχήματα
- Απτικό Διαδίκτυο

Η παραπάνω κατάταξη είναι βασισμένη σε μετρικές ανάλογα με την εμπειρία της υπηρεσίας για κάθε πελάτη, όπως:

- Πυκνότητα συσκευής (Device density)
- Κινητικότητα (Mobility)
- Αξιοπιστία (Reliability)
- Τύπος υπηρεσίας 5G (mMTC, URLLC, eMBB)
- Ρυθμός δεδομένων χρήστη (User data rate)

Η τεχνολογία 5G αποτελεί μια τεχνολογία η οποία υποστηρίζει ετερογενείς υπηρεσίες και μπορεί να προσφέρει αδιάλειπτη συνδεσιμότητα σε όλο τον κόσμο. Πιο συγκεκριμένα βοηθάει σε καθημερινές ανθρώπινες ανάγκες είτε σε προσωπικό είτε σε επαγγελματικό επίπεδο. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε μερικούς από τους λόγους για τους οποίους αξίζει η χρήση της τεχνολογίας 5G.

Δυνατότητα παρακολούθησης σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου.

Με αυτό τον τρόπο μειώνεται σε σημαντικό βαθμό η εγκληματικότητα. Ουσιαστικά η τεχνολογία 5G μπορεί να συμβάλει στην αναζήτηση ή ακόμη και στον εντοπισμό ενός αγνοούμενου οπουδήποτε και αν βρίσκεται.

Δυνατότητα αύξησης του εύρους ζώνης για όλους τους χρήστες.

Το εύρος ζώνης είναι η ποσότητα δεδομένων που είναι διαθέσιμη για τους χρήστες. Ουσιαστικά μπορούν να κατεβάσουν αρχεία, να προβάλουν ιστοσελίδες και να παρακολουθήσουν βίντεο και οτιδήποτε άλλο επιθυμούν. Οι έξυπνες συσκευές που λειτουργούν σε ένα δίκτυο 5G θα λειτουργούν με ταχύτητες που είναι χιλιάδες φορές πιο γρήγορες από ό, τι σε ένα δίκτυο 4G. Πολλές εργασίες που θα μπορούσαν να εκτελεστούν μόνο σε επιτραπέζιους ή φορητούς υπολογιστές στο παρελθόν θα έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν ξαφνικά σε μια έξυπνη συσκευή.

Δυνατότητα μεγαλύτερης χωρητικότητας από το υπάρχον δίκτυο 4G.

Αναμένεται ότι θα αυξήσει τα ποσοστά δεδομένων πέραν του 1GB ανά δευτερόλεπτο και θα προσφέρει υψηλότερη ευρυζωνική πυκνότητα στους χρήστες. Θα υπάρξει χαμηλή λανθάνουσα κατάσταση και χαμηλή κατανάλωση μπαταρίας ενώ θα χρησιμοποιηθεί 5G, έτσι θα αυξήσει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας έως και 10 χρόνια και θα μειώσει τη χρήση ενέργειας δικτύου κατά 90%.

Δυνατότητα πολλαπλής πρόσβασης σε ταυτόχρονες συνδέσεις με υψηλό ρυθμό.

Η φασματική απόδοση θα αυξηθεί στο δίκτυο 5G ώστε να προσφέρει καλύτερη χρήση smartphones αυξάνοντας την ταχύτητά τους. Επίσης θα εισαγάγει εικονική πραγματικότητα στον τομέα των smartphones, η 5G θα προσφέρει τη μεγαλύτερη αλλαγή ξεκινώντας από την εποχή των έξυπνων αυτοκινήτων και των έξυπνων κατοικιών.

3.5 Μειονεκτήματα και ανησυχίες

Ένας από τους κινδύνους είναι η ασφάλεια και η έλλειψη της τεχνολογικής προόδου σε περισσότερες από τις γεωγραφικές περιοχές. Επίσης η τεχνολογία 5G δεν υποστηρίζεται από πολλές παλιές συσκευές. Πρέπει να γίνει αντικατάσταση παλαιών συσκευών με υποστηριζόμενες συσκευές 5G κάτι που απαιτεί αρκετά χρήματα. Πολλά μέρη του κόσμου μπορεί να μην επιτρέπουν μεγάλη αύξηση της ταχύτητας και να υπάρχουν προβλήματα ραδιοσήματος.

Επενδύσεις υψηλού κόστους για την ανάπτυξη υποδομών, το δίκτυο 5G έχει θέματα ασφάλειας και προστασίας της ιδιωτικής ζωής, η τεχνολογία 5G απαιτεί εξειδικευμένους μηχανικούς να εγκαταστήσουν και να διατηρήσουν το δίκτυο 5G. Αυτό αυξάνει το κόστος των φάσεων εγκατάστασης και συντήρησης 5G, ενώ τα smartphones 5G θα είναι δαπανηρά. Η απόσταση κάλυψης είναι έως 2 μέτρα (σε εσωτερικούς χώρους) και 300 μέτρα (σε υπαίθρια). Οι πρώτες αναφορές στο δίκτυο 5G υποδεικνύουν ότι αυτό το δίκτυο πρόκειται να μεταδώσει τα δεδομένα του στην

περιοχή των περίπου 6 GHz. Δυστυχώς, αυτή η περιοχή ραδιοσυχνοτήτων είναι ήδη γεμάτη από άλλα σήματα. Οι πύργοι 3G κυψελών θα μπορούσαν να καλύψουν τεράστια περιοχή με σχετικά λίγα κελιά, επειδή το δίκτυο δεν απαιτεί τόσο μεγάλο εύρος ζώνης.

Όταν η τεχνολογία προχώρησε σε δίκτυα 4G, τα κελιά παρήγαγαν μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Οι άνθρωποι έχουν παρατηρήσει ότι η κάλυψη μειώνεται από ό, τι στο δίκτυο τους 3G. Καθώς το δίκτυο 5G εξελίσσεται, περισσότεροι πύργοι κυττάρων θα πρέπει να παράγουν αυτό το τεράστιο εύρος ζώνης, και επειδή τα κελιά δεν μπορούν να καλύψουν τόσο χώρο όπως το 3G ή 4G κύτταρα, θα πρέπει να αναπτυχθούν περισσότερα κελιά. Έτσι, οι χρήστες 5G θα πρέπει να αναμένουν ότι η κάλυψή τους ενδέχεται να μην είναι τόσο διαδεδομένη στην αρχή.

Οι συχνότητες που έχουν επιλεγεί για να εκπέμπουν τα 5G δίκτυα επιλέχθηκαν με το κριτήριο ότι δεν χρησιμοποιούνται από κάποια άλλη ήδη υπάρχουσα τεχνολογία. Στην Ευρώπη θα χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων, μια στα 0,7 GHz, μια στα 3,4 με 3,8 GHz και μια πολύ πιο υψηλή συχνότητα που ανέρχεται στα 24 με 27,5 GHz. Οι συχνότητες είναι υψηλότερες από αυτές που χρησιμοποιούν τα δίκτυα 4G γι' αυτό και θα είναι ικανά τα δίκτυα πέμπτης γενιάς να μεταφέρουν δεδομένα με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα.

Το πρόβλημα και ο λόγος της έναρξης των ανησυχιών που αναφέρθηκαν νωρίτερα για την ανθρώπινη υγεία είναι η απαραίτητη τοποθέτηση πολλαπλών κεραίων. Τα σήματα υψηλότερης συχνότητας δεν έχουν την ίδια εμβέλεια με τα σήματα χαμηλότερων συχνοτήτων που χρησιμοποιούνται σήμερα οπότε απαιτούνται περισσότερες κεραίες σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους για την ενίσχυση του σήματος για καλύτερη κάλυψη.

Η επιτροπή FCC (Federal Communications Commission), είναι υπεύθυνη για τη χορήγηση αδειών χρήσης του ραδιοφάσματος για δημόσια χρήση στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και δε συμεριζεται τις απόψεις του οργανισμού τροφίμων και φαρμάκων των ΗΠΑ.¹⁷ Για τις συσκευές που θα υποστηρίζουν 5G, τα σήματα από εμπορικούς ασύρματους πομπούς είναι συνήθως πολύ κάτω από τα όρια έκθεσης ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequencies), για οποιαδήποτε τοποθεσία που θα είναι προσβάσιμη στο κοινό. Η Ευρωπαϊκή Ένωση με τη σειρά της αναφέρει επιφυλακτικά ότι δεν υπάρχουν ακόμη έρευνες εκτός εργαστηρίου που να αποδεικνύουν αυτά που

¹⁷ <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/cell-phones/do-cell-phones-pose-health-hazard>

υποστηρίζουν και ότι οι επιστήμονες θα συνεχίζουν να δοκιμάζουν τα νέα δίκτυα καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία για να βεβαιωθούν ότι η τεχνολογία που θα χρησιμοποιούμε καθημερινά θα παραμένει ασφαλής για τον άνθρωπο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: TIME SENSITIVE NETWORK (TSN)

4.1 Χαρακτηριστικά

Η ταχύτητα με την οποία τα εργοστάσια ενστερνίζονται το παράδειγμα του ψηφιακού μετασχηματισμού καθιστά σήμερα απαραίτητη την ανάπτυξη διαλειτουργικών δικτύων υψηλής απόδοσης που μπορούν να υποστηρίξουν δεδομένα καθώς ταξιδεύουν από την πηγή στα συστήματα διαχείρισης.

Είναι απαραίτητη προϋπόθεση ότι όλος ο εξοπλισμός δικτύου, όλοι οι διακόπτες και τα τερματικά στο δίκτυο να έχουν συγχρονισμό. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις για τη διευκόλυνση αυτών των λειτουργιών χρησιμοποιούνται.¹⁸

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 1588-2008-Precision Time Protocol¹⁹

Χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο εντός του δικτύου, το πρότυπο IEEE 1588-2008 που παρέχει ένα ακριβές ρολόι.

IEEE 802.1AS-2011-Timeres

Εκτός από τη γενική προδιαγραφή IEEE 1588, η ομάδα εργασιών TSN υιοθέτησε ένα ειδικό προφίλ που ορίζει τη χρήση των προδιαγραφών IEEE 1588 σε συνδυασμό με το IEEE 802.1Q. Το προφίλ αναπτύχθηκε για να διευκολύνει σε εφαρμογές που δεν απαιτούν την πλήρη λειτουργικότητα του προτύπου 1588-2008. Επειδή το προφίλ δεν πληρούσε όλες τις απαιτήσεις αυτοματισμού, επανασχεδιάστηκε και είναι πλέον γνωστό ως IEEE 802.1AS-rev.

Μια δεύτερη βασική λειτουργικότητα ασχολείται με τη μετάδοση κρίσιμης και μη κρίσιμης κίνησης δεδομένων σε ένα δίκτυο. Η κυκλοφορία κρίσιμων δεδομένων πρέπει να είναι εγγυημένη παράδοση σε προγραμματισμένο χρόνο, ενώ η μη κρίσιμη κίνηση δεδομένων έχει συνήθως χαμηλότερη προτεραιότητα. Οκτώ κατηγορίες που έχουν δημιουργηθεί σύμφωνα με το IEEE 802 1Q χρησιμοποιούνται για να δώσουν προτεραιότητα σε διαφορετικούς τύπους κίνησης δεδομένων.

Ωστόσο, η καθορισμένη ποιότητα υπηρεσιών, Quality of service (QoS) του προτύπου δεν σχεδιάστηκε για την παράλληλη αποστολή κρίσιμων και μη κρίσιμων δεδομένων. Λόγω των μηχανισμών προσωρινής αποθήκευσης στους διακόπτες Ethernet, ένα πακέτο Ethernet χαμηλής προτεραιότητας μπορεί να καθυστερήσει ακόμη και αυτές τις ροές δεδομένων υψηλότερης προτεραιότητας κατά μήκος της

¹⁸ <https://www.embedded.com/time-sensitive-networking-is-supporting-ethernet-applications/>

¹⁹ <https://us.profinet.com/digital/tsn/>

διαδρομής μετάδοσης. Νέοι μηχανισμοί ιεράρχησης έχουν εισαχθεί για να επιτρέψουν και να ρυθμίσουν αυτή τη συνύπαρξη. Ανάλογα με την απαίτηση εφαρμογής, μπορούν να εφαρμοστούν πρόσθετοι μηχανισμοί διαμόρφωσης της κυκλοφορίας ή προγραμματισμού.

IEEE 802.1Qav - Credit Based Shaper

Αυτό το πρότυπο ορίζει έναν αλγόριθμο για τις ροές δεδομένων με απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο που πρέπει να έχουν προτεραιότητα έναντι της κίνησης με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια. Το Credit Based Shaper (CBS) αναπτύχθηκε το 2009 από την ομάδα εργασίας IEEE 802.1 για την προηγούμενη τεχνολογία TSN Audio/Video Bridging (AVB). Ο διαμορφωτής εκχωρεί πιστώσεις αποστολής σε ροές δεδομένων.

IEEE 802.1Qav-Χρονοπρογραμματιστής ενημερωμένος για το χρόνο

Η βασική λειτουργία του χρονοπρογραμματιστή είναι η δημιουργία ίσων διακριτών χρονικών περιόδων (κύκλων). Η διαμόρφωση με γνώμονα το χρόνο παρέχει ένα σταθερό χρονοδιάγραμμα για διαφορετικές κατηγορίες δεδομένων ώστε να προκαθορίζουν τις ώρες έναρξης και άφιξης. Αυτό καθιστά δυνατή τη συμμόρφωση με καθορισμένους χρόνους μετάδοσης και συγχρονισμό πολλαπλών ροών δεδομένων.

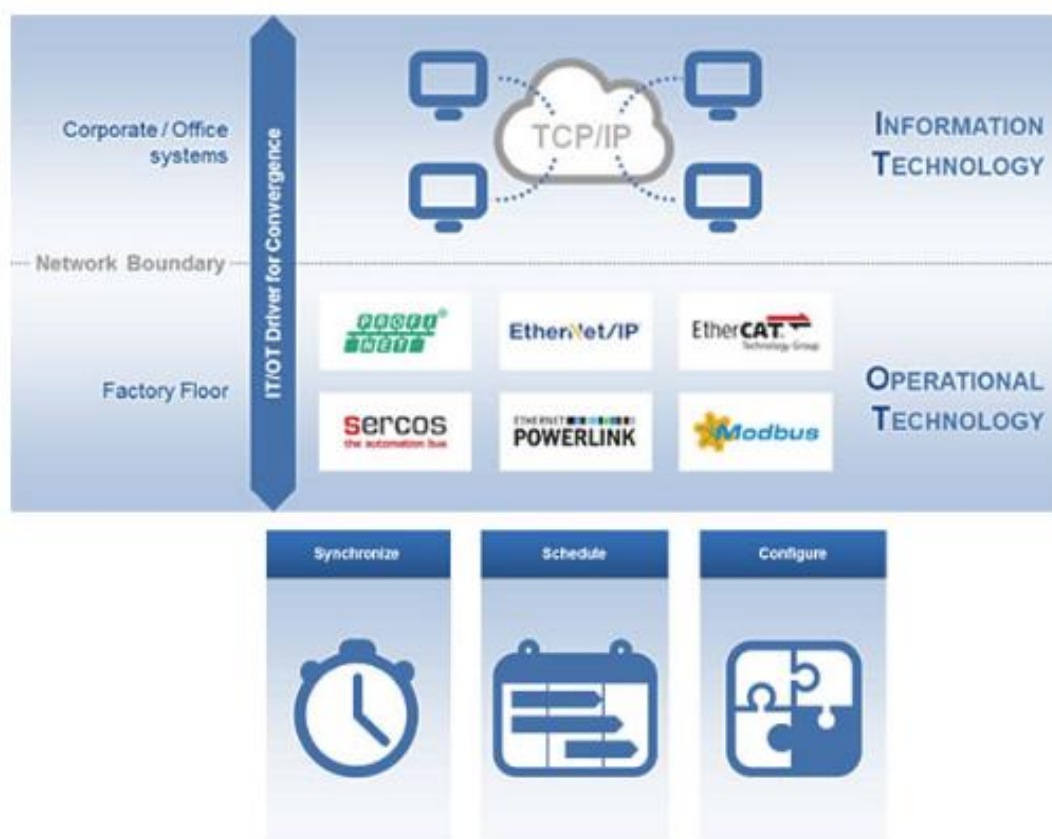
Επειδή ο προγραμματιστής απαιτεί συγχρονισμό, όλοι οι συμμετέχοντες στο δίκτυο γνωρίζουν πότε ποια προτεραιότητα μπορεί να αποσταλεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία. Εκτός από τον συγχρονισμό του χρόνου και τους διάφορους μηχανισμούς διαμόρφωσης και προγραμματισμού της κίνησης, άλλα υποπρότυπα έχουν αναπτυχθεί ή βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης.

4.2 Γενική αρχιτεκτονική TSN

Τα περισσότερα βιομηχανικά δίκτυα Ethernet μπορούν να παρέχουν επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο για πολυεπίπεδο έλεγχο, συγχρονισμένο. Αλλά το καθένα χρησιμοποιεί τις δικές του μεθόδους για συγχρονισμό χρόνου και μετάδοση δεδομένων για να εγγυηθεί χρονικούς κύκλους, καθυστέρηση και jitter, καθιστώντας αυτά τα δίκτυα ασύμβατα μεταξύ τους.

Το TSN επιδιώκει την επίλυση του προβλήματος συμβατότητας δικτύου παρέχοντας τυπικές μεθόδους για συγχρονισμό χρόνου και διαχείριση κίνησης, επιτρέποντας ντετερμινιστική επικοινωνία μέσω τυπικών δικτύων Ethernet. Θα επιτρέψει επίσης τη «σύγκλιση της πληροφορικής και της τεχνολογίας πληροφοριών» καθιστώντας δυνατή τη διαχείριση μη κρίσιμων πληροφοριών (διαγνωστικά και στατιστικά δεδομένα, για

παράδειγμα) και κρίσιμα χρονικά επιχειρησιακά δεδομένα (για παράδειγμα εντολές ελέγχου κίνησης και ασφάλειας) στο ίδιο δίκτυο χωρίς συμβιβασμούς στην ποιότητα των υπηρεσιών (QoS). (Εικόνα 4.1)



Εικόνα 4.1: Το TSN επιτρέπει αυτό που συχνά περιγράφεται ως "σύγκλιση IT και OT". Πηγή <https://www.motioncontroltips.com/what-is-time-sensitive-networking-tsn/>

Συγχρονισμός (Synchronization)

Για επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, κάθε εξοπλισμός στο δίκτυο πρέπει να έχει την ίδια κατανόηση του χρόνου, δηλαδή, κάθε συσκευή πρέπει να είναι πολύ συγχρονισμένη. Το TSN το επιτυγχάνει μέσω του IEEE 1588 PTP (Precision Time Protocol). Ορισμένα δίκτυα IE, όπως το EtherNet/IP και το PROFINET, χρησιμοποιούν ήδη το IEEE 1588 PTP για συγχρονισμό χρόνου. Τα περισσότερα δίκτυα TSN θα χρησιμοποιούν ένα υποσύνολο IEEE 1588, που αναφέρεται ως IEEE 802.1AS ή IEEE 802.1ASRev, για συγχρονισμό, αν και άλλα υποσύνολα του IEEE 1588 είναι επίσης πιθανές λύσεις για το TSN, ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις εφαρμογής. Ωστόσο, όλες οι συσκευές στο δίκτυο πρέπει να χρησιμοποιούν την ίδια μέθοδο συγχρονισμού.

Χρονοδρομολόγηση (Scheduling)

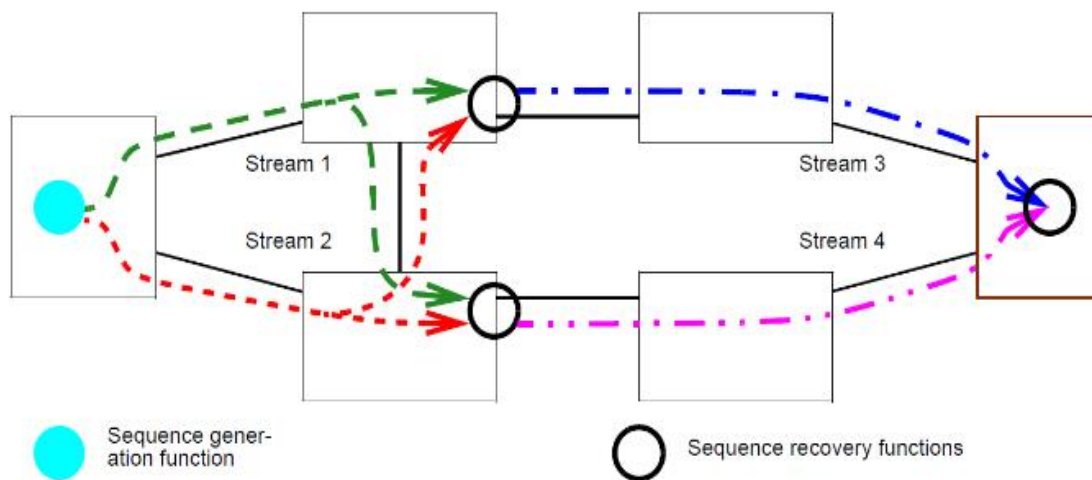
Για τον προγραμματισμό επισκεψιμότητας, το TSN χρησιμοποιεί το χρονοπρογραμματιστή του IEEE 802.1Qbv που ενημερώνει για το χρόνο και επιτρέπει τη διαμόρφωση των χρονικών τομών στο δίκτυο για την εξυπηρέτηση διαφορετικών τύπων κίνησης. Αυτή η διαδικασία αναφέρεται συχνά ως TDMA - πολλαπλή πρόσβαση διαίρεσης χρόνου. Κάθε χρονικό τμήμα ή κομμάτι, εκχωρείται σε διαφορετική κατηγορία κίνησης ή προτεραιότητα.

Με τον συγχρονισμό χρόνου μεταξύ όλων των συσκευών δικτύου, κάθε συσκευή γνωρίζει ακριβώς πότε κάθε κλάση κίνησης πρέπει να μεταδοθεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία και μπορεί να συγκρατήσει άλλη κίνηση όπως απαιτείται για να διασφαλίσει ότι το εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο για δεδομένα κρίσιμα για το χρόνο. Αυτή η μέθοδος συγχρονισμού χρόνου και προγραμματισμού κίνησης διασφαλίζει ότι το δίκτυο μπορεί να παρέχει ντετερμινιστική επικοινωνία όταν χρειάζεται.

Διαμόρφωση (Shaping)

Η διαμόρφωση είναι η διαδικασία διαχείρισης της κίνησης για επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο ή για την επίτευξη προκαθορισμένων προτύπων κίνησης. Υπάρχει ένας αριθμός μηχανισμών σε δίκτυα ευαίσθητα στο χρόνο που διευκολύνουν τη διαμόρφωση της κίνησης με βάση τις συγκεκριμένες απαιτήσεις κίνησης και αυτοί οι μηχανισμοί διαμόρφωσης μπορούν να συνδυαστούν στο ίδιο δίκτυο. Ο συνδυασμός μηχανισμών διαμόρφωσης της κυκλοφορίας και ο χρονοπρογραμματιστής που έχει επίγνωση του χρόνου επιτρέπει σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και δεδομένα παρασκηνίου) να συνυπάρχουν στο ίδιο δίκτυο.

Το TSN είναι ένα εξελισσόμενο σύνολο προτύπων και αναπτύσσεται ένα κοινό πρότυπο IEC-IEEE (International Electrotechnical Commission- Institute of Electrical and Electronics Engineers) για τον καθορισμό των προφίλ TSN για βιομηχανικούς αυτοματισμούς. Αυτό το κοινό πρότυπο, γνωστό ως IEC/IEEE 60802: TSN Profile for Industrial Automation (TSN-IA), θα διασφαλίσει τη συμβατότητα μεταξύ των διαφόρων πρωτοκόλλων Industrial Ethernet, επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιηθούν στο ίδιο δίκτυο. Η πρώτη επίσημη έκδοση του IEC/IEEE 60802 αναμένεται το 2022.



Εικόνα 4.2: TSN ροή δικτύου. Πηγή <https://www.aimvalley.com/solutions/technologies/time-sensitive-networking/>

4.3 Βασικά συστατικά – εργαλεία TSN

Υπάρχουν πέντε κύρια συστατικά στην χρήση των TSN δικτύων²⁰.

1. Ροή TSN (TSN flow)

Όρος που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τον κρίσιμο χρόνο επικοινωνίας μεταξύ τελικών συσκευών. Κάθε ροή έχει αυστηρές χρονικές απαιτήσεις. Κάθε ροή TSN προσδιορίζεται μοναδικά από τις συσκευές δικτύου.

2. Τελικές συσκευές (End devices)

Αυτές είναι η πηγή και προορισμοί των ροών TSN. Οι τελικές συσκευές είναι εκτέλεση μιας εφαρμογής που απαιτεί ντετερμινιστική επικοινωνία. Αυτά αναφέρονται επίσης ως ομιλητές και ακροατές.

3. Γέφυρες Bridges

Αναφέρονται επίσης ως διακόπτες Ethernet. Για το TSN, αυτές είναι ειδικές γέφυρες ικανές για τη μετάδοση των πλαισίων Ethernet μιας ροής TSN, σε ένα πρόγραμμα και λήψη καρέ Ethernet μιας TSN ροής σύμφωνα με ένα χρονοδιάγραμμα.

4. Κεντρικός ελεγκτής δικτύου (CNC) (Central Network Controller)

Για το TSN το CNC λειτουργεί ως διακομιστής μεσολάβησης για το Δίκτυο (οι γέφυρες TSN και οι διασυνδέσεις τους) και η εφαρμογή ελέγχου που απαιτούν ντετερμινιστική επικοινωνία. Το CNC καθορίζει το χρονοδιάγραμμα που μεταδίδονται όλα τα πλαίσια TSN. Στο CNC η εφαρμογή παρέχεται από τον πωλητή του TSN.

²⁰ <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>

5. Κεντρική διαμόρφωση χρήστη (CUC) (Centralized User Configuration)

Η εφαρμογή που επικοινωνεί με το CNC και τις τελικές συσκευές. Το CUC αντιπροσωπεύει τις εφαρμογές ελέγχου και τις τελικές συσκευές. Το CUC υποβάλλει αιτήματα στο CNC για ντετερμινιστική επικοινωνία (ροές TSN) με συγκεκριμένα απαιτήσεις για αυτές τις ροές. Το CUC είναι μία εφαρμογή που είναι συγκεκριμένη για τον προμηθευτή. Τυπικά ο προμηθευτής των τελικών συσκευών TSN θα παρέχει CUC για τις τελικές συσκευές.

Κοινή αντίληψη του χρόνου

Το κλειδί για την παροχή ντετερμινισμού είναι η κοινή έννοια του χρόνου. Η εφαρμογή του 802.1AS (και στο μέλλον 802.1ASRev) για τελικές συσκευές και γέφυρες απαιτείται για το TSN. Το προφίλ 802.1AS PTP επιτρέπει όλα τα TSN στοιχεία δικτύου να μοιράζονται την ίδια έννοια - χρόνος.

Το κλειδί για την έγκαιρη παράδοση των πλαισίων TSN είναι το 802.1Qbv. Το Qbv ορίζει ένα μέσο μετάδοσης με ορισμένα πλαίσια Ethernet TSN σε ένα πρόγραμμα, ενώ επιτρέπει τη μετάδοση πλαισίων Ethernet εκτός TSN και με βάση την καλύτερη δυνατή προσπάθεια γύρω από τα πλαίσια TSN να μεταδίδονται. Επειδή όλα τα στοιχεία δικτύου μοιράζονται τον ίδιο χρόνο, τερματικές συσκευές και γέφυρες που υλοποιούν Qbv can παρέχουν κρίσιμη επικοινωνία πολύ γρήγορα και με κανένα διακριτό τρεμόπαιγμα (jitter) κατά την παράδοση.

Τα πρότυπα TSN μπορούν να θεωρηθούν ως μια εργαλειοθήκη που περιλαμβάνει πολλά πολύτιμα εργαλεία που ταξινομούνται σε τέσσερις ομάδες. Διαμόρφωση κίνησης, Διαχείριση πόρων, Συγχρονισμός χρόνου και Αξιοπιστία.

Η διαμόρφωση της κίνησης εγγυάται τη χειρότερη καθυστέρηση για κρίσιμα δεδομένα με διάφορες τεχνικές αναμονής και διαμόρφωσης και με την κράτηση πόρων για κρίσιμη κίνησης:

- Το πρότυπο προγραμματισμένης κυκλοφορίας (802.1Qbv) παρέχει διαμόρφωση κυκλοφορίας βάσει χρόνου.
- Προεπιλογή πλαισίου Ethernet (802.3br και 802.1Qbu), μπορεί να αναστείλει τη μετάδοση ενός μη κρίσιμου πλαισίου Ethernet. Είναι ευεργετικό να μειωθεί η καθυστέρηση και η διακύμανση της καθυστέρησης της κρίσιμης κίνησης.

Η διαχείριση πόρων ορίζεται από τα μοντέλα διαμόρφωσης TSN (802.1Qcc).

- Η κεντρική διαμόρφωση δικτύου (CNC) μπορεί να εφαρμοστεί στις συσκευές δικτύου (γέφυρες).
- Η κεντρική διαμόρφωση χρήστη (CUC) μπορεί να εφαρμοστεί σε συσκευές χρήστη (τελικούς σταθμούς).

Ο συγχρονισμός χρόνου βασίζεται στο γενικευμένο πρωτόκολλο ώρας ακριβείας (gPTP) (802.1AS).

- Είναι ένα προφίλ του προτύπου Precision Time Protocol (IEEE 1588)
- Παρέχει αξιόπιστο συγχρονισμό χρόνου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το Scheduled Traffic (802.1Qbv).

Η αξιοπιστία παρέχεται από το Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER) (802.1CB) για ροές δεδομένων μέσω ενός μηχανισμού αξιοπιστίας ανά πακέτο.

- Παρέχει αξιοπιστία μεταδίδοντας πολλαπλά αντίγραφα των ίδιων πακέτων δεδομένων σε ασύνδετες διαδρομές στο δίκτυο.
- Φιλτράρισμα και έλεγχος ανά ροή (802.1Qci) βελτιώνει την αξιοπιστία προστατεύοντας από παραβίαση εύρους ζώνης, δυσλειτουργία και κακόβουλη συμπεριφορά.

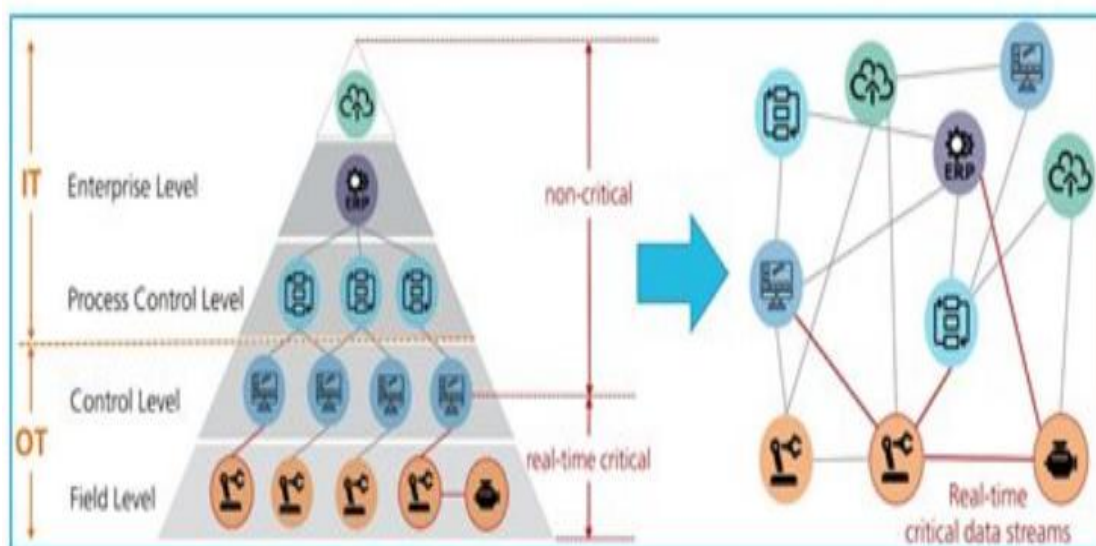
4.4 Γιατί TSN;

Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα παραδοσιακά δίκτυα Ethernet που περιλαμβάνουν αυτοματοποιημένους τομείς όπως η κατασκευή, βασίζονται στην ιεραρχική πυραμίδα αυτοματισμού που διαχωρίζει την τεχνολογία της πληροφορίας από την επιχειρησιακή τεχνολογία (OT). Η πληροφορική περιλαμβάνει κλασική επικοινωνία γραφείου με τυπικές τελικές συσκευές όπως εκτυπωτές και προσωπικούς υπολογιστές. Το OT (Operational Technology) αποτελείται από συστήματα, μηχανές και λογισμικό που χρησιμοποιούνται για έλεγχο και αυτοματοποίηση διαδικασιών. Οι δύο τομείς είναι θεμελιωδώς διαφορετικοί στον τρόπο επικοινωνίας τους, με την τεχνολογία να εξαρτάται από το εύρος ζώνης και το OT να επικεντρώνεται στην υψηλή διαθεσιμότητα.

Ως εκ τούτου, η κυκλοφορία δεδομένων σε επίπεδο ΤΠ (Τεχνολογίας Πληροφοριών) συχνά ταξινομείται ως μη κρίσιμη, ενώ η κίνηση δεδομένων χαρακτηρίζεται (χρονικά) κρίσιμη σε επίπεδο OT. Ως αποτέλεσμα, κάθε επίπεδο χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο

πρότυπο επικοινωνίας. Ενώ το σύστημα διαύλου Ethernet με TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) έχει επικρατήσει σε μεγάλο βαθμό σε επίπεδο πληροφορικής, διάφορα συστήματα διαύλου, γνωστά και ως συστήματα fieldbus, που ικανοποιούν ιδιαίτερα τις απαιτήσεις για εγγυημένους χρόνους καθυστέρησης είναι ευρέως διαδεδομένα σε επίπεδο OT.

Κάθε προμηθευτής ελέγχου προωθεί συνήθως ένα συγκεκριμένο σύστημα fieldbus. Για τον χρήστη, αυτό σημαίνει ότι η επιλογή του ελεγκτή καθορίζει βασικά και την επιλογή του διαύλου. Έτσι, ο τελικός χρήστης συχνά εξαρτάται από τον κατασκευαστή, καθώς τα διαφορετικά συστήματα διαύλου είναι ασύμβατα μεταξύ τους.



Εικόνα 4.3: Μετατροπή της πυραμίδας αυτοματισμού. Πηγή <https://www.design-reuse.com/articles/46536/an-introduction-to-time-sensitive-networking.html>

Στην αρχή, δεν υπήρχε σχεδόν καμία σύνδεση μεταξύ IT και OT. Σήμερα, η συνεχής μετάδοση δεδομένων αποτελεί θεμελιώδη ανάγκη για τις ψηφιοποιημένες επιχειρήσεις όλων των σχημάτων και μεγεθών.

Η συνεπής επικοινωνία είναι απαραίτητη για την εκπλήρωση των αναγκών που απαιτούνται για την απόκτηση λειτουργικών δεδομένων, την απομακρυσμένη πρόσβαση ή τη σύνδεση μηχανής στο cloud. Μεγαλύτερη σημασία θα δοθεί στα συγκλίνοντα, ομοιόμορφα δίκτυα στο μέλλον. Ο βιομηχανικός αυτοματισμός βρίσκεται ήδη σε φάση αναδιάρθρωσης που βασίζεται στην καθιέρωση ευέλικτης και ευφυούς κατασκευής, που συχνά περιγράφεται ή ήδη εφαρμόζεται στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 ή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Η έξυπνη παραγωγή

περιλαμβάνει εξαρτήματα, μηχανές και εργοστάσια που επικοινωνούν συνεχώς μεταξύ τους προκειμένου να βελτιστοποιούν και να υποστηρίζουν διαδικασίες με αυτοματοποιημένο τρόπο.

Προς όφελος της ολοκλήρωσης, η κλασική πυραμίδα αυτοματισμού μετατρέπεται σε ένα ευρύ δίκτυο, το οποίο περιλαμβάνει επίσης αισθητήρες που συνδέονται άμεσα με υψηλότερα επίπεδα ελέγχου. Ο διαχωρισμός των επιπέδων πεδίου και ελέγχου διαλύεται ολόενα και περισσότερο, δημιουργώντας την ανάγκη για ένα ομοιόμορφο, συγκλίνον δίκτυο στο οποίο η κρίσιμη κίνηση δεδομένων μπορεί να μεταδίδεται ταυτόχρονα μαζί με την μη κρίσιμη κίνηση δεδομένων χωρίς αρνητικές αμοιβαίες επιπτώσεις.

Το υπάρχον Ethernet πρέπει να προσαρμοστεί προκειμένου να ικανοποιήσει αυτές τις απαιτήσεις. Ως εκ τούτου, καθορίζονται και βελτιώνονται επί του παρόντος υποπρότυπα που προορίζονται να επιτρέψουν τη σύγκλιση κρίσιμης και μη κρίσιμης κίνησης δεδομένων μέσω κοινής υποδομής Ethernet.

Τα πλεονεκτήματα του TSN έναντι του παραδοσιακού Ethernet περιλαμβάνουν:

- Εγγυημένοι χρόνοι καθυστέρησης κρίσιμων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε όλο το δίκτυο.
- Η κρίσιμη και μη κρίσιμη κίνηση δεδομένων μπορεί να μεταδοθεί μέσω ενός συγκλίνοντος δικτύου.
- Τα επίπεδα πρωτοκόλλου υψηλότερου επιπέδου μπορούν να μοιράζονται μια κοινή υποδομή δικτύου.
- Ο έλεγχος σε πραγματικό χρόνο μπορεί επίσης να εφαρμοστεί εκτός της περιοχής OT.
- Χωρίς εξάρτηση από τους προμηθευτές.

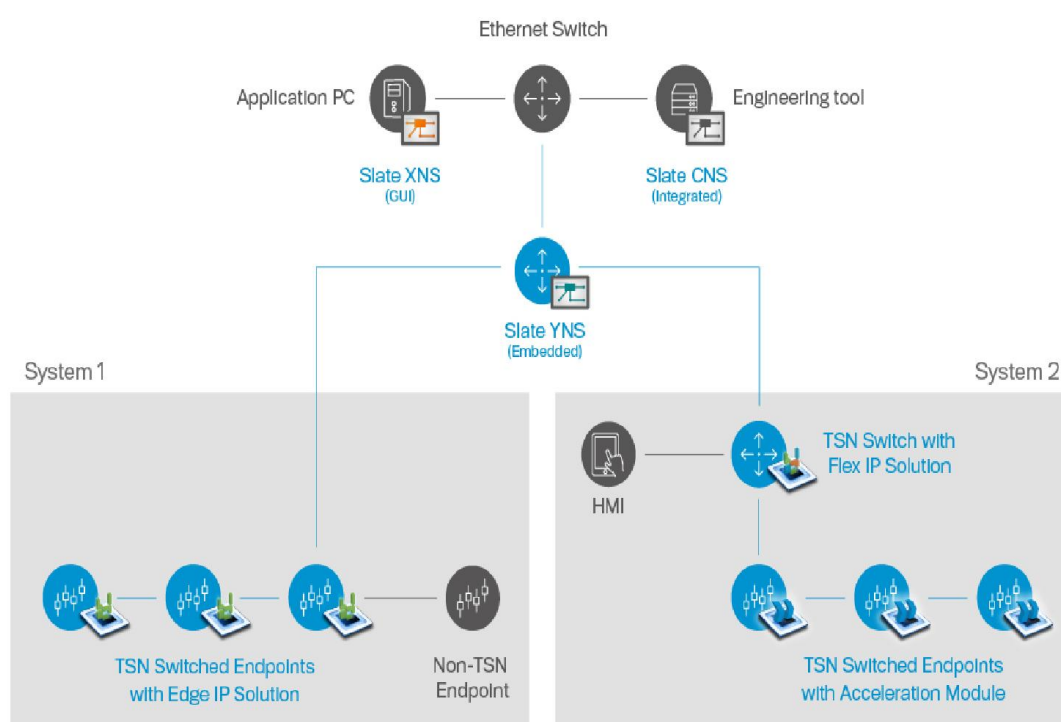
4.5 Used cases

Το TSN επιτρέπει εφαρμογές κρίσιμες για το χρόνο σε πολλούς τομείς, όπως βιομηχανικός αυτοματισμός, δίκτυα αυτοκινήτων, δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, βοηθητικό πρόγραμμα παροχής ενέργειας, γεφύρωση ήχου βίντεο.

Το προφίλ δικτύωσης TSN για βιομηχανικό αυτοματισμό που αναφέρεται ως IEC/IEEE 60802 με πιο πρόσφατη έκδοση την 3GPP 16, καθορίζει την εφαρμογή του TSN για βιομηχανικούς αυτοματισμούς και δίνει επίσης οδηγίες για το τι χρειάζεται να υποστηρίξει το 5G.

Επίσης είναι προφανές ότι δεν απαιτείται μόνο εξελιγμένο και αξιόπιστο λογισμικό και υλικό με δυνατότητα TSN, αλλά και καλή κατανόηση και εμπειρία στο σχεδιασμό και την υλοποίηση λύσεων δικτύωσης.

Οι λύσεις συσκευών TSN βρίσκονται στους διακόπτες και στα τελικά σημεία κατά μήκος κρίσιμων διαδρομών δικτύου. Τα προϊόντα λογισμικού συσκευής TSN μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στα ίδια στοιχεία δικτύου. Το λογισμικό δικτύου TSN χρησιμοποιείται για τον προγραμματισμό και τη διαμόρφωση του δικτύου. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με GUI σε τυπικό Η/Υ, ενσωματωμένο σε υπάρχοντα εργαλεία μηχανικής ή ενσωματωμένο σε στοιχείο δικτύου.



Εικόνα 4.4: Παράδειγμα εφαρμογής TSN . Πηγή <https://www.tttechindustrial.com/products/slate/>

Το TSN έχει συγκεντρώσει μεγάλη προσοχή στους κύκλους βιομηχανικού αυτοματισμού λόγω της αύξησης του ενδιαφέροντος γύρω από το Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων Industrial Internet of Things (IIoT). Αν και πολλά από τα δεδομένα που συλλέγονται από βιομηχανικούς αισθητήρες και συστήματα ελέγχου σε μια εφαρμογή IIoT δεν είναι χρονικά ευαίσθητα, θα υπάρχουν επίσης πολλά κρίσιμα για την αποστολή δεδομένα, ευαίσθητα στο χρόνο δεδομένα που πρέπει να μεταφέρονται και να μοιράζονται εντός αυστηρών ορίων καθυστέρησης και με αξιοπιστία.

Εκεί έρχεται το TSN για να διασφαλιστεί ότι αυτά τα κρίσιμα για την αποστολή, ευαίσθητα στο χρόνο δεδομένα δεν θα διατηρηθούν στο δίκτυο, το οποίο θα συνωστίζεται όλο και περισσότερο με δεδομένα ΙοΤ.

Με το TSN να διαδραματίζει μεγαλύτερο ρόλο στη βιομηχανική δικτύωση, επισημαίνονται τέσσερα βασικά οφέλη του TSN για τη βιομηχανία:

Εύρος ζώνης: Μεγάλα σύνολα δεδομένων από όραση μηχανής, τρισδιάστατη σάρωση και ανάλυση ισχύος μπορούν να επιβαρύνουν το εύρος ζώνης του δικτύου. Τα ιδιόκτητα παράγωγα Ethernet που χρησιμοποιούνται συνήθως για βιομηχανικό έλεγχο σήμερα περιορίζονται σε 100 Mb εύρους ζώνης και ημι-διπλής επικοινωνίας. Το TSN θα υποστηρίζει τυπικό Ethernet πλήρους διπλής όψης με υψηλότερες επιλογές εύρους ζώνης, όπως 1 Gb, 10 Gb, ακόμη και την έκδοση 400 Gb στο IEEE 802.3.

Ασφάλεια: Το TSN ενσωματώνει κορυφαίες διατάξεις ασφάλειας πληροφορικής. Ο κατακερματισμός, η προστασία απόδοσης και η χρονική συνθεσιμότητα μπορούν να προσθέσουν πολλαπλά επίπεδα άμυνας στο πλαίσιο ασφαλείας.

Διαλειτουργικότητα: Χρησιμοποιώντας τυπικά στοιχεία Ethernet, το TSN μπορεί να ενσωματωθεί με τις υπάρχουσες εφαρμογές. Επιπλέον, το TSN κληρονομεί πολλές δυνατότητες του υπάρχοντος Ethernet, όπως διεπαφές HTTP (HyperText Transfer Protocol) και υπηρεσίες διαδικτύου, οι οποίες επιτρέπουν τη δυνατότητα απομακρυσμένης διάγνωσης, απεικόνισης και επισκευής που είναι κοινή στα συστήματα ΙοΤ.

Καθυστέρηση και συγχρονισμός: Το TSN δίνει προτεραιότητα στην επικοινωνία χαμηλής καθυστέρησης που απαιτείται για γρήγορη απόκριση συστήματος και εφαρμογές ελέγχου κλειστού βρόχου. Μπορεί να επιτύχει ντετερμινιστικούς χρόνους μεταφοράς με σειρά δεκάδων μικροδευτερολέπτων και συγχρονισμό χρόνου μεταξύ κόμβων έως δεκάδες νανοδευτερόλεπτα. Για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη παράδοση αυτής της κρίσιμης διάρκειας κυκλοφορίας, το TSN παρέχει αυτοματοποιημένες διαμορφώσεις για διαδρομές δεδομένων υψηλής αξιοπιστίας, όπου τα πακέτα αντιγράφονται και συγχωνεύονται για να παρέχουν πλεονασμό διαδρομής χωρίς απώλειες.

Με δεδομένο το γεγονός ότι το TSN είναι ικανό να παρέχει αυτά τα οφέλη η παρεμβολή δικτύου σε κρίσιμα δεδομένα αποστολής αποφεύγεται με τη χρήση του συγχρονισμού χρόνου, του προγραμματισμού και της διαμόρφωσης της κίνησης με επίγνωση του χρόνου. Η διαμόρφωση της κίνησης θα χρησιμοποιήσει το πρόγραμμα για τον έλεγχο της λογικής ρύθμισης των διακοπών (δικτύου).

Η κυκλοφορία που δεν είναι TSN αποκλείεται, κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων χρονικών παραθύρων για να διασφαλιστεί ότι η θύρα εξόδου είναι έτοιμη όταν αναμένεται η κυκλοφορία ευαίσθητη στο χρόνο. Ο συγχρονισμός χρόνου για τον έλεγχο του χρονοδιαγράμματος και της διαμόρφωσης της κυκλοφορίας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας το IEEE 802.1AS, ουσιαστικά ένα προφίλ του προτύπου IEEE 1588v2.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ 5G ΜΕ TIME SENSITIVE NETWORK

5.1 Περιγραφή

Ένα νέο κύμα Βιομηχανικής Επανάστασης (Βιομηχανία 4.0) βρίσκεται σε εξέλιξη, με μαζική επικοινωνία από μηχανή σε μηχανή στον πυρήνα της, παράλληλα με την τεχνολογία cloud, τα μεγάλα δεδομένα, τη Μηχανική Μάθηση και την Τεχνητή Νοημοσύνη. Το 5G και το Time-Sensitive Networking παίζουν βασικό ρόλο στα μελλοντικά δίκτυα επικοινωνίας Industry 4.0.

Οι ασύρματες επικοινωνίες πέμπτης γενιάς (5G) και το Time-Sensitive Networking (TSN) είναι βασικές τεχνολογίες για μελλοντικές βιομηχανικές επικοινωνίες: 5G για ασύρματη συνδεσιμότητα και TSN για ενσύρματη συνδεσιμότητα. Εκτός από το ενισχυμένο εύρος ζώνης κινητής τηλεφωνίας, το 5G υποστηρίζει επικοινωνία με πρωτοφανή αξιοπιστία και πολύ χαμηλή καθυστέρηση, καθώς και τεράστια συνδεσιμότητα IoT. Το TSN είναι μια συλλογή προτύπων Ethernet που εισήχθη από τον όμιλο IEEE 802.1, ορίζοντας μηχανισμούς για ντετερμινιστική επικοινωνία μέσω ενσύρματων συνδέσεων Ethernet που επιτρέπουν την εγγυημένη μεταφορά πακέτων με περιορισμένη καθυστέρηση, χαμηλή παραλλαγή καθυστέρησης πακέτων και εξαιρετικά χαμηλή απώλεια πακέτων.

Και οι δύο τεχνολογίες έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν συγκλίνουσα επικοινωνία για ένα ευρύ φάσμα υπηρεσιών σε μια κοινή υποδομή δικτύου. Μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη για τις περιπτώσεις χρήσης του Industry 4.0 επιτρέποντας τη συνεργασία TSN και 5G, π.χ. αυξημένη ευελιξία στην ανάπτυξη βιομηχανικού εξοπλισμού και δικτύων.

Το TSN (ευαίσθητο στο χρόνο δικτύωσης) είναι ένα σύνολο προτύπων IEEE για τη διασφάλιση χαμηλού λανθάνοντος χρόνου στα δίκτυα Ethernet. Το πρότυπο διασφαλίζει ότι ο λανθάνων χρόνος της λεγόμενης «ροής TSN» μεταξύ δύο συσκευών είναι πάντα κάτω από ένα ορισμένο όριο (π.χ. 1 ms). Προς το παρόν υποστηρίζεται από λίγους προμηθευτές IP (π.χ. Cisco), αλλά υποστηρίζεται ευρύτερα από πρότυπα επιχειρησιακής τεχνολογίας (OT) όπως το EtherCAT over TSN, το Profinet over TSN ή το OPC / UA (Open Platform Communications United Architecture) over TSN.

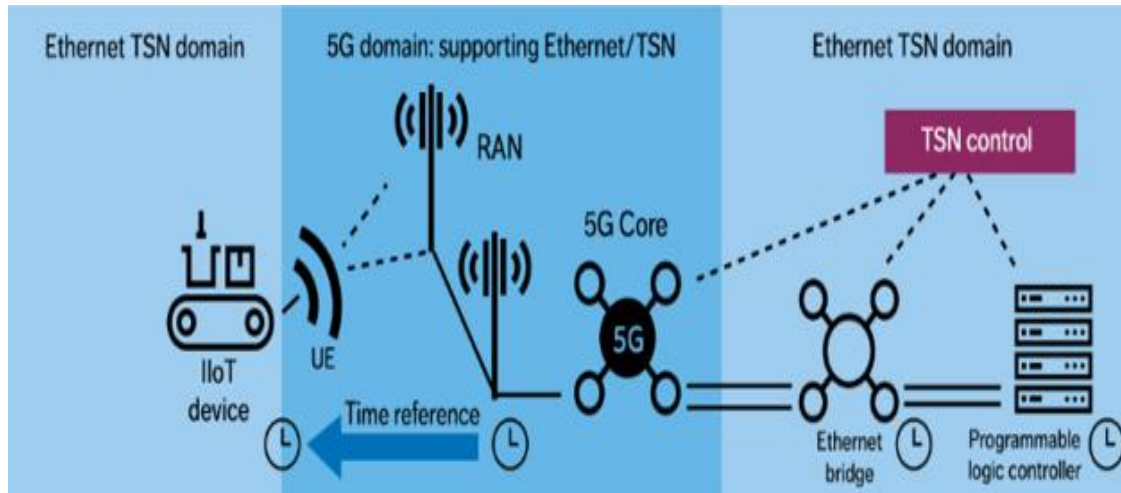
Το TSN εισάγει δύο κύριες νέες λειτουργίες:

- Μια νέα λειτουργικότητα επιπέδου ελέγχου: Στο νέο στοιχείο δικτύου ο κεντρικός ελεγκτής δικτύου Central Network Controller (CNC) προγραμματίζει ροές TSN και

διανέμει τις διαμορφώσεις που προκύπτουν στο δίκτυο Ethernet. Τα σχετικά API (Application Programming Interface) είναι ειδικά για προμηθευτές.

- Μια νέα λειτουργικότητα διαχείρισης: Η κεντρική ρύθμιση παραμέτρων χρήστη Centralized User Configuration (CUC) παρέχει μια κονσόλα διαχείρισης για τους διαχειριστές για τη διαμόρφωση των απαιτήσεων ροής TSN.

Το πρότυπο απαιτεί μια κοινή αίσθηση χρόνου σε όλους τους συμμετέχοντες, η οποία εξασφαλίζεται από το Precision Time Protocol (PTP).



Εικόνα 5.1: Αναπαράσταση συνεργασίας 5G με TSN. Πηγή <https://techradar.softwareag.com/technology/5g-tsn/>

Το 5G TSN επεκτείνει το ενσύρματο δίκτυο TSN στο δίκτυο 5G. Αυτό καθιστά δυνατή τη σύνδεση συσκευών (π.χ. αισθητήρες, ενεργοποιητές, μηχανήματα) χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας για τον έλεγχο συσκευών όπως PLC (Προγραμματιζόμενος ελεγκτής λογικής- Programmable Logic Controller). (Εικόνα 5.1)

Το 5G TSN έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει την καλωδίωση δαπέδου εργοστασίου με ασύρματο δίκτυο. Ωστόσο, πέρα από την ήδη πολύπλοκη τεχνολογία TSN, το 5G TSN προσθέτει ένα άλλο επίπεδο πολυπλοκότητας. Απομένει να δούμε αν πολυπλοκότητα που προκύπτει μπορεί να αντιμετωπιστεί σε ένα εργοστάσιο. Για παράδειγμα, σήμερα τα στοιχεία δικτύου TSN Central Network Controller (CNC) και Centralized User Configuration (CUC) είναι ειδικά για προμηθευτές. Το 5G TSN θα ήταν πάντα ένα περιβάλλον πολλαπλών προμηθευτών και κατά συνέπεια απαιτούνται πρόσθετα πρότυπα.

Στο μέλλον, η λειτουργικότητα τύπου PLC θα μπορούσε να μεταφερθεί σε κοντινά κέντρα δεδομένων τύπου cloud, συμπεριλαμβανομένου του 5G Edge.

Ωστόσο, η ανάπτυξη TSN στο πάτωμα του καταστήματος δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, η υπερβολική παροχή ενδέχεται να είναι φθηνότερη και λιγότερο περίπλοκη. Τα τυπικά στοιχεία TSN όπως ένα πρωτόκολλο συγχρονισμού χρόνου (PTP ως αντικατάσταση NTP) θα μπορούσαν να είναι σχετικά για πλατφόρμες IoT ανεξάρτητα από το TSN.

5.2 Ενσωμάτωση & Αξιοπιστία

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τον τρόπο ενσωμάτωσης του 5G και του TSN και ειδικότερα πώς λειτουργεί το Πρωτόκολλο Γενικευμένου Χρόνου Ακριβείας (gPTP ή 802.1AS) (generic Precision Time Protocol) σε ένα σύστημα TSN μέσω 5G.

Απρόσκοπτη ενσωμάτωση μεταξύ συστημάτων 5G και TSN

Για την απρόσκοπτη ολοκλήρωση μεταξύ ενός συστήματος 5G (5GS) και ενός συστήματος TSN, προτάθηκε από το 3GPP (3rd Generation Partnership Project) τα δύο συστήματα να λειτουργούν με διαφανή τρόπο για να ελαχιστοποιήσουν τον αντίκτυπο σε άλλες οντότητες TSN. Επομένως, το σύστημα 5G λειτουργεί ως μία ή περισσότερες εικονικές γέφυρες TSN του δικτύου TSN.

Αυτό το μοντέλο εικονικής γέφυρας ορίζει πολλές πύλες μεταξύ του TSN και του συστήματος 5G:

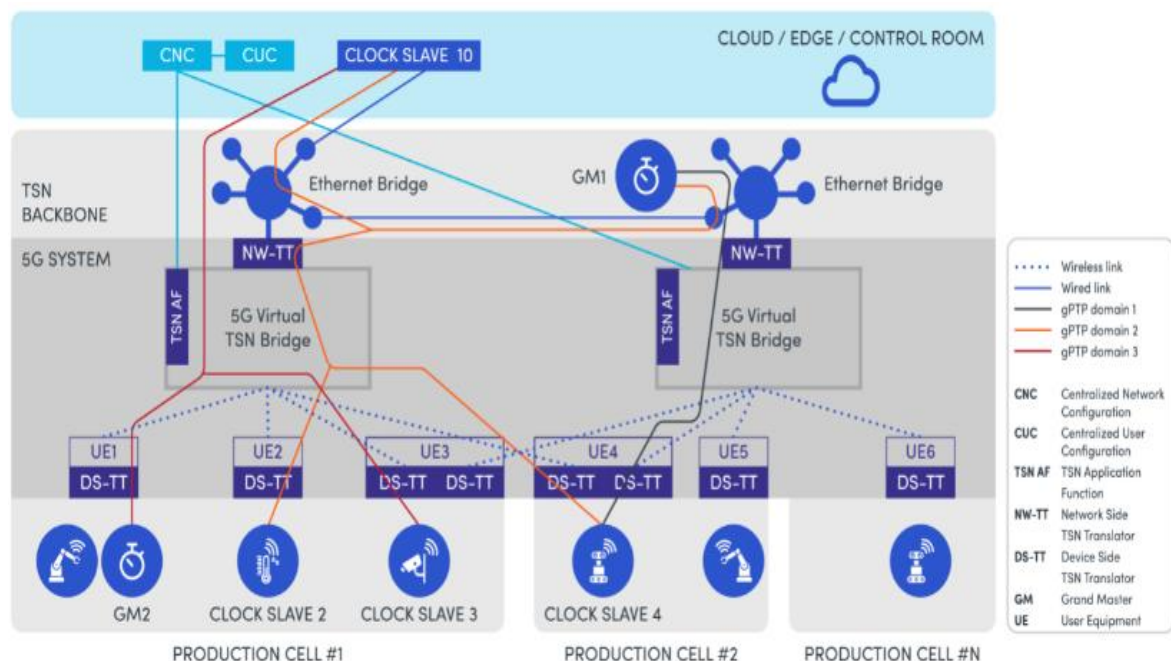
- Μια λειτουργία εφαρμογής TSN AF (Application Function) για τη σύνδεση των οντοτήτων TSN Centralized User Configuration (CUC) / Centralized Network Controller (CNC) και του επιπέδου ελέγχου 5G.
- Ένας μεταφραστής TSN DS-TT (Device-side TSN Translator) από την πλευρά της συσκευής στην πλευρά του εξοπλισμού χρήστη (UE -User Equipment).
- Ένας μεταφραστής TSN από την πλευρά του δικτύου NW-TT (Network-Side TSN Translator) στην πλευρά της λειτουργίας επιπέδου χρήστη UPF (User Plane Function).

Το Precision Time Protocol (PTP) είναι ένα πρωτόκολλο που χρησιμοποιείται για το συγχρονισμό των ρολογιών σε ένα δίκτυο επικοινωνίας, επιτυγχάνοντας ακρίβεια ρολογιού στο εύρος κάτω των μικροδευτερολέπτων, καθιστώντας την ιδανική επιλογή για βιομηχανικές εφαρμογές όπου πρέπει να πληρούνται αυστηρές απαιτήσεις συγχρονισμού .

Ένα σύστημα PTP σχηματίζεται από μια πηγή ακριβές ρολογιού, το grandmaster (GM), που μεταδίδει πληροφορίες συγχρονισμού μέσω ενός δέντρου συγχρονισμού προς πολλαπλούς στόχους ρολογιού (συσκευές υποτελών).

Ένα σύστημα 5G βασίζεται ήδη στο PTP για να λειτουργήσει, αλλά αυτό είναι διαφορετική περίπτωση χρήσης. Στην περίπτωση ενός έξυπνου κατασκευαστικού περιβάλλοντος, μας ενδιαφέρει πώς ένα σύστημα 5G μπορεί να μεταφέρει με ασφάλεια και αξιοπιστία τα μηνύματα PTP μεταξύ διαφορετικών συσκευών PTP, που βρίσκονται είτε στην πλευρά του σταθερού δικτύου είτε στην πλευρά του κινητού.

Αυτές οι συσκευές PTP μπορεί να είναι διαφορετικοί αισθητήρες, κάμερες, βιομηχανικά ρομπότ, αυτοματοποιημένα καθοδηγούμενα οχήματα AGV (Automated Guided Vehicle), οθόνες με κεφαλή για εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας Augmented Reality (AR) ή οποιαδήποτε άλλη βιομηχανική συσκευή που απαιτεί ακριβή συγχρονισμό για να λειτουργήσει σωστά. (Εικόνα 5.2)



Εικόνα 5.2: Λειτουργία παραγωγικής διαδικασίας με 5G και TSN. Πηγή <https://www.spirent.com/blogs/testing-time-sensitive-networking-over-5g-time-synchronization>

Στην έκδοση 3GPP 16, το GM ή η πηγή ώρας μπορούν να βρίσκονται μόνο στην πλευρά του δικτύου (σταθερή πλευρά). Το δευτερεύον ρολόι ή ο στόχος ώρας μπορούν να βρίσκονται στην σταθερή πλευρά ή στην κινητή πλευρά (UE) του δικτύου.

Η έκδοση 3GPP 17 θα εισάγει τη δυνατότητα να βρίσκεται το grandmaster GM επίσης στην κινητή πλευρά του δικτύου. Αυτό θα δημιουργήσει αρκετές προκλήσεις, αφού

όταν το GM και το slave βρίσκονται στο τμήμα του κινητού, τα μηνύματα PTP θα πρέπει να διασχίζουν δύο ασύρματους συνδέσμους.

Το TSN χρησιμοποιεί ένα συγκεκριμένο προφίλ PTP, το Πρωτόκολλο Γενικευμένης Χρονικής Ακρίβειας (gPTP ή 802.1AS). Μια νέα έκδοση του προτύπου 802.1AS κυκλοφόρησε το 2020, εισάγοντας αρκετές βελτιώσεις σε σχέση με την αρχική έκδοση του 2011, με στόχο κυρίως την αυξημένη αξιοπιστία. Δύο από τις κύριες βελτιώσεις είναι η δυνατότητα χρήσης πολλαπλών χρονικών τομέων και η δυνατότητα χρήσης περιττών δέντρων συγχρονισμού. Το προφίλ δικτύωσης ευαίσθητο στο χρόνο για βιομηχανικό αυτοματισμό (IEC/IEEE 60802) χρησιμοποιεί τέσσερις διαφορετικούς χρονικούς τομείς, δύο για το ρολόι εργασίας και δύο για τον παγκόσμιο χρόνο.

Τέσσερα βήματα για τη διασφάλιση υψηλής αξιοπιστίας για βιομηχανικά περιβάλλοντα

Ένα σύστημα 5G μπορεί να υποστηρίξει έως και 128 χρονικούς τομείς. Μια συσκευή UE (User Equipment) ή μια συσκευή PTP (Precision Timing Protocol) σε ένα σύστημα 5G μπορεί να συνδεθεί ταυτόχρονα σε δύο ή περισσότερες εικονικές γέφυρες TSN. Αυτό σημαίνει ότι το UE4 μπορεί να είναι μέρος δύο διαφορετικών δέντρων συγχρονισμού (τομέας gPTP 1 και τομέας gPTP 2). Εάν χαθεί η σύνδεση σε μία από τις εικονικές γέφυρες TSN, μπορεί να λάβει πληροφορίες χρόνου από την άλλη γέφυρα TSN.

1. Το πρώτο βήμα για να ελεγχθεί πόσο καλά λειτουργεί το TSN σε ένα σύστημα 5G είναι να συγκρίνετε την απόδοση και την ακρίβεια του συγχρονισμού χρόνου μέσω ενός ενσύρματου συνδέσμου με έναν ασύρματο σύνδεσμο.

Για παράδειγμα, η ακρίβεια χρόνου στο Time Slave 10 και στο Time Slave 4 (UE4) μπορεί να συγκριθεί. Αναμένεται να επιτευχθεί καλύτερη απόδοση μέσω της ενσύρματης διαδρομής, αλλά το ερώτημα είναι εάν η απόδοση μέσω της ασύρματης διαδρομής παραμένει εντός των επιθυμητών ορίων.

2. Η υψηλή αξιοπιστία είναι απαραίτητη σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Επομένως, το δεύτερο βήμα θα ήταν να διερευνήσουμε πόσο γρήγορα μια συσκευή μπορεί να ανακτήσει πληροφορίες χρόνου όταν μια διαδρομή από ένα δέντρο συγχρονισμού παραμένει εκτός σύνδεσης για λίγο.

3. Το τρίτο βήμα θα ήταν να αναλύσουμε πώς το φορτίο στην ασύρματη πλευρά του συστήματος επηρεάζει την ακρίβεια του συγχρονισμού ώρας. Το δίκτυο 5G θα

πρέπει να αντιμετωπίζει τα μηνύματα PTP με μεγάλη προτεραιότητα έναντι της άλλης επισκεψιμότητας που μοιράζεται το δίκτυο. Ένα άλλο πράγμα που πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι πώς η ακρίβεια συγχρονισμού ώρας επηρεάζεται από την κίνηση ή από την απόσταση μεταξύ του User Equipment και του σταθμού βάσης.

4. Τέλος, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον υπολογισμό του χρόνου παραμονής από το σύστημα 5G. Μια γέφυρα TSN καταγράφει το χρόνο που χρειάζεται για να περάσει ένα μήνυμα συγχρονισμού, από τη στιγμή που λαμβάνεται στη θύρα εισόδου έως τη στιγμή που προωθείται στη θύρα εξόδου. Αυτή η διαφορά ώρας ονομάζεται χρόνος παραμονής και πρέπει να προστεθεί σε ειδικό πεδίο μέσα στο μήνυμα συγχρονισμού (σε περίπτωση ρολογιού ενός βήματος) ή στο μήνυμα παρακολούθησης (σε περίπτωση ρολογιού δύο βημάτων).

Η ακρίβεια με την οποία το σύστημα 5G μετρά τον χρόνο παραμονής για τις εικονικές γέφυρες TSN έχει μεγάλο αντίκτυπο στη συνολική ακρίβεια του συγχρονισμού ώρας. Επομένως, η δοκιμή του πόσο καλά το δίκτυο 5G υπολογίζει τον χρόνο παραμονής πρέπει να αποτελεί μέρος οποιουδήποτε σχεδίου δοκιμής.

Ο ρόλος της δικτύωσης ευαίσθητης στο χρόνο στον βιομηχανικό αυτοματισμό

Τα συστήματα TSN μέσω 5G φέρνουν πολλά οφέλη στα βιομηχανικά δίκτυα επικοινωνίας, αλλά δεν έρχονται χωρίς προκλήσεις. Πρέπει να διεξαχθούν ολοκληρωμένες δοκιμές για να διασφαλιστεί ότι πληρούνται όλες οι απαιτήσεις, τόσο στο εργαστήριο όσο και σε ζωντανά δίκτυα.

Το gPTP είναι ένα θεμελιώδες δομικό στοιχείο για τα συστήματα TSN, αλλά πολλά άλλα πρωτόκολλα TSN παίζουν βασικό ρόλο στον βιομηχανικό αυτοματισμό και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίκτυο 5G. Τα πιο σημαντικά είναι:

- Time Aware Shaper (IEEE 802.1Qbv-2016).
- Αναπαραγωγή πλαισίου και εξάλειψη για αξιοπιστία (IEEE 802.1CB-2017).
- Φιλτράρισμα και έλεγχος ανά ροή (IEEE 802.1Qci-2017).

5.3 Αρχιτεκτονική

Όπως αναφέραμε η προδιαγραφή 3GPP 5G NR Release 16 επικεντρώνεται στην ενεργοποίηση των επικοινωνιών Industrial Internet of Things (IIoT). Η έκδοση 16 περιλαμβάνει βελτιώσεις καθυστέρησης και αξιοπιστίας που βασίζονται στην ήδη πολύ χαμηλή καθυστέρηση επαφής και την υψηλή αξιοπιστία που παρέχεται από την

έκδοση 15. Η προσέγγιση της έκδοσης 16 είναι η ενσωμάτωση του TSN στην κορυφή. Οι πληροφορίες τομέα TSN διανέμονται μεταξύ των λειτουργιών μεταφραστή TSN στο δίκτυο και της συσκευής χρησιμοποιώντας το πρότυπο πρωτόκολλο 802.1AS. Περισσότερη εργασία αναμένεται να συμβεί στην έκδοση 3GPP 17.

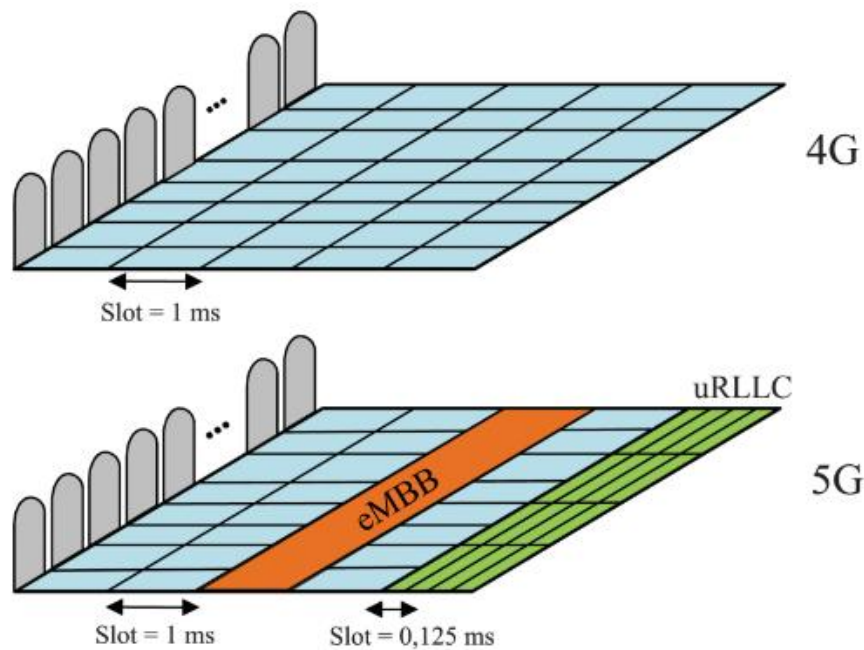
Η προδιαγραφή 5G περιλαμβάνει διάφορες λειτουργίες, ειδικά γύρω από το 5G New Radio (NR) που μπορούν να αντιστοιχιστούν στις απαιτήσεις του TSN:

1. Η χαμηλή καθυστέρηση στο 5G NR (New Radio) ενεργοποιείται με μικρότερες θέσεις σε ένα υποπλαίσιο ραδιοφώνου, το οποίο ωφελεί εφαρμογές χαμηλής καθυστέρησης. Το NR εισάγει επίσης μίνι υποδοχές, όπου οι εκπομπές με προτεραιότητα μπορούν να ξεκινήσουν χωρίς να περιμένουν όρια υποδοχής, μειώνοντας περαιτέρω την καθυστέρηση.
2. Η διαχείριση πόρων στο 5G NR εισάγει την προαγορά όπου η μετάδοση δεδομένων URLLC μπορεί να προλάβει τις τρέχουσες μεταδόσεις εκτός URLLC. Επιπλέον, το NR εφαρμόζει πολύ γρήγορη επεξεργασία, επιτρέποντας αναμετάδοση ακόμη και σε σύντομα όρια καθυστέρησης.
3. Η αξιοπιστία στο 5G ορίζει εξαιρετικά ισχυρούς τρόπους μετάδοσης για αυξημένη αξιοπιστία τόσο για ραδιοφωνικά κανάλια δεδομένων όσο και για έλεγχο. Η αξιοπιστία βελτιώνεται περαιτέρω με διάφορες τεχνικές, όπως η μετάδοση πολλαπλών κεραιών, η χρήση πολλαπλών φορέων και η αντιγραφή πακέτων σε ανεξάρτητες ραδιοφωνικές συνδέσεις.

Ο συγχρονισμός είναι ενσωματωμένος στα ραδιοσυστήματα 5G καθώς τα ίδια τα στοιχεία του ραδιοδικτύου συγχρονίζονται επίσης με το χρόνο, για παράδειγμα, μέσω του προφίλ τηλεπικοινωνιών πρωτοκόλλου ώρας ακριβείας. Αυτή είναι μια καλή βάση για την παροχή συγχρονισμού για εφαρμογές κρίσιμες για το χρόνο.

Ευέλικτη δομή πλαισίου 5G

Το 5G NR ορίζει πολλαπλές αριθμολογίες για την υποστήριξη των βελτιωμένων κινητών ευρυζωνικών συνδέσεων (eMBB), των επικοινωνιών τύπου Massive Machine (mMTC) και των εξαιρετικά αξιόπιστων επικοινωνιών χαμηλής καθυστέρησης (uRLLC) με διαφορετικές απαιτήσεις QoS. Στο 4G (ή LTE - Long Term Evolution) καθορίζει μια σταθερή διάρκεια υποδοχής. Από την άλλη πλευρά, το 5G NR καθορίζει διαφορετικές χρονικές περιόδους υποδοχής και μπορεί ταυτόχρονα να υποστηρίξει διαφορετικές αριθμολογίες για να εξυπηρετήσει μια ποικιλία εφαρμογών. (Εικόνα 5.3)

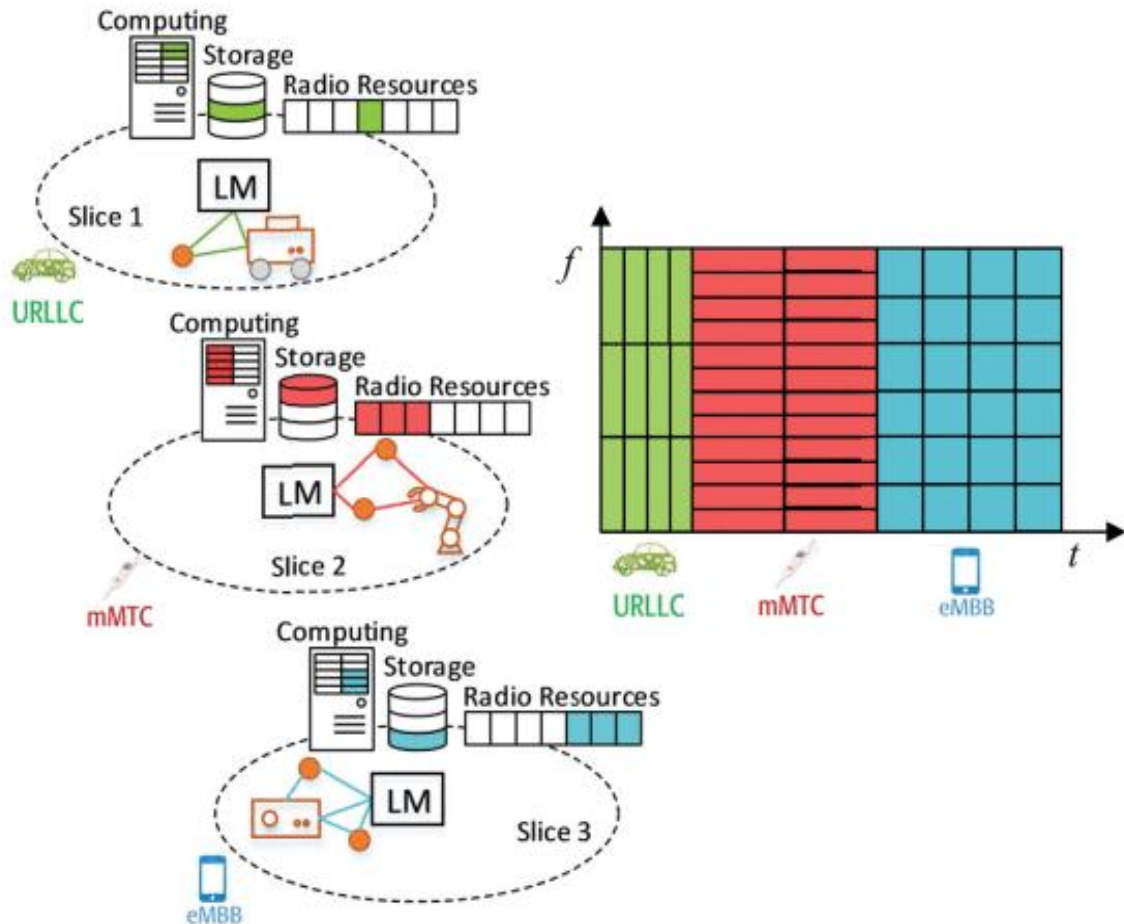


Εικόνα 5.3 Ευέλικτη χρήση ραδιοφωνικών πόρων σε 5G NR. Πηγή <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8853247>

5G και τεμαχισμός δικτύου

Ο τεμαχισμός δικτύου 5G μπορεί να υποστηρίξει πολλαπλές εφαρμογές με διαφορετικές απαιτήσεις QoS χάρη στην ευελιξία που εισάγεται στο 5G NR και το 5G Virtualized Core Network. Οι φέτες μοιράζονται υπολογιστές, αποθήκευση και πόρους στο RAN (Radio Access Network), αλλά διαμορφώνουν διαφορετικά τους ραδιοφωνικούς τους πόρους ώστε να υποστηρίξουν εφαρμογές eMBB, uRLLC και mMTC. Στην Εικόνα 5.4 :

- Η Φέτα 1 έχει διαμορφωθεί με μικρότερη χρονική διάρκεια για εφαρμογές uRLLC για βιομηχανικό IoT.
- Η Φέτα 2 χρησιμοποιεί χαμηλή αριθμολογία για την υποστήριξη μεγάλου αριθμού συσκευών με χαμηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης και χωρίς αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης.
- Η Φέτα 3 έχει διαμορφωθεί για να υποστηρίξει εφαρμογές eMBB με μεγάλες απαιτήσεις εύρους ζώνης.



Εικόνα 5.4 Απεικόνιση του τεμαχισμού RAN. Πηγή <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8853247>

Συνοπτικά, οι εξαιρετικά αξιόπιστες επικοινωνίες χαμηλής καθυστέρησης λειτουργούν σε συνδυασμό με την κοπή δικτύου για την επίτευξη απαιτήσεων δικτύωσης ευαίσθητων στο χρόνο για βιομηχανικές εφαρμογές.

Συγχρονισμός χρόνου

Η ντετερμινιστική εκτέλεση του κύκλου παραγωγής απαιτεί έγκαιρο συντονισμό μεταξύ των συσκευών, ο οποίος είναι δυνατός μόνο εάν οι συσκευές και η επικοινωνία E2E (End-to-End) συγχρονιστούν σε μια κοινή χρονική αναφορά με διαφορά ώρας μικρότερη από 1 μικροδευτερόλεπτο.

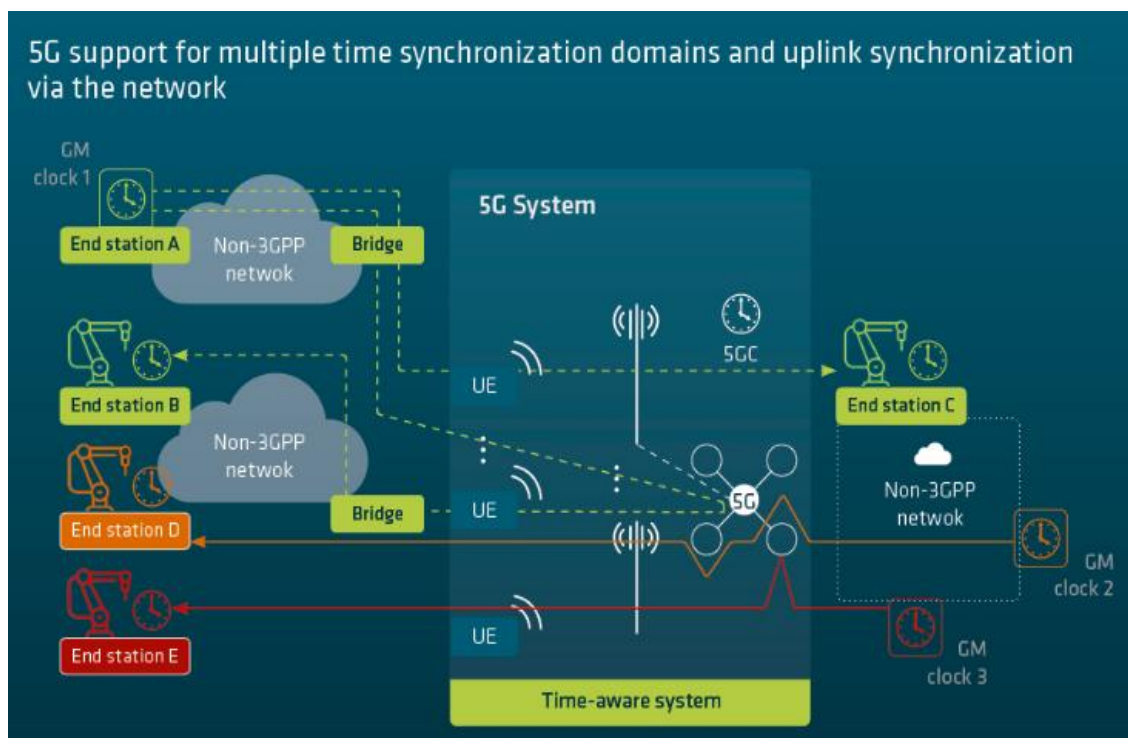
Ο συγχρονισμός χρόνου TSN βασίζεται στο γενικευμένο πρωτόκολλο χρόνου ακριβείας (gPTP) (802.1AS) ως προφίλ του προτύπου πρωτοκόλλου χρόνου ακριβείας (IEEE 1588).

Για αρκετό καιρό τα δίκτυα 5G θα συνυπάρχουν με τα παραδοσιακά δίκτυα και μπορεί να απαιτούν διαφανή ενσωμάτωση για τη μεταφορά βιομηχανικού Ethernet ή TSN. Σε τέτοια σενάρια, οι συνεργατικές ενέργειες συσκευών που ανήκουν σε διαφορετικούς

τομείς πρέπει να συντονίζονται εγκαίρως και τα συστήματα 5G θα πρέπει να συνεργάζονται με το gPTP του συνδεδεμένου δικτύου TSN, καθώς το gPTP είναι η προεπιλεγμένη λύση συγχρονισμού χρόνου για βιομηχανικούς αυτοματισμούς που βασίζονται σε TSN. Η αρχική ικανότητα για τέτοια γεφύρωση μεταξύ δικτύων 5G και TSN είναι μέρος της έκδοσης 16.

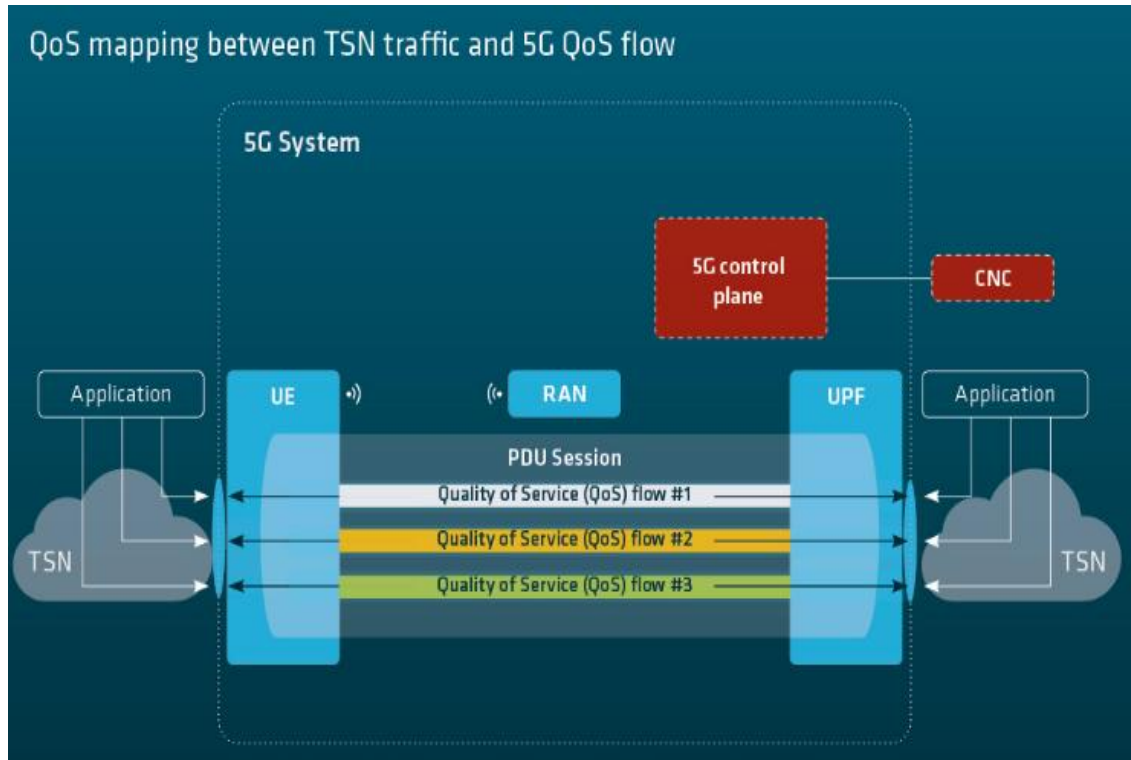
Στα δίκτυα 5G ο συγχρονισμός είναι ένα ουσιαστικό μέρος του 5G ραδιοσυστήματος. Τα εξαρτήματα του ραδιοδικτύου συγχρονίζονται από μόνα τους για προηγμένη ραδιοφωνική μετάδοση, όπως η λειτουργία συγχρονισμένης διπλής όψης χρονικής διαίρεσης TDD (Time Division Duplex), η συντονισμένη μετάδοση πολλαπλών σημείων CoMP (Coordinated Multi Point) και η συγκέντρωση φορέα. Υπάρχουν δύο ανεξάρτητες διαδικασίες συγχρονισμού που εκτελούνται παράλληλα σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα 5G-TSN: μια διαδικασία συγχρονισμού συστήματος 5G και μια διαδικασία συγχρονισμού TSN.

Το 5G λειτουργεί ως συμβατό με IEEE 802.1AS σύστημα ενημέρωσης χρόνου για υποστήριξη συγχρονισμού χρόνου TSN. Ένα 5GS μπορεί να υποστηρίξει συγχρονισμό έως και 128 ξεχωριστών χρονικών τομέων gPTP ταυτόχρονα. (Εικόνα 5.5)



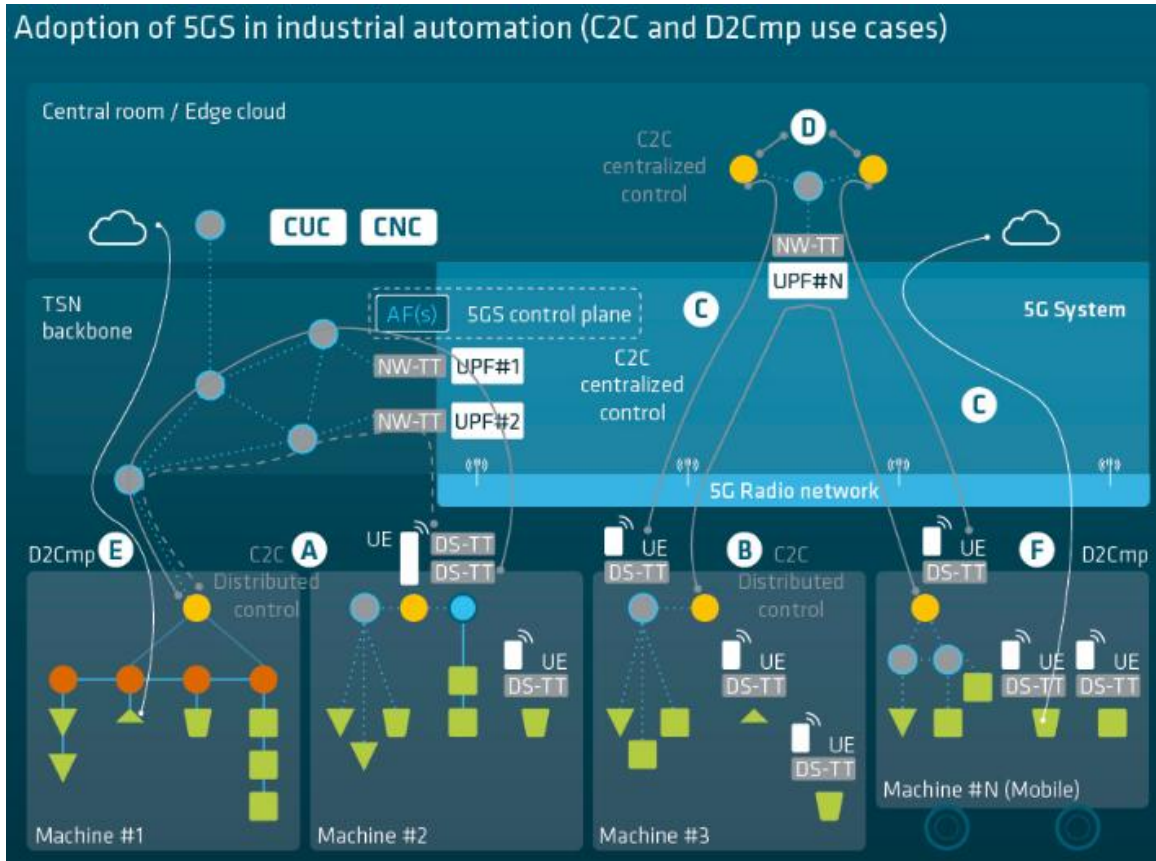
Εικόνα 5.5: Υποστήριξη 5G – TSN για συγχρονισμό χρόνου. Πηγή <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>

Ένα 5G System μπορεί να λάβει πληροφορίες QoS κίνησης TSN από το CNC μέσω της τυποποιημένης διεπαφής στο IEEE 802.1Q, και στη συνέχεια να χαρτογραφήσει την κυκλοφορία TSN στη ροή QoS 5G σε μια αντίστοιχη περίοδο λειτουργίας PDU, μαζί με την κατάλληλη διαμόρφωση QoS. (Εικόνα 5.6)



Εικόνα 5.6: Αλληλεπίδραση 5G – TSN για την διαχείριση της βιομηχανικής επικοινωνίας. Πηγή <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>

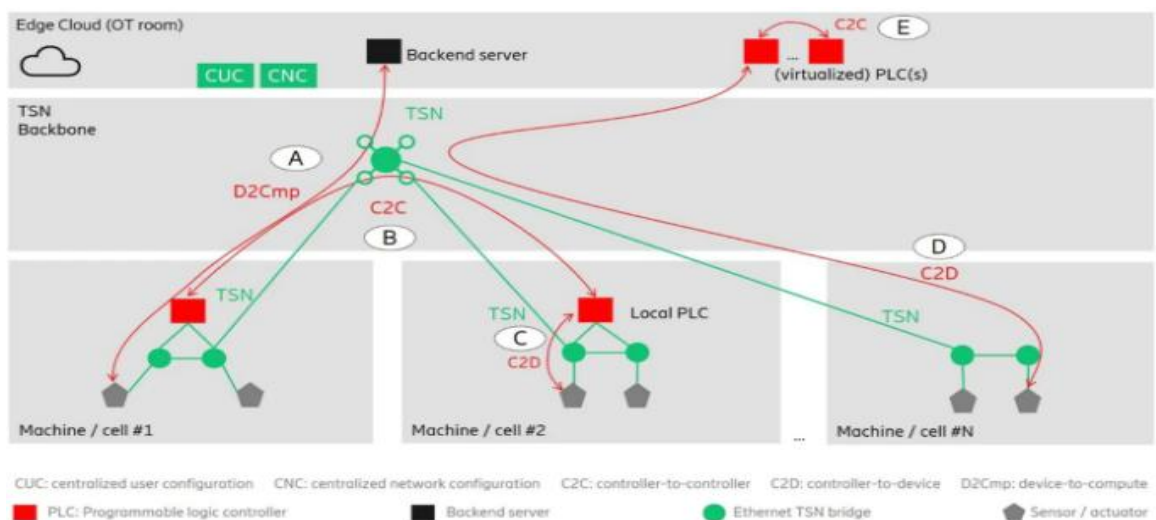
Η Εικόνα 5.7 δείχνει ένα παράδειγμα του τρόπου ενσωμάτωσης του συστήματος 5G με το TSN σε ένα εργοστάσιο, όπου το 5G παρέχει υπηρεσίες επικοινωνίας για διάφορες περιπτώσεις βιομηχανικής χρήσης (π.χ. ελεγκτής-ελεγκτής).



Εικόνα 5.7: Υιοθέτηση 5GS στον βιομηχανικό αυτοματισμό. Πηγή <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>

5.4 Ανάπτυξη 5G-TSN σε εργοστάσιο

Ένα βιομηχανικό δίκτυο στο μέλλον αποτελείται από τρία επίπεδα συνδεσιμότητας όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα



Εικόνα 5.8: Παράδειγμα εισαγωγής του TSN σε εργοστάσιο. Πηγή <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/2/how-5g-integrates-tsn-systems>

Το επιχειρησιακό τεχνολογικό κέντρο OT (Operational Technology room) φιλοξενεί κεντρικές λειτουργίες ελέγχου και διαχείρισης, μπορεί επίσης να φιλοξενήσει το cloud edge της επιχείρησης (μια εξέλιξη του cloud computing που διανέμει πόρους υπολογισμού, αποθήκευσης και δικτύωσης εκτός του πυρήνα του δικτύου και πιο κοντά στον τελικό χρήστη). Σε τοπικό επίπεδο μηχανής/κελιού, βρίσκονται πολλές μηχανές και κελιά παραγωγής. Κάθε μηχανή/κελί είναι εξοπλισμένο με συσκευές πεδίου (αισθητήρες ή ενεργοποιητές, για παράδειγμα) και μπορεί να έχει έναν τοπικό PLC (Programmable Logic Controller). Ο δικτυακός κορμός του TSN παρέχει υπηρεσίες μεταφοράς για το κεντρικό επίπεδο διαχείρισης και το τοπικό επίπεδο μηχανών. Η υπηρεσία συνδεσιμότητας μπορεί να γίνει είτε μεταξύ πολλαπλών τοπικών μηχανών είτε μεταξύ του κεντρικού επιπέδου διαχείρισης και των τοπικών μηχανών.

Ένα μηχανήμα/ρομπότ είναι εξοπλισμένο με συσκευές πεδίου που ελέγχονται από ένα PLC. Η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ ενός PLC και συσκευών πεδίου φαίνεται στο σχήμα 1, όπου το ρεύμα C αντιπροσωπεύει την επικοινωνία Controller-to-Device (C2D), η οποία είναι απαραίτητη για εφαρμογές ελέγχου κίνησης ή κλειστού βρόχου. Όταν πολλαπλές μηχανές/ρομπότ εκτελούν συνεργατικές εργασίες, τα PLC διαφορετικών μηχανών πρέπει να συντονίζονται. Η επικοινωνία μεταξύ ελεγκτών ονομάζεται επικοινωνία ελεγκτή προς ελεγκτή C2C (Controller-to-Controller), η οποία αντιπροσωπεύεται από το ρεύμα B στο σχήμα 1. Οι επικοινωνίες C2D και C2C είναι εξαιρετικά κρίσιμες. Υπάρχουν επίσης άλλοι τύποι κίνησης, οι οποίοι δεν είναι ευαίσθητοι στο χρόνο και χρησιμοποιούνται, για παράδειγμα, για παρακολούθηση, συλλογή δεδομένων και ανάλυση. Αυτός ο τύπος επικοινωνίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8, ρεύμα A.

Σε περιβάλλον παραγωγής Industry 4.0 με συγκλίνουσα υποδομή δικτύου ενεργοποιημένη από το TSN, οι εφαρμογές ελέγχου δεν συνδέονται πλέον με το τμήμα τοπικού δικτύου σε επίπεδο πεδίου και μπορούν να βρίσκονται σχεδόν οπουδήποτε στο εργοστάσιο. Για παράδειγμα, η ροή D στο σχήμα 1 απεικονίζει ότι οι συσκευές επιπέδου πεδίου στο μηχανήμα/κελί #N ελέγχονται από ένα εικονικό PLC που βρίσκεται σε ένα edge cloud. Το PLC του μηχανήματος/κελιού #N μπορεί να επικοινωνήσει με άλλα εικονικά PLC μέσω του ρεύματος E, εφαρμόζοντας έτσι την επικοινωνία C2C εντός του cloud.

TSN: συγκλίνουσα βιομηχανική επικοινωνία βασισμένη στο Ethernet

Το TSN είναι ένα σύνολο προτύπων που καθορίζονται από το IEEE 802 για να επιτρέπουν στα δίκτυα Ethernet να παρέχουν εγγυήσεις QoS για ευαίσθητες στο χρόνο και κρίσιμες αποστολές και εφαρμογές. Το TSN είναι μια εργαλειοθήκη που περιλαμβάνει τέσσερις κατηγορίες εργαλείων: διαχείριση πόρων, διαμόρφωση κίνησης, αξιοπιστία και συγχρονισμός χρόνου.

Κάθε κατηγορία περιέχει πολλές επιλογές εργαλείων. Για παράδειγμα, τα βασικά στοιχεία διαχείρισης πόρων και τα μοντέλα διαμόρφωσης ορίζονται από το πρότυπο IEEE 802.1Qcc. Σε ένα πλήρως συγκεντρωτικό μοντέλο διαμόρφωσης, μια κεντρική διαμόρφωση δικτύου (CNC) μπορεί να εφαρμοστεί στις συσκευές δικτύου (γέφυρες) και η κεντρική διαμόρφωση χρήστη (CUC) μπορεί να εφαρμοστεί σε συσκευές χρήστη (τελικοί σταθμοί). Το TSN εγγυάται την ντετερμινιστική καθυστέρηση για κρίσιμα δεδομένα με διάφορες τεχνικές αναμονής και διαμόρφωσης κυκλοφορίας, όπως η προγραμματισμένη κυκλοφορία.

Η εξαιρετική αξιοπιστία παρέχεται από το Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER) (IEEE 802.1CB) όπου οι ροές δεδομένων μεταδίδονται με πολλαπλά αντίγραφα σε αποσυνδεδεμένες διαδρομές στο δίκτυο. Φιλτράρισμα και έλεγχος ανά ροή (IEEE 802.1Qci) βελτιώνει την αξιοπιστία προστατεύοντας από παραβίαση εύρους ζώνης, δυσλειτουργία και κακόβουλη συμπεριφορά. Το γενικευμένο πρωτόκολλο ακριβείας της ώρας (gPTP) (IEEE 802.1AS) είναι το εργαλείο TSN για συγχρονισμό χρόνου των γεφυρών δικτύου και των τελικών σταθμών.

Ένα βιομηχανικό δίκτυο επικοινωνίας που βασίζεται σε TSN είναι ένα δίκτυο σύγκλισης που επιτρέπει ένα μείγμα διαφόρων τύπων κίνησης. Οι απαιτήσεις εξυπηρέτησης κυμαίνονται από την κίνηση με την καλύτερη δυνατή προσπάθεια έως την κρίσιμη κίνηση σε πραγματικό χρόνο. Το TSN επιτρέπει τη σύγκλιση πολλών διαφορετικών υπηρεσιών που εκτελούνται σε ένα κοινό δίκτυο, ενώ εξακολουθούν να έχουν εργαλεία για να δώσουν προτεραιότητα σε κρίσιμες για το χρόνο υπηρεσίες και να τους παρέχουν ντετερμινιστική απόδοση επικοινωνίας, επιτρέποντας περιπτώσεις χρήσης C2C και C2D. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται παραδείγματα χρήσεων των χαρακτηριστικών TSN για τους διαφορετικούς τύπους κίνησης. (Πίνακας 5.1)

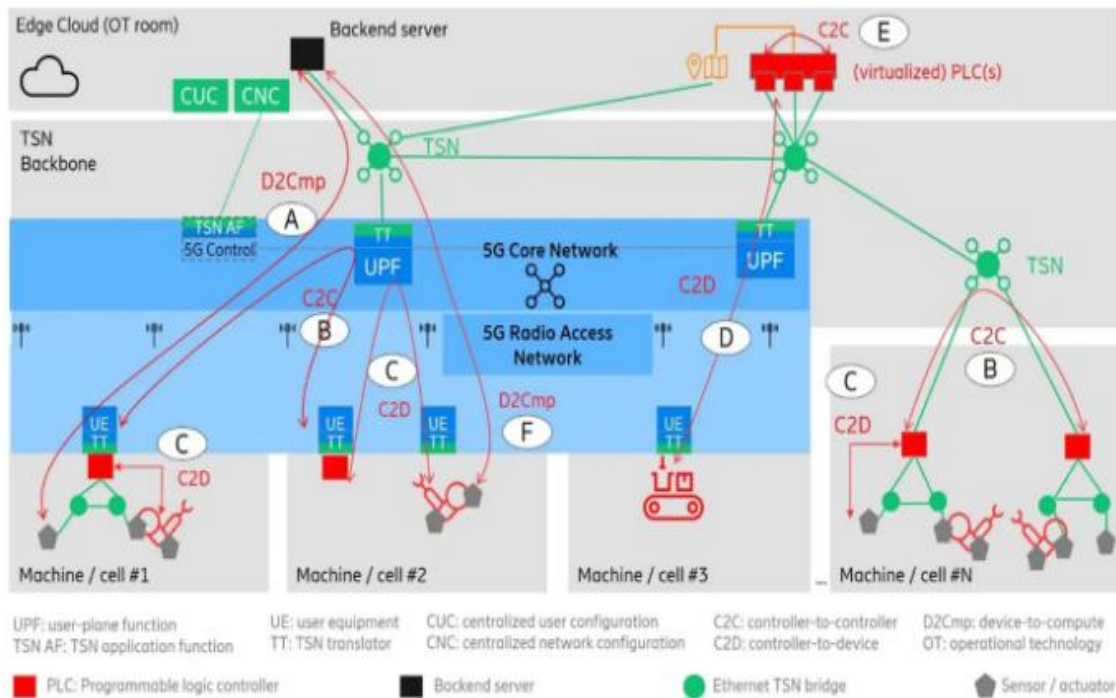
Traffic Types	Periodic /Sporadic	Typical Period	Data Delivery Guarantee	Tolerance to Jitter	Tolerance to Loss	Typical Data Size (Byte)	Criticality	Traffic priorities (VLAN PCP)	Strict priority IEEE 802.1Q	Redundancy IEEE 802.1CB	Time synchron IEEE 802.1AS	Scheduled traffic IEEE 802.1Qbv	Frame Preemption IEEE 802.1Qbu	PSFP IEEE 802.1Qci	TSN configuration IEEE 802.1Qcc
Isochronous	P	100 μ s ~ 2 ms	Deadline	0	None	Fixed: 30 ~ 100	High	6	M	O	Yes	M		M(T)	M
Cyclic -Synchronous	P	500 μ s ~ 1 ms	latency bound (τ)	$\leq \tau$	None	Fixed: 50 ~ 1000	High	5	M	O	Yes	M		M(T)	M
Cyclic -Asynchronous	P	2 ms ~ 20 ms	latency bound (τ)	$\leq \tau$	1 ~ 4 Frames	Fixed: 50 ~ 1000	High	5	M	O	No		R	M(R)	M
Events: control	S	10 ms ~ 50 ms	latency bound (τ)	n.a.	Yes	Variable: 100 ~ 200	High	4	M	O	No		O	M(R)	M
Events: alarm & operator commands	S	2 s	latency bound (τ)	n.a.	Yes	Variable: 100 ~ 1500	Medium	3	M	O	No		O	M(R)	M
Network Control	P	50 ms ~ 1 s	throughput	Yes	Yes	Variable: 50 ~ 500	High	7	M	O	No				
Configuration & Diagnostics	S	n.a.	throughput	n.a.	Yes	Variable: 500 ~ 1500	Medium	2	M				O	M(R)	M
Video	P	Frame Rate	throughput	n.a.	Yes	Variable: 1000 ~ 1500	Low	1	M	O	No		O	M(R)	M
Audio/Voice	P	Sample Rate	throughput	n.a.	Yes	Variable: 1000 ~ 1500	Low	1	M	O	No		O	M(R)	M
Best effort	S	n.a.	None	n.a.	Yes	Variable: 30 ~ 1500	Low	0	M				O		

Πίνακας 5.1: Τύποι επισκευμότητας βιομηχανικών αυτοματισμών, απαιτήσεις υπηρεσιών και συναφείς λειτουργίες TSN. Όροι: M: υποχρεωτικός, O: προαιρετικός, R: συνιστάται, (R): έλεγχος βάσει ποσοστών, (T): έλεγχος βάσει χρόνου. Πηγή <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/2/how-5g-integrates-tsn-systems>

Ανάπτυξη 5G-TSN σε εργοστάσιο

Με την τυποποιημένη υποστήριξη για TSN, ένα σύστημα 5G γίνεται αντιληπτό ως ένα σύνολο εικονικών γεφυρών Ethernet-TSN συμβατών με τα πρωτόκολλα IEEE όταν αναπτύσσεται σε εργοστάσιο. Το σύστημα 5G αποτελείται από κεντρικό δίκτυο 5G και δίκτυο πρόσβασης ραδιοφώνου. Η λειτουργία 5G User Plane Function (UPF) είναι μια πύλη προς το καλωδιακό δίκτυο και το δίκτυο πρόσβασης ραδιοφώνου εκτείνεται πάνω από το εργοστάσιο παραγωγής για να παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα στις φορητές συσκευές.

Η λειτουργία TSN Translator (TT) επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ 5G και του καλωδιακού δικτύου TSN. Στο επίπεδο ελέγχου, μια γέφυρα 5G παρέχει μια λειτουργία διαχείρισης (η λειτουργία 5G TSN AF) που αλληλεπιδρά με ένα CNC του δικτύου TSN.



Εικόνα 5.9: Υιοθέτηση 5G στον βιομηχανικό αυτοματισμό. Πηγή <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/2/how-5g-integrates-tsn-systems>

Το 5G μπορεί να υποστηρίξει διάφορες περιπτώσεις βιομηχανικής χρήσης όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα παρέχοντας υπηρεσίες επικοινωνίας στα τρία προηγουμένως περιγραφόμενα επίπεδα δικτύου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.9.

Μηχανή/κελί#1, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9, απεικονίζει ένα σενάριο ολοκλήρωσης 5G-TSN όπου εικονικές γέφυρες 5G χρησιμοποιούνται στο βιομηχανικό δικτυακό κορμό του TSN. Το μηχάνημα/ κελί #1 μπορεί να χρησιμοποιήσει εξοπλισμό χρήστη 5G (UE) αντί για καλώδιο για σύνδεση με τον δικτυακό κορμό. Το 5G διασυνδέει μηχανές/κελιά, ρεύμα B και παρέχει επικοινωνία C2C μέσω επικοινωνίας "UE-to-UE", δηλαδή επικοινωνία από ένα UE μέσω του δικτύου 5G πίσω σε άλλο UE. Μέσα στα τοπικά τμήματα μηχανών/κελιών, αισθητήρες/ενεργοποιητές ενδέχεται να συνδεθούν στο PLC μέσω ενός υπάρχοντος δικτύου καλωδίων (όπως απεικονίζεται στο ρεύμα C στην εικόνα 5.9). Τόσο τα πρωτόκολλα TSN όσο και τα πρωτόκολλα fieldbus (βιομηχανικού δικτύου για καταναμημένο έλεγχο σε πραγματικό χρόνο) παλαιού τύπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα στο μηχάνημα/κελί. Για το D2Cmp (device-to-compute Communications), η μη ευαίσθητη στο χρόνο ροή δεδομένων A στο σχήμα 2 μεταδίδεται πρώτα από συσκευές πεδίου στο 5G UE μέσω του καλωδιακού δικτύου στο εσωτερικό του μηχανήματος/κελί #1, και στη συνέχεια

παραδίδεται περαιτέρω σε έναν διακομιστή πίσω άκρου ή ένα cloud στο κέντρο τεχνολογίας (OT) της βιομηχανίας μέσω της ασύρματης συνδεσιμότητας 5G. Το UE που συνδέεται με το PLC μπορεί επίσης να επικοινωνήσει με άλλα PLC μέσω του δικτύου κορμού για να επιτευχθεί επικοινωνία C2C όπως φαίνεται από το ρεύμα B.

Το μηχάνημα/κελί #2 απεικονίζει ένα παράδειγμα ενσωμάτωσης όπου η γέφυρα 5G εκτείνεται από το δικτυακό κορμό στα τμήματα μηχανής/κελιού. Σε αυτήν την περίπτωση, το 5G παρέχει επίσης ασύρματη συνδεσιμότητα για τις συσκευές μέσα σε ένα τοπικό μηχάνημα/κελί. Για παράδειγμα, ένα PLC και μια συσκευή επιπέδου πεδίου είναι προσαρτημένα σε ξεχωριστά UE, επομένως η επικοινωνία C2D πραγματοποιείται μεταξύ ενός 5G UE μέσω του δικτύου 5G σε ένα άλλο 5G UE, όπως απεικονίζεται στο ρεύμα C στο σχήμα 2. Επιπλέον, το 5G εισάγει σημαντική ευελιξία κατά τη σύνδεση συλλεκτών δεδομένων και εξοπλισμού στο cloud για επικοινωνία D2Cmp. Αυτό φαίνεται στο ρεύμα F του TSN στο σχήμα 2. καθώς η συσκευή πεδίου είναι προσαρτημένη σε ένα UE, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν απευθείας στο cloud, το οποίο συνδέεται με το UPF του συστήματος 5G.

Λόγω της ευελιξίας του ασύρματου 5G, το μηχάνημα/κελί #3 μπορεί να είναι κινητό, για παράδειγμα AGV ή κινητό ρομπότ. Οι συσκευές του μηχανήματος #3 μπορούν να ελεγχθούν με ένα εικονικό PLC στο κέντρο τεχνολογίας (OT) της βιομηχανίας ή cloud, όπως φαίνεται από τη ροή D στην εικόνα 5.9. Το σύστημα 5G παρέχει ασύρματη συνδεσιμότητα και στα τρία επίπεδα δικτύου. Η επικοινωνία C2C μεταξύ εικονικών PLC σε κέντρο ελέγχου απεικονίζεται από το ρεύμα E στην εικόνα 5.9.

Μηχανή/κελί #N έχει μόνο σύνδεση μέσω καλωδίου. Δείχνει ένα παράδειγμα συνύπαρξης μεταξύ 5G και καλωδίου TSN στον ίδιο πάγκο του εργοστασίου. Σημαίνει, σε μια πιθανή εισαγωγή του 5G σε brownfield εργοστασίων (προβληματικούς χώρους που χρειάζονται την ανάπτυξη νέων συστημάτων λογισμικού με την άμεση παρουσία υπάρχοντων εφαρμογών / συστημάτων λογισμικού), τα υπάρχοντα μηχανήματα που συνδέονται μέσω καλωδίου στο βιομηχανικό δίκτυο κορμού δεν επηρεάζονται από το πρόσφατα εισαγόμενο 5G και μπορούν να επικοινωνούν με συνδεδεμένα μηχανήματα 5G μέσω του δικτύου κορμού.

Τυποποίηση

Το 3GPP έχει εκτελέσει σημαντικές εργασίες τυποποίησης για να επιτρέψει τη βιομηχανική επικοινωνία και υποστήριξη TSN που βασίζεται σε 5G: στην έκδοση 15, η επικοινωνία εξαιρετικά αξιόπιστης και χαμηλής καθυστέρησης (URLLC)

καθορίστηκε για το 5G. στην Έκδοση 16 προστέθηκε η υποστήριξη για TSN και συνεχίζονται περαιτέρω βελτιώσεις στην Έκδοση 17. Η εργασία τυποποίησης 5G για το IIoT περιλαμβάνει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εφαρμόζεται το TSN σε ένα έξυπνο εργοστασιακό περιβάλλον και οι δυνατότητες 5G έχουν καθοριστεί για ενσωμάτωση και αλληλεπίδραση με το δίκτυο TSN.

Ένα σύστημα 5G έχει καθοριστεί να εμφανίζεται προς ένα εξωτερικό δίκτυο TSN ως σύνολο εικονικών γεφυρών 5G με δυνατότητα TSN. Η λειτουργία βασικού δικτύου 5G TSN AF παρέχει αλληλεπίδραση με το CNC για την αναφορά των δυνατοτήτων γέφυρας 5G και τη λήψη διαμορφώσεων, όπως η προώθηση πλαισίων για τη γέφυρα του συστήματος 5G, καθώς και οι ειδικές διαμορφώσεις TSN για πράγματα όπως φιλτράρισμα και έλεγχος ανά ρεύμα (IEEE 802.1Qci) και προγραμματισμός χρόνου για κλάσεις κίνησης (IEEE 802.1Qbv).

Το σύστημα 5G διαθέτει ένα πλαίσιο QoS που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση κίνησης με διαφορετικά χαρακτηριστικά QoS και έχει προσδιοριστεί μια αντιστοίχιση στις διαμορφώσεις ροής TSN. Για παράδειγμα, η αυστηρή προτεραιότητα IEEE 802.1Q μπορεί να υποστηριχθεί, αντιστοιχίζοντας την προτεραιότητα 802.1Q (κωδικός προτεραιότητας σημείου) σε επίπεδο προτεραιότητας ενός συγκεκριμένου αναγνωριστικού QoS 5G. Το 5G εισάγει επίσης συγχρονισμό χρόνου μέσω του συστήματος 5G μέσω gPTP σύμφωνα με το IEEE 802.1AS. κάτι που επιτρέπει τον συγχρονισμό κόμβων δικτύου και τελικών συσκευών με ένα μεγάλο κύριο ρολόι μέσω 5G. Το σύστημα 5G που λειτουργεί ως σύστημα ενημερωμένο για το χρόνο μπορεί να μεταφέρει πληροφορίες χρονισμού του TSN σε μια βιομηχανική εφαρμογή οπουδήποτε στο εργοστάσιο. Μπορεί να υποστηρίξει συγχρονισμό έως και 128 ξεχωριστών χρονικών τομέων gPTP ταυτόχρονα.

5.5 Περιπτώσεις Δοκιμών - Κοινοπραξίες

Δοκιμές

- Ericsson και Audi

Η Ericsson και η Audi ενισχύουν τη συνεργασία τους 5G δοκιμάζοντας τις δυνατότητες URLLC για αυτοματοποίηση εργοστασίων στην εγκατάσταση P-Labs του κατασκευαστή αυτοκινήτων στη Γερμανία.²¹

- Nokia ABB και Kalmar

²¹ <https://www.ericsson.com/en/news/2020/2/5g-for-factory-automation>

Η Nokia, η ABB και η Kalmar διεξήγαγαν την πρώτη δοκιμή της βιομηχανίας με εξαιρετικά αξιόπιστη τεχνολογία 5G χαμηλού λανθάνοντος χρόνου για ηλεκτρικό δίκτυο και αυτοματισμό λιμανιού.²²

5G Βιομηχανικές Κοινοπραξίες

Πολλές κοινοπραξίες βιομηχανίας έχουν σχηματιστεί για να αξιοποιήσουν τις δυνατότητες 5G για βιομηχανικές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων:

- **5G Alliance for Connected Industry and Automation (5G-ACIA)**

Ο γενικός στόχος της 5G-ACIA είναι η εφαρμογή βιομηχανικών 5G με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Τα μέλη προσπαθούν από κοινού να διασφαλίσουν ότι τα συγκεκριμένα συμφέροντα του βιομηχανικού τομέα λαμβάνονται επαρκώς υπόψη στην τυποποίηση και τη ρύθμιση 5G. Μαζί, συζητούν και αξιολογούν τεχνικές, κανονιστικές και επιχειρηματικές πτυχές σε σχέση με το 5G για τον βιομηχανικό τομέα.

Στα έγγραφά του, το 5G-ACIA παρέχει μια επισκόπηση των βασικών δυνατοτήτων της 5G για τη μεταποιητική βιομηχανία και περιγράφει σχετικές περιπτώσεις χρήσης και απαιτήσεις. Μη ολοκληρωμένες, οι περιπτώσεις χρήσης παραδείγματος δείχνουν ότι οι απαιτήσεις QoS μπορεί να είναι πολύ διαφορετικές από τον έλεγχο της διαδικασίας με χρόνο κύκλου > 50ms και διαθεσιμότητα > 99,99% έως τον έλεγχο κίνησης απαιτώντας διαθεσιμότητα άνω των έξι από τα εννέα σημεία και ο χρόνος κύκλου μπορεί να είναι τόσο χαμηλά όσο <0,5 ms. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 5G πρέπει επίσης να πληροί λειτουργικές και λειτουργικές απαιτήσεις του κλάδου, όπως αξιοπιστία, λειτουργική ασφάλεια, ασφάλεια, αποδοτικότητα κόστους και ευελιξία διεργασιών.²³

- **Βιομηχανική Κοινοπραξία Διαδικτύου (IIIC)**

Το Industrial Internet Consortium (IIIC) ιδρύθηκε τον Μάρτιο του 2014 για να συγκεντρώσει τους οργανισμούς και τις τεχνολογίες που απαιτούνται για την επιτάχυνση της ανάπτυξης του βιομηχανικού διαδικτύου εντοπίζοντας, συναρμολογώντας, δοκιμάζοντας και προωθώντας βέλτιστες πρακτικές. Τα μέλη συνεργάζονται για να επιταχύνουν την εμπορική χρήση προηγμένων τεχνολογιών. Περιλαμβάνει μικρούς και μεγάλους καινοτόμους τεχνολογίας, ηγέτες κάθετης αγοράς, ερευνητές, πανεπιστήμια και κυβερνητικούς οργανισμούς.²⁴

²² https://www.porttechnology.org/news/kalmar_abb_and_nokia_trial_5g_applications/

²³ <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>

²⁴ <https://www.iiconsortium.org/wc-industry.htm>

- Συμμαχία Βιομηχανικού Διαδικτύου (AII)

Η Συμμαχία του Βιομηχανικού Διαδικτύου (AII) ξεκίνησε από κοινού από τη μεταποιητική βιομηχανία, τη βιομηχανία επικοινωνιών, το Διαδίκτυο και άλλες επιχειρήσεις, με στόχο τη μελέτη και την προώθηση βιομηχανικών προτύπων Διαδικτύου, τα αποτελέσματα δοκιμών και επίδειξης βιομηχανικού Διαδικτύου, καθώς και καινοτομίας προϊόντων και εφαρμογών. Αν και τα περισσότερα από τα αποτελέσματά του δημοσιεύονται στα Κινέζικα, το έργο του αξίζει αναφορά.²⁵

- Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC)

Η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC) είναι ένας κορυφαίος παγκόσμιος οργανισμός που προετοιμάζει και δημοσιεύει Διεθνή Πρότυπα για όλες τις ηλεκτρικές, ηλεκτρονικές και συναφείς τεχνολογίες. Το IEC διαθέτει ένα ευρύ φάσμα εργασιών, όπως έξυπνη πόλη, έξυπνο δίκτυο, ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, έξυπνη ηλεκτροδότηση και ούτω καθεξής. Για την προώθηση της διεθνούς συνεργασίας στον ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό τομέα, η IEC δημοσιεύει πολλά πρότυπα, εκθέσεις και προδιαγραφές. Ορισμένες από αυτές τις εκδόσεις όπως οι σειρές προτύπων 61850, 61907 και 62657 παρουσιάζουν τις απαιτήσεις βιομηχανικού αυτοματισμού στην ασύρματη επικοινωνία²⁶

- Avnu Alliance

Η Avnu Alliance είναι μια ομάδα προμηθευτών πυριτίου και προμηθευτών δικτύων που δημιουργούν ένα διαλειτουργικό οικοσύστημα χαμηλού λανθάνοντος χρόνου, συγχρονισμένου χρόνου, εξαιρετικά αξιόπιστων συγχρονισμένων δικτύων συσκευών που χρησιμοποιούν ανοιχτά πρότυπα μέσω πιστοποίησης.

Τα μέλη της Avnu Alliance περιλαμβάνουν μερικά γνωστά ονόματα όπως Intel, Keysight Technologies, General Electric και Extreme Networks. Το Alliance επικεντρώνεται σε εφαρμογές αυτών των τεχνολογιών στις αγορές Αυτοκινήτου, Επαγγελματικού A/V, Βιομηχανικών και Ηλεκτρονικών Καταναλωτών.²⁷

²⁵ <http://en.aii-alliance.org/index.php>

²⁶ <https://iec.ch/smart-manufacturing>

²⁷ <https://avnu.org/industrial/>

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία μελετήσαμε λεπτομερώς και ξεχωριστά τις τεχνολογίες και τοπολογίες του δικτύου 5G όπως και το TSN. Σε δεύτερο επίπεδο αναπτύξαμε εκτενώς τους τρόπους και τις τεχνικές που θα μπορούσαν να συνεργαστούν με κοινό πεδίο εφαρμογής, μέχρι στιγμής, οι βιομηχανίες που τα υιοθετούν λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων τους, οδηγώντας μας στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0). Για τον λόγο αυτό τα παρακάτω δυο συμπεράσματα απορρέουν από την εφαρμογή TSN με 5G σε βιομηχανίες.

1. Εκτός από όλες τις άλλες προκλήσεις ασφάλειας και απορρήτου 5G, όταν μιλάμε για TSN πάνω από 5G, πρέπει να εξετάσουμε το συγχρονισμό του χρόνου ως μια νέα επιφάνεια επίθεσης που πρέπει να προστατευτεί.

Με την επίθεση στο πρωτόκολλο συγχρονισμού χρόνου, ένας πιθανός εισβολέας θα μπορούσε αποτελεσματικά να προκαλέσει άρνηση υπηρεσίας. Δεδομένου ότι το TSN βασίζεται στη διαθεσιμότητα δεδομένων χρόνου, ο λειτουργικός αντίκτυπος θα μπορούσε να προκληθεί από την απλώς σκόπιμη υπερφόρτωση ενός χρόνου.

Τα πρωτόκολλα συγχρονισμού χρόνου που αναφέρονται παραπάνω, από μόνα τους, δεν έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς ασφαλείας και βασίζονται πλήρως σε ελέγχους ασφαλείας που υπάρχουν στο δίκτυο.

2. Στην εργασία αυτή μελετήσαμε την εργαλειοθήκη TSN (Time Sensitive Networking), όπως ορίζεται από τον IEEE 802, τα οποία αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την ενεργοποίηση του κλάδου 4.0. Οι απαιτήσεις TSN πληρούνται ως επί το πλείστον από την προδιαγραφή 5G στην Έκδοση 16 με την ευέλικτη δομή πλαισίου 5G και τη λειτουργία 5G Network Slicing που βελτιστοποιεί τους πόρους του δικτύου για να ενεργοποιήσει το uRLLC.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

- Παπαϊωάννου Ε. Κινητά και ασύρματα δίκτυα. Εισαγωγικά στοιχεία, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Πάτρα.
- Simons, R "Guglielmo Marconi και πρώιμα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας," GEC Review, Τομ. 11, No. 1, 1996
- Jonathan Rodriguez. (2015). Fundamentals of 5G Mobile Network
- 5G System Design. Patrick Marsch , Omer Bulakci, Olav Queseth , Mauro Boldi (2018) . Architectural and Functional Considerations and Long Term Research.
- "The Smart Factory of the Future – Part 2", Belden.com, 2015. [Online]. Available: <https://www.belden.com/blog/industrial-ethernet/the-smart-factory-of-the-future-part-2>.
- Akyildiz, I.F., Wang, P., Lin. S., “SoftAir: A software defined networking architecture for 5G wireless systems”, Computer Networks, 2015.
- IEEE, “Mobility management enhancements for 5G low latency services”, IEEE International Conference on Communications Workshops, Kuala Lumpur, 2016.
- Jiang J., Li Y., S. Hong H., Xu A., and Wang K., “A Time-sensitive Networking (TSN) Simulation Model Based on OMNeT++,” IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), 2018.
- Marsch P., Bulakci O., Queseth O., Boldi M., 5G System Design, 2018.
- Rodriguez J., Fundamentals of 5G Mobile Networks, 2015.
- Sarver W., Learning 5G in the Real World, 2017.
- Shiyonga E., Internet of Things Using 5G Infrastructure, 2016.
- Thiele D., Ernst R., and Diemer J., “Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN’s time-aware and peristaltic shapers,” in 2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2015.
- Gupta, Akhil. (2015). A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies. Access, IEEE. 3. 1206-1232.

- R. Baldemair et al., "Evolving wireless communications: Addressing the challenges and expectations of the future," IEEE Veh. Technol. Mag., vol. 8, no. 1, pp. 24-30, 2013
- Kagermann H, Helbig J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0.
- http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf: Acatech
- Consortium, The Industrial Internet. (2018, 05 02). A global nonprofit partnership of industry, government and academia. Ανάκτηση από <http://www.iiconsortium.org>
- Hermann M, Pentek T, Otto B. (2015). Design principles for Industrie 4.0 scenarios: a literature review.
http://www.snom.mb.tudortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf.
- Kempf. (2018, 05 02). Introduction to Industrie 4.0 .Ανάκτηση από bitkom: http://www.bitkom.org/files/documents/Studie_Industrie_4.0.pdf
- M. Rüßmann et al. (2018, 05 08). Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries Ανάκτηση από http://www.inovasyon.org/pdf/bcg.perspectives_Industry.4.0_2015.pdf
- Broy M, Karger mann H, Achatz R. (2010). Agenda cyberphysical systems: outlines of a new research domain. Berlin: Acatech
- Wagner T. et al.(2017). Industry 4.0 impacts on lean production systems. The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems (σσ. 125-131). ScienceDirect, Procedia CIRP 63.
- Pereira AC, Romero F. (2017). A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. Manufacturing Engineering Society International Conference 2017(σσ. 1206–1214). MESIC 2017, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain: Procedia Manufacturing 13.
- Gilchrist, 2016) Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. Bangken, Nonthaburi, Thailand: Alasdair Gilchrist.
- 5GPPP Architecture Working Group, "view on 5G architecture," White Pap., no. June, 2019

- Al. Qasrawi, Isra. (2016) Proposed Technologies for Solving Future 5G Heterogeneous Networks Challenges. International Journal of Computer Applications. 142. 1-8. 10.5120/ijca2016909924.

Ιστοσελίδες

- <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=9349439>
- <https://blogs.intel.com/iot/2020/07/22/shaping-the-future-of-the-industrial-iiot-with-tsn-over-5g/#gs.csm2pz>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Time-Sensitive_Networking
- <https://www.design-reuse.com/articles/46536/an-introduction-to-time-sensitive-networking.html>
- <https://www.motioncontroltips.com/what-is-time-sensitive-networking-tsn/>
- <https://www.tttechindustrial.com/products/slate/>
- <https://www.automationworld.com/products/networks/article/13315410/4-reasons-why-time-sensitive-networking-matters>
- <https://www.aimvalley.com/time-sensitive-networking/>
- <https://5g.security/5g-technology/5g-tsn-industrial-automation/>
- <https://www.ericsson.com/en/blog/2021/2/how-5g-integrates-tsn-systems>
- <https://www.ericsson.com/en/blog/2018/12/5g-meets-time-sensitive-networking>
- <https://www.ericsson.com/en/ran/spectrum-sharing>
- <https://www.ericsson.com/en/news/2020/2/5g-for-factory-automation>
- <https://techradar.softwareag.com/technology/5g-tsn/>
- <https://www.spirent.com/blogs/testing-time-sensitive-networking-over-5g-time-synchronization>
- <https://blog.ebv.com/tsn-enables-fourth-industrial-revolution/>
- <https://www.industr.com/en/why-tsn-is-the-future-in-manufacturing-2590686>
- <https://5g-acia.org/whitepapers/integration-of-5g-with-time-sensitive-networking-for-industrial-communications/>
- <https://enterpriseiotinsights.com/20210624/channels/news/what-is-tsn-and-why-industrial-5g-wont-work-without-it>

- <https://blog.plaisio.gr/guides/diktyosi-5g-i-technologiki-epanastasi-poy-tha-allaxei-ti-zoi-mas/>
- <https://trends.directindustry.com/project-13855.html>
- <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2014/614061/fig1/>
- <https://networkinterview.com/>
- <http://www.techtrained.com/what-are-the-major-architectural-changes-in-5g-and-resulting-applications-and-services/>
- <https://trends.directindustry.com/project-13855.html> "The Smart Factory of the Future – Part 2"
- <https://www.embedded.com/time-sensitive-networking-is-supporting-ethernet-applications/>
- <https://us.profinet.com/digital/tsn/>
- <https://www.cisco.com/c/dam/en/us/solutions/collateral/industry-solutions/white-paper-c11-738950.pdf>
- <https://techradar.softwareag.com/technology/5g-tsn/>
- <https://www.spirent.com/blogs/testing-time-sensitive-networking-over-5g-time-synchronization>
- <https://gr.pcmag.com/network/31435/5g-nea-tekhnologa-kai-anesukhies>
- <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/cell-phones/do-cell-phones-pose-health-hazard>
- https://www.porttechnology.org/news/kalmar_abb_and_nokia_trial_5g_applications/
- <https://www.iiconsortium.org/wc-industry.htm>
- <https://iec.ch/smart-manufacturing>
- <https://avnu.org/industrial/>
- <http://en.aii-alliance.org/index.php>
- <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8853247>

