



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

Συγγραφέας

ΦΡΑΓΚΙΣΚΟΣ ΚΟΡΔΑΣ

ΑΜ: 18389258

Επιβλέπων: ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ

Συνεπιβλέπουσα: ΕΛΕΝΗ ΣΥΜΕΩΝΑΚΗ

Αθήνα, Ιούλιος 2023



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF INDUSTRIAL DESIGN AND PRODUCTION ENGINEERING

Diploma Thesis

**DIGITAL TWINS AND THEIR APPLICATION IN INDUSTRIAL
ENERGY MANAGEMENT**

Student:

FRAGKISKOS KORDAS

Registration Number: 18389258

Supervisor: MICHAEL PAPOYTSIDAKHS

Co-Supervisor: ELENI SYMEONAKI

Athens, July 2023



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΚΑΙ Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η πτυχιακή/διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΕΛΕΝΗ ΣΥΜΕΩΝΑΚΗ	ΕΔΙΠ Α΄	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κόρδας Φραγκίσκος του Αριστείδη, με αριθμό μητρώου 18389258 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την πάροδο των χρόνων η τεχνολογία έχει αναπτυχθεί κατά εκθετικό ρυθμό, όμως σε κάθε εποχή υπάρχουν εμπόδια που την περιορίζουν στο να εξελιχθεί περαιτέρω. Στη σημερινή εποχή ένα από τα μείζον προβλήματα που αντιμετωπίζει η τεχνολογία είναι η παροχή ενέργειας, καθώς αποτελεί κινητήρια δύναμη της λειτουργίας του σύγχρονου Πολιτισμού.

Καθώς η ποσότητα ενέργειας λιγοστεύει και το κόστος της ανεβαίνει, οι βιομηχανικές επιχειρήσεις δέχονται μεγάλο πλήγμα, καθώς επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό στην λειτουργία των παραγωγικών διαδικασιών τους.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να ενσωματώσει την χρήση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων (digital twins) ως μια αποτελεσματική λύση στο πρόβλημα ενέργειας που αντιμετωπίζει η βιομηχανία.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται βασικές έννοιες της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0) δίνοντας επιπλέον έμφαση στο κομμάτι του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IOT). Επιπλέον γίνεται μια εισαγωγή στην διαχείριση των δεδομένων και δίνεται έμφαση στην λειτουργία και στην επίδραση που έχει το βιομηχανικό IOT στα συστήματα των ψηφιακών διδύμων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται ο ορισμός των κυβερνοφυσικών συστημάτων, δίνοντας έμφαση στην δομή, την λειτουργία και την τεχνολογία τους.

Στην συνέχεια, στο τρίτο κεφάλαιο ορίζεται ο τρόπος λειτουργίας της δομής των ψηφιακών διδύμων. Ακόμη μέσω ερευνών, εξετάζεται η χρήση τους σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, υπάρχει μια παρουσίαση των προτύπων ISO και διάφορων άλλων συστημάτων που χρησιμοποιούν οι σύγχρονες βιομηχανίες για να βελτιστοποιήσουν την ενεργειακή τους απόδοση και να μειώσουν το ενεργειακό τους κόστος.

Μετάπειτα, στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται η δομή μιας γενικής αρχιτεκτονικής ενός ψηφιακού διδύμου, καθώς και τα πρότυπα σχεδίασης που χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξή του. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα διάφορα στρώματα που απαρτίζουν την βασική δομή της αρχιτεκτονικής ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου, και αναλύεται σε μεγάλο βαθμό ο τρόπος λειτουργίας τους. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι μελλοντικές χρήσεις του μοντέλου σε συνδυασμό με τις προκλήσεις εφαρμογής του, καθώς και η επιχειρηματική του αξία που μπορεί να φέρει πολλά πλεονεκτήματα στις επιχειρήσεις που το χρησιμοποιούν.

Στο τελευταίο κεφάλαιο, διατυπώνονται κάποια τελικά συμπεράσματα σχετικά με την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων και τον τρόπο που μπορούν να επηρεάσουν την διαχείριση και την κατανάλωση ενέργειας σε βιομηχανικά συστήματα.

ABSTRACT

Over the years, technology has developed exponentially, but in every era there are obstacles that limit it from evolving further. One of the major problems that technology is facing today is the energy supply, as it is the driving force behind the functioning of modern society.

One of the main challenges facing modern civilisation is the need to provide a source of energy.

As the amount of energy becomes scarcer and its cost rises, industrial enterprises are taking a big hit, as they are heavily affected in the operation of their production processes.

The aim of this thesis is to integrate the use of digital twins as an effective solution to the energy problem faced by the industry.

In the first chapter, basic concepts of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0) are discussed with additional emphasis on the Internet of Things (IOT) part. Furthermore, an introduction to data management is given and emphasis is placed on the operation and impact of industrial IOT on digital twin systems.

In the second chapter, the definition of cyber-physical systems is discussed, with emphasis on their structure, function and technology.

Then, chapter three defines how the structure of digital twins works. Furthermore, through research, their use in industrial applications is examined.

In chapter four, there is a presentation of ISO standards and various other systems used by modern industries to optimize their energy efficiency and reduce their energy costs.

Then, in chapter five, the structure of a general architecture of a digital twin is described, as well as the design standards used for its development. The various layers that make up the basic structure of an energy digital twin architecture are then described, and their mode of operation is analytically described. At the end of the chapter, the future uses of the model are presented along with the challenges of its implementation, as well as its business value that can bring many advantages to the companies that use it.

In the final chapter, some final conclusions are drawn about the technology of digital twins and how they can affect the management and consumption of energy in industrial systems.

Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	4
Κατάλογος Πινάκων	7
Περίληψη	9
Abstract	10
Κεφάλαιο 1ο – Ανάλυση του Industry 4.0	11
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Ιστορική αναδρομή	11
1.2.1 Βιομηχανικές Επαναστάσεις	11
1.2.2 Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)	13
1.3 Βασικές έννοιες του Industry 4.0	13
1.3.1 Βιομηχανικό Διαδίκτυο των πραγμάτων - Industrial Internet of Things	14
1.3.2 Ανάλυση μεγάλων δεδομένων - Big Data Analytics	14
1.3.3 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση - Artificial intelligence and Machine Learning	15
1.3.4 Υπολογιστικό Νέφος - Cloud Computing	15
1.3.5 Προσομοίωση - Simulation	16
Κεφάλαιο 2ο – Κυβερνοφυσικά Συστήματα	18
2.1 Εισαγωγή	18
2.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή	18
2.3 Δομή κυβερνοφυσικού συστήματος	19
2.3.1 Φυσικό σύστημα – Physical System	19
2.3.2 Αισθητήρες – Sensors	20
2.3.3 Ενεργοποιητές – Actuators	22
2.3.4 Υπολογιστικά Συστήματα – Computer based Systems	25
2.3.5 Επικοινωνιακά δίκτυα – Communication networks	26
2.3.6 Διεπαφή χρήστη – User Interface	31
2.4 Επισκόπηση υφιστάμενων συστημάτων ελέγχου	33
2.4.1 Συστήματα ελέγχου ανατροφοδότησης	34
2.4.2 Συστήματα κλειστού/ανοικτού βρόχου – Open/Closed Loop Systems	40
2.5 Κυβερνοασφάλεια	43
Κεφάλαιο 3ο – Τεχνολογία και χρήσεις των ψηφιακών διδύμων	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Βασικοί ορισμοί ψηφιακού διδύμου	45
3.3 Ιστορική αναδρομή	46
3.4 Οι Λειτουργίες και η δομή των ψηφιακών διδύμων.	48
3.5 Τομείς εφαρμογών των ψηφιακών διδύμων.	52
3.5.1 Υγειονομική περίθαλψη	52
3.5.2 Διαστημικές αποστολές	53

3.5.3 Ναυτιλία	54
3.5.4 Βιομηχανίες παραγωγής	56
3.5.5 Ψηφιακά εργοστάσια	58
Κεφάλαιο 4ο – Διαχείριση ενέργειας στις σύγχρονες βιομηχανίες	61
4.1 Εισαγωγή	61
4.2 Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης	61
4.3 Προεπισκόπηση προτύπων ISO για την διαχείριση της ενέργειας.	66
4.3.1 ISO 50001	67
4.3.2 ISO 50003	69
4.3.3 ISO 50004	70
4.3.4 ISO 50006	71
4.3.5 ISO 50015	72
4.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στις σύγχρονες βιομηχανίες.	74
4.4.1 Χρήση καυσίμου LPG.	74
4.4.2 Συστήματα : Waste to Energy	77
Κεφάλαιο 5ο – Γενική αρχιτεκτονική ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου.	80
5.1 Εισαγωγή	80
5.2 Γενικευμένη Αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου - GDTA	81
5.2.1 Reference Architectural Model for Industry 4.0 - RAMI 4.0	81
5.2.2 Επισκόπηση αρχιτεκτονικών των ψηφιακών διδύμων.	83
5.3 Παρουσίαση μοντέλου ενεργειακού ψηφιακού διδύμου.	88
5.3.1 Στρώμα περιουσιακών στοιχείων - Asset Layer.	89
5.3.2 Στρώμα ενσωμάτωσης - Integration Layer.	90
5.3.3 Στρώμα επικοινωνίας - Communication Layer.	91
5.3.4 Στρώμα πληροφοριών - Information Layer.	92
5.3.5 Στρώμα λειτουργικότητας - Functional Layer.	93
5.3.6 Επιχειρηματικό στρώμα - Business Layer.	95
5.4 Μελλοντικές επεκτάσεις και προκλήσεις χρήσης του μοντέλου.	96
5.5 Επιχειρηματική αξία ενεργειακού ψηφιακού διδύμου.	97
Τελικά Συμπεράσματα	99
Βιβλιογραφία	100

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Η δομή και οι βασικές τεχνολογίες του Industry 4.0	12
https://www.auraquantic.com/technologies-intelligent-industry/	
Πίνακας 2 : Ροή της δομής ενός κυβερνοφυσικού συστήματος.....	18
https://www.semanticscholar.org/paper/Multi-agent-architecture-for-reliable-Systems-%28CPS%29-Sanislav-Zeadally/432b2765ca45b2d8eb6e1b52ce640cd4dce1f320/figure/0	
Πίνακας 3 : Τοπολογία ενσύρματου δικτύου.....	28
https://www.researchgate.net/figure/Dumbbell-wired-network-topology_fig1_286135568	
Πίνακας 4 : Τοπολογία ασύρματου δικτύου.....	29
https://utechnoworld.com/what-is-bus-topology-in-network-topology/	
Πίνακας 5 : Συγκεντρωτικά στοιχεία προαναφερόμενων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.....	30
Πίνακας 6 : Command Line Interface.....	32
https://en.wikipedia.org/wiki/Command-line_interface	
Πίνακας 7 : Graphical User Interface.....	32
https://en.wikipedia.org/wiki/Command-line_interface	
Πίνακας 8 : Βασικά στοιχεία ενός συστήματος ελέγχου.....	33
https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_introduction.htm	
Πίνακας 9 : Διαφοροποίηση Γραμμικού με Μη γραμμικού συστήματος ελέγχου.....	37
Πίνακας 10 : Αναπαράσταση χρονικά αμετάβλητου συστήματος ελέγχου.....	38
https://www.tutorialspoint.com/digital_signal_processing/dsp_time_invariant_systems.htm	
Πίνακας 11 : Αναπαράσταση χρονικά μεταβαλλόμενου συστήματος ελέγχου.....	39
https://www.tutorialspoint.com/digital_signal_processing/dsp_time_variant_systems.htm	
Πίνακας 12 : Η πρώτη πτήση του LLRV το 1997.....	46
https://en.wikipedia.org/wiki/Lunar_Landing_Research_Vehicle#/media/File:Lunar_Landing_Research_Vehicle_No._2_in_1967_(ECN-1606).jpg	
Πίνακας 13 : Διαδικασία ανάπτυξης ψηφιακού διδύμου ενός ασθενή με καρκίνο...52	
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9097784/pdf/nihms-1759642.pdf	

Πίνακας 14 : Αναπαράσταση συστήματος υδροηλεκτρικής αποθήκευσης
ενέργειας.....63

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115000106>

Πίνακας 15 : Δομικά στοιχεία σφονδύλου.....64

https://www.researchgate.net/figure/Structure-and-components-of-flywheel-energy-storage-system-FESS_fig1_343930266

Πίνακας 16 : Κύκλος PDCA.....70

<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/74863/60fa28c61f634beda08aad19f98ff6e1/ISO-50004-2020.pdf>

Πίνακας 17 : Βασικά βήματα για την ανάπτυξη της διαδικασίας του M&V.....73

<http://parsetraining.com/wp-content/uploads/2018/11/ISO-50015-2014.pdf>

Κεφάλαιο 1ο – Ανάλυση του Industry 4.0

1.1 Εισαγωγή

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση επήλθε από τις τρεις προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις και είναι η πιο σύγχρονη. Άλλαξε ριζικά τον τρόπο που λειτουργούν οι βιομηχανίες σε όλο τον κόσμο καθώς έφερε τεχνολογίες αυτοματοποίησης και ενίσχυσε την επικοινωνία, σε πραγματικό χρόνο μεταξύ μηχανημάτων και χρηστών σε όλα τα στάδια της παραγωγής. Έτσι έδωσε την δυνατότητα στις βιομηχανίες να αποκτήσουν περισσότερη ανταγωνιστικότητα και βιωσιμότητα.

Ο τομέας του διαδικτύου των πραγμάτων αποτελεί βασικό πυλώνα υλοποίησης του industry 4.0, ιδιαίτερα στο κομμάτι της επικοινωνίας. Με το IoT δίνεται η δυνατότητα σε φυσικές συσκευές που χρησιμοποιούν κατάλληλες τεχνολογίες να συνδέονται σε ένα δίκτυο και να ανταλλάσσουν μεταξύ τους δεδομένα μέσω ενός λογισμικού. Συνολικά, η χρήση του IoT στο Industry 4.0 ολοκληρώνει ένα έξυπνο σύστημα παραγωγής που είναι σε θέση να λαμβάνει και να προτείνει αποφάσεις ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν στον χώρο και να βελτιστοποιεί την παραγωγική διαδικασία ανταποκρίνοντας στις μεταβολές του περιβάλλοντα χώρου.

1.2 Ιστορική αναδρομή

1.2.1 Βιομηχανικές Επαναστάσεις

Κάθε βιομηχανική επανάσταση δημιουργείται προκειμένου να καλύψει κάποια σημαντική ανάγκη σε μια βιομηχανία. Κατά την πρώτη βιομηχανική επανάσταση που συνέβη στα τέλη του 18ου αιώνα, στην ηπειρωτική Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα στην μεγάλη Βρετανία. Δημιουργήθηκε η επιθυμία για λόγους ευχρηστίας και μείωσης του χρόνου των παραγωγικών διαδικασιών, να γίνει η μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους παραγωγής με το χέρι, στην χρήση μηχανημάτων. Έτσι με την δημιουργία και ανάπτυξη μηχανημάτων, είχαν σημαντική ανάπτυξη στη παραγωγή. Τα μηχανήματα αυτά ήταν κυρίως ατμομηχανές καθώς τα περισσότερα από αυτά λειτουργούσαν υδροκίνητα. Η χρήση των μηχανημάτων ενίσχυσε σημαντικά διάφορους κλάδους της βιομηχανίας και ως αποτέλεσμα αυξήθηκε η οικονομία και το βιοτικό επίπεδο του δυτικού πληθυσμού δίνοντάς ευκαιρίες για περαιτέρω εξέλιξη. Το τέλος της πρώτης βιομηχανικής επανάστασης ήλθε περίπου κατά τα έτη 1820 - 1840 [1].

Η δεύτερη βιομηχανική επανάσταση ξεκίνησε στα τέλη του 19ου αιώνα και εξέλιξε ήδη υπάρχον τεχνολογίες καθώς δημιούργησε και αρκετές πρωτοπόρες. Ο Πάτρικ

Γκέντες ήταν ο πρώτος που εισήγαγε την έννοια της δεύτερης βιομηχανικής επανάστασης. Η εποχή αυτή γνώρισε μεγάλες επιστημονικές ανακαλύψεις καθώς εξέλιξε παραπάνω τον τομέα της μαζικής παραγωγής. Κατά την περίοδο αυτή κατασκευάστηκαν τηλεγραφικά και σιδηροδρομικά δίκτυα κάνοντας την μετακίνηση πολύ πιο εύκολη. Αναπτύχθηκαν επίσης, τεχνολογικά συστήματα νερού και ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου του όγκου των τεχνολογικών εξελίξεων η βιομηχανική επανάσταση αυτή ονομάζεται και ως Τεχνολογική Επανάσταση, η οποία εντάχθηκε στην Δυτική Ευρώπη και διήρκησε έως τον 20ο αιώνα [2].

Στα τέλη του 20ου αιώνα και πιο συγκεκριμένα κατα το έτος 1969, όπου πλέον τα ηλεκτρονικά μέρη είχαν δείξει την σημαντικότητά τους στις βιομηχανίες, η ανάγκη της ανάπτυξης συστημάτων που βασίζονταν στην ηλεκτρονική επιστήμη ήταν απαραίτητη για να δώσει έναυσμα για την ανάπτυξη πληροφοριακών συστημάτων και ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ιαπωνία ήταν από τις πρώτες χώρες που ενδιαφέρθηκαν στον τομέα αυτό. Πιο συγκεκριμένα εφευρέθηκαν τα τρανζίστορ, οι λυχνίες και τα μικροτσιπ που βρισκόντουσαν σε πρώιμα στάδια εξέλιξης αλλά είχαν ήδη δείξει τις δυνατότητες που προσφέρουν σε ηλεκτρονικές εφαρμογές. Οι βιομηχανίες είναι πλέον σε θέση να διαχειρίζονται την παραγωγική διαδικασία ψηφιακά (CAD-CAM), επιταχύνοντας και ενισχύοντας σημαντικά την μαζική παραγωγή. Μεγάλες αλλαγές έφερε επίσης και στην επικοινωνία των ανθρώπων και τον μηχανημάτων με την δημιουργία υπολογιστικών μηχανών και του ασύρματου δικτύου (Wi-Fi) [3].

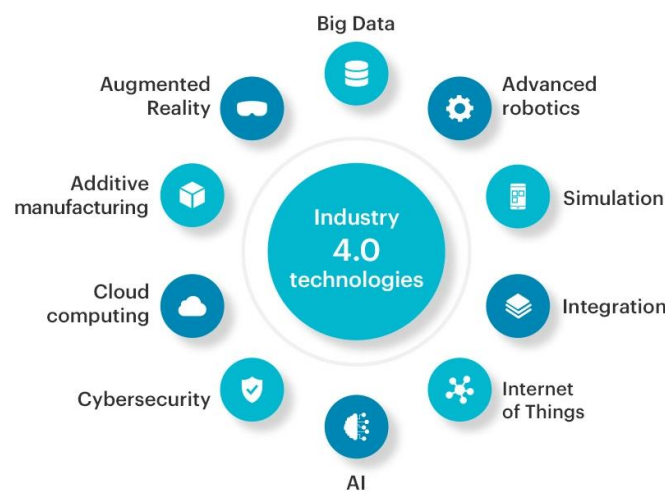
Η τρέχον βιομηχανική επανάσταση Industry 4.0, ξεκίνησε στις αρχές του 21ου αιώνα και πιο συγκεκριμένα το 2009 και εντάχθηκε αρχικά στην γερμανία. Οι τεχνολογίες παραγωγής έχουν πλέον εξελιχθεί με την αυτοματοποίηση και την ανταλλαγή δεδομένων, αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες όπως μηχανική μάθηση (AI) και το διαδίκτυο των πραγμάτων (IOT). Με την χρήση αυτών των τεχνολογιών έχει εξελιχθεί ιδιαίτερα η επιστήμη της ρομποτικής, όπου έρχεται να δώσει λύσεις σε ζητήματα απλά και σύνθετα όσον αφορά διαδικασίες παραγωγής, είτε αυτές αφορούν την λήψη αποφάσεων είτε την εκτέλεση φυσικών κινήσεων. Αυτή η βιομηχανική επανάσταση θα αλλάξει ριζικά τον τρόπο παραγωγής προϊόντων και των λειτουργιών στην βιομηχανία, προσφέροντας ανταγωνιστικότητα και βιωσιμότητα [4].

1.2.2 Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT)

Κατά το έτος 1999, ορίστηκε για πρώτη φορά από τον επιστήμονα πληροφορικής Kevin Ashton η έννοια του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT). Μια από τις αρχικές εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής ήταν η τοποθέτηση RFID τσιπ τα οποία έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν μέσω ηλεκτρομαγνητικών πεδίων ετικέτες κομματιών που είναι τοποθετημένες πάνω στα προϊόντα, και όταν αυτά βρισκόντουσαν κοντά σε μια συσκευή RFID που αναγνωρίζει ραδιοσήματα ενημερώνουν τον χρήστη για την τοποθεσία των προϊόντων αυτών μέσω ενός συστήματος εφοδιαστικής αλυσίδας [5]. Όσα περισσότερα δεδομένα ήταν σε θέση να ανταλλάζουν οι συσκευές μεταξύ τους

τόσο το καλύτερο για λόγους αύξησης μεταδιδόμενης επικοινωνίας καθώς και το πως οι συσκευές διαχειρίζονται τα δεδομένα αυτά. Έτσι αναπτύχθηκε σημαντικά η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση έτσι ώστε να γίνει εκτενέστερη ανάλυση στα δεδομένα που ανταλλάσσουν οι συσκευές μεταξύ τους. Στη σημερινή εποχή το IoT έχει γίνει κομμάτι της καθημερινότητας για τους ανθρώπους, καθώς οι περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούμε είναι συνδεδεμένες σε ένα δίκτυο με άλλες συσκευές. Παρά όλες τις χρησιμότητες του IoT, η σύγχρονη τεχνολογία δυσκολεύεται να ανταπεξέλθει σε ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων και ασφάλειας και βρίσκεται ακόμα σε στάδια εξέλιξης [6].

1.3 Βασικές έννοιες του Industry 4.0



Πίνακας 1 : Η δομή και οι βασικές τεχνολογίες του Industry 4.0

1.3.1 Βιομηχανικό Διαδίκτυο των πραγμάτων - Industrial Internet of Things

Ιδιαίτερη χρησιμότητα του IoT, αξιοποιείται στα έξυπνα εργοστάσια ή αλλιώς Smart Factories. Η ενσωμάτωση αισθητήρων και λοιπών συσκευών που μπορούν να συνδεθούν σε ένα δίκτυο και να ανταλλάξουν δεδομένα σε μηχανήματα και εξοπλισμό, προσφέρει συνδεσιμότητα όλων των μηχανημάτων σε ένα δίκτυο στο οποίο μπορεί ο χρήστης να συλλέξει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την διαδικασία παραγωγής. Αναλύοντας και επεξεργάζοντας αυτές τις πληροφορίες η παραγωγή έχει την δυνατότητα να βελτιστοποιήσει την αποδοτικότητα της και να μειώσει σημαντικά το κόστος της. Ένα εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό του IoT είναι ο απομακρυσμένος έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας επιτρέποντας την άμεση ανταπόκριση σε τυχόν προβλήματα που μπορεί να προκύψουν [7]. Ένα σύστημα IIoT αποτελείται από :

1. Υποδομές επικοινωνίας δεδομένων.

2. Εργαλεία ανάλυσης δεδομένων.
3. Έξυπνες συσκευές που επικοινωνούν, ανιχνεύουν και αποθηκεύουν πληροφορίες.
4. Αποθήκευση δεδομένων.
5. Χειριστές που χρησιμοποιούν το σύστημα για να λάβουν αποφάσεις.

Συνολικά, το IoT επιτρέπει στις βιομηχανίες να βελτιστοποιήσουν και να παρακολουθούν συνεχώς την γραμμή παραγωγής, συλλέγοντας και επεξεργάζοντας έναν μεγάλο όγκο δεδομένων ή αλλιώς Big Data.

1.3.2 Ανάλυση μεγάλων δεδομένων - Big Data Analytics

Σε μια επιχείρηση όπου είτε υπάρχουν πολλές συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους, είτε ανταλλάσσουν πολλές πληροφορίες συνεχώς, οι πληροφορίες που αποθηκεύονται σε ένα σύνολο δεδομένων ενδέχεται να έχουν μεγάλο όγκο. Επομένως ο όρος Big Data αναφέρεται σε ένα μεγάλο πλήθος δεδομένων όπου οι παραδοσιακές μέθοδοι για την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων αυτών δεν είναι καθόλου αποτελεσματική. Για να πραγματοποιηθεί δόμηση, έλεγχος και μοντελοποίηση στο σύνολο σύνθετων και πολύπλοκων δεδομένων είναι απαραίτητη η χρήση μηχανικής μάθησης, μια τεχνολογία που αποτελεί επίσης βασικό στοιχείο του Industry 4.0 [8]. Στον τομέα της βιομηχανίας και της παραγωγής η αξιοποίηση των μεγάλων δεδομένων προσδιορίζεται με διάφορες στρατηγικές όπως :

1. Συστήματα διαχείρισης του κύκλου ζωής των προϊόντων.
2. Προγραμματισμός επιχειρησιακών πόρων.
3. Συλλογή δεδομένων ενεργειακής απόδοσης.
4. Περιβαλλοντικά συστήματα.

1.3.3 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση - Artificial intelligence and Machine Learning

Η τεχνολογία της τεχνητής νοημοσύνης αναπτύχθηκε για να καλύψει εργασίες που ο ανθρώπινος νους δεν μπορεί να εκτελέσει. Προκειμένου να υπάρχει γρήγορη και αποτελεσματική διαχείριση ενός συνόλου δεδομένων, όπως ο ορθός έλεγχος

σφαλμάτων και η λήψη αποφάσεων, απαραίτητη είναι η ανάπτυξη υπολογιστικών συστημάτων που χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη με την χρήση αλγοριθμικών μοντέλων. Ο όρος της μηχανικής μάθησης, αναφέρεται στο πως τα υπολογιστικά συστήματα ανταποκρίνονται σε μεταβολές των δεδομένων που λαμβάνουν. Αυτά τα συστήματα, δεν απαιτούν συνεχή προγραμματισμό, καθώς ο αλγόριθμός τους ενημερώνεται αυτόματα και μαθαίνει από προηγούμενα δεδομένα που έχει λάβει. Με την χρήση στατιστικών τεχνικών το σύστημα είναι σε θέση να προβλέψει αλλά και να λάβει αποφάσεις σχετικά με μια εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο [9].

Στην βιομηχανία η μηχανική μάθηση μπορεί να προσφέρει βοήθεια στην αυτοματοποίηση διαφόρων διαδικασιών, όπως :

1. Βελτιστοποίηση και αύξηση παραγωγής.
2. Μείωση χρόνου διακοπής μηχανημάτων.
3. Ενίσχυση ποιοτικού ελέγχου.
4. Διαφοροποίηση και ομαδοποίηση στοιχείων.
5. Ανάπτυξη ρομπότ για την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων ή επικίνδυνων εργασιών.

1.3.4 Υπολογιστικό Νέφος - Cloud Computing

Το υπολογιστικό νέφος βασίζεται σε έναν πάροχο υπηρεσιών νέφους ο οποίος παρέχει πληροφορίες σχετικά με βάσεις δεδομένων, λογισμικά και άλλες τεχνολογικές υπηρεσίες, όπου ο χρήστης μπορεί να λάβει μέσω του διαδικτύου. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα στους χρήστες να επιλέξουν συγκεκριμένες υπηρεσίες για να καλύψουν τις ανάγκες τους χωρίς να επενδύουν σε τεχνολογικούς πόρους που δεν χρειάζονται [10].

Το cloud βασίζεται σε τρεις βασικούς τύπους υπηρεσιών :

1. Software as a Service (SaaS) : Πρόκειται για μια υπηρεσία που προσφέρει στους χρήστες πρόσβαση σε εφαρμογές μέσω του διαδικτύου, δίχως να τις εγκαθιστούν στον υπολογιστή που χρησιμοποιούν.
2. Platform as a Service (PaaS) : Σε αυτήν την υπηρεσία ο χρήστης μπορεί να διαχειριστεί και να αναπτύξει εφαρμογές χρησιμοποιώντας πλατφόρμες που βασίζονται στο νέφος, αντί να αγοράσει αντίστοιχες άδειες για να μπορεί να χρησιμοποιήσει την πλατφόρμα.
3. Infrastructure as a Service (IaaS) : Ο χρήστης έχει την υπηρεσία να χρησιμοποιήσει εικονοποιημένους υπολογιστικούς πόρους (raw computers) , όπως συσκευές αποθήκευσης και εικονικούς υπολογιστές.

Στις βιομηχανίες, το υπολογιστικό νέφος χρησιμοποιείται για την βελτιστοποίηση λειτουργιών της παραγωγής, της εφοδιαστικής αλυσίδας κα. Οι χρήστες έχουν άμεση πρόσβαση σε δεδομένα που αφορούν την διαδικασία παραγωγής με αποτέλεσμα να είναι σε θέση να επιλύσουν γρήγορα τυχόν προβλήματα.

1.3.5 Προσομοίωση - Simulation

Η τεχνολογία της προσομοίωσης επιτρέπει την εικονική μεταφορά φυσικών συστημάτων σε ένα ψηφιακό σύστημα, το οποίο μπορεί να διαχειριστεί επιμέρους εργασίες που αφορούν το αντικείμενο αυτό σε ψηφιακή μορφή. Αυτή η τεχνική επιτρέπει με την χρήση διαφόρων υπολογιστικών μοντέλων την εικονική αναπαράσταση, τις λειτουργίες και τα χαρακτηριστικά ενός πραγματικού συστήματος [11].

Η προσομοίωση στην βιομηχανία αποτελεί πλέον ένα πολύ σημαντικό εργαλείο ανάπτυξης της παραγωγής, καθώς οι κατασκευαστές μπορούν να δοκιμάζουν και να αξιολογούν τις συνθήκες της παραγωγικής διαδικασίας, χωρίς να τα εφαρμόζουν στην πραγματικότητα. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί προσομοίωση σε βιομηχανικά συστήματα, απαραίτητη είναι η χρήση λογισμικού προσομοίωσης για την μοντελοποίηση, την βελτιστοποίηση και την πρόβλεψη σφαλμάτων σε ένα περιβάλλον παραγωγής [12].

Ένα τέτοιο λογισμικό είναι το Tecnomatix Plant Simulation το οποίο έχει αναπτυχθεί από την Siemens για βιομηχανική χρήση [13]. Μερικές από τις βασικές λειτουργίες είναι οι εξής :

1. Εικονική αναπαράσταση (2D, 3D) της βιομηχανικής εγκατάστασης δίνοντας πρόσβαση σε πληροφορίες από συστήματα εξοπλισμένα με αισθητήρες και συσκευές IoT.
2. Προσομοίωση συμβάντων και στατιστική ανάλυση.
3. Ανάλυση απόδοσης μηχανημάτων για εξάλειψη σημείων συμφόρησης.
4. Βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των συστημάτων με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης για την επαλήθευση. Δυναμική απεικόνιση και ανάλυση της χρήσης της ενέργειας κατά την διάρκεια της παραγωγής αλλά και κατά την διάρκεια διαλειμμάτων.

Κεφάλαιο 2ο – Κυβερνοφυσικά Συστήματα

2.1 Εισαγωγή

Ένα κυβερνοφυσικό σύστημα (CPS), αφορά μια τεχνολογία η οποία συνδυάζει φυσικά στοιχεία με υπολογιστικά, προκειμένου να εκτελέσει μια εργασία. Στο φυσικό επίπεδο γίνεται χρήση αισθητήρων και ενεργοποιητών, οι οποίοι λαμβάνουν δεδομένα από το περιβάλλον και αλληλεπιδρούν με το υπολογιστικό επίπεδο. Το υπολογιστικό επίπεδο διαβάζει τα δεδομένα των αισθητήρων και ανταποκρίνεται διαχειρίζοντας τον έλεγχο του συστήματος. Σημαντικό πλεονέκτημα στην χρήση των CPS έχουν εφαρμογές για

την διαχείριση της ενέργειας, την παρακολούθηση εφοδιαστικής αλυσίδας και τον έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας. Η ενσωμάτωση του φυσικού με του ψηφιακού πεδίου είναι απαραίτητη για την πρόοδο του Industry 4.0 και των τεχνολογιών του [14]. Τα κυβερνοφυσικά συστήματα παρέχουν την δυνατότητα εξέλιξης του τρόπου αλληλεπίδρασης ανθρώπου - μηχανής.

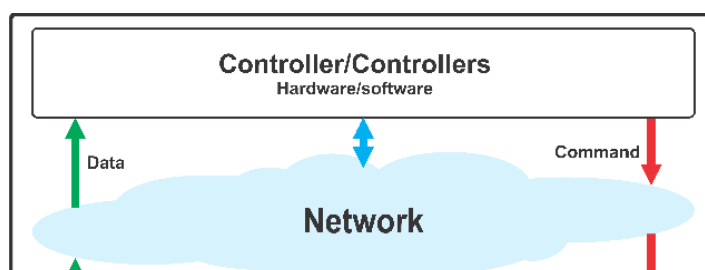
2.2 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Η πρώτη φορά που διατυπώθηκε ο όρος των κυβερνοφυσικών συστημάτων ήταν το 2006 από την διευθύντρια του προγράμματος Εθνικού Ιδρύματος Επιστημών (NSF) των Ηνωμένων Πολιτειών, Dr Helen Gill [15]. Ωστόσο η τεχνολογία των συστημάτων ελέγχου υπάρχει από αρκετά νωρίτερα και πιο συγκεκριμένα κατα τις δεκαετίες του 1960 και του 1970, όπου η δημιουργία μικροεπεξεργαστών και άλλων τεχνολογιών, επέτρεψε την ανάπτυξη ψηφιακών συστημάτων ελέγχου μικρού μεγέθους και σχετικά χαμηλού κόστους. Τα συστήματα επιτελούσαν αρχικά λειτουργίες ελέγχου φυσικών διεργασιών όπως, εφαρμογές παραγωγής και μεταφορών. Στα μέσα του 2000 το NSF ξεκίνησε επίσημα μια έρευνα που είχε ως σκοπό την δημιουργία ενός νέου συστήματος που θα είχε την ικανότητα να χρησιμοποιεί δεδομένα του φυσικού επιπέδου και να τα εντάσσει στο ψηφιακό με αποτελεσματικό τρόπο[16] [17].

Στην πάροδο των χρόνων τα κυβερνοφυσικά συστήματα έχουν λάβει ευρεία αναγνώριση και χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών, όπως στα αυτόνομα οχήματα, στον βιομηχανικό αυτοματισμό και στον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας. Η ανάγκη για την ανάπτυξη των CPS, προκάλεσε την ανάπτυξη και την δημιουργία νέων αισθητήρων για κάθε χρήση που είναι πιο αποτελεσματικοί και ανθεκτικοί. Η επιθυμία για την εξέλιξη της επικοινωνίας του φυσικού συστήματος με το ψηφιακό, ανέπτυξε σημαντικά τον τομέα του διαδικτύου των πραγμάτων, για ταχύτερες και μεγαλύτερες σε όγκο πληροφορίες.

Σήμερα τα κυβερνοφυσικά συστήματα αποτελούν βασικό στοιχείο στην ενοποίηση φυσικών και ψηφιακών συστημάτων και είναι μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογίες για τις βιομηχανίες του σήμερα και του μέλλοντος.

2.3 Δομή κυβερνοφυσικού συστήματος



Πίνακας 2 : Ροή της δομής ενός κυβερνοφυσικού συστήματος

2.3.1 Φυσικό σύστημα – Physical System

Το φυσικό σύστημα σε ένα CPS αποτελεί το φυσικό στοιχείο του συστήματος το οποίο έχει άμεση αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Συνήθως αφορά εξαρτήματα υδραυλικά, ηλεκτρικά και μηχανικά, καθώς μπορεί να περιλαμβάνει συσκευές όπως ενεργοποιητές (actuators), κινητήρες και πιο σύνθετα συστήματα, αυτόνομης λειτουργίας. Σκοπός του φυσικού συστήματος είναι να συλλέγει δεδομένα από τον περιβάλλοντα χώρο που αλληλεπιδρά μέσω αισθητήρων, και να μεταφέρει τα δεδομένα αυτά σε ένα υπολογιστικό σύστημα, το οποίο ελέγχει και επεξεργάζεται τα δεδομένα και τα αποστέλλει στο φυσικό σύστημα για να ελέγξει την συμπεριφορά των ενεργοποιητών. Βασική λειτουργία του φυσικού συστήματος είναι η εκτέλεση των επιθυμητών φυσικών εργασιών για την επίτευξη ενός στόχου. Παραδείγματος χάρη, σε μια ιατρική συσκευή που χρησιμοποιείται για να ελέγξει τις ζωτικές λειτουργίες ενός ανθρώπου, το φυσικό σύστημα φέρει τους αισθητήρες και τους ενεργοποιητές που είναι υπεύθυνοι για την συλλογή των δεδομένων και την αντίστοιχη ενέργεια που επακολουθεί για την εκτέλεση της εξέτασης. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό παράδειγμα στην χρήση φυσικών συστημάτων αφορά την αυτοκινητοβιομηχανία και πιο συγκεκριμένα στα αυτόνομα οχήματα. Το φυσικό σύστημα σε ένα αυτοκινούμενο όχημα περιλαμβάνει όλα τα μηχανικά εξαρτήματα που είναι υπεύθυνα για την κίνηση του οχήματος. Αυτά τα εξαρτήματα μπορεί να είναι το τιμόνι, τα φρένα, το γκάζι, το κιβώτιο ταχυτήτων και άλλοι αισθητήρες, που αλληλεπιδρούν με το υπολογιστικό σύστημα το οποίο καθορίζει μετέπειτα τις μεταβλητές τους προκειμένου να συντονιστούν και να εκτελέσουν την επιθυμητή κίνηση. Το φυσικό σύστημα έχει την δυνατότητα να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το ψηφιακό, για αυτό θα πρέπει κατά τον σχεδιασμό του να ελεγχθούν παράγοντες του περιβάλλοντα χώρου και των τεχνολογικών χαρακτηριστικών των αισθητήρων και των ενεργοποιητών που θα χρησιμοποιηθούν [18]. Πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως το μέγεθος, το βάρος και η ανθεκτικότητα του συστήματος, καθώς και το ποσοστό ενέργειας που καταναλώνει, με γνώμονα τις απαιτήσεις της εκτέλεσης της επιθυμητής εφαρμογής. Τέλος, το φυσικό σύστημα θα πρέπει να σχεδιαστεί σε εναρμονισμό με το υπολογιστικό σύστημα ώστε να υπάρχει απρόσκοπτη συνεργασία για την επίτευξη του στόχου του κυβερνοφυσικού συστήματος.

2.3.2 Αισθητήρες – Sensors

Οι αισθητήρες σε ένα κυβερνοφυσικό σύστημα αποτελούν μέρος του φυσικού συστήματος και τοποθετούνται σε σημεία που είναι επιθυμητή η συλλογή δεδομένων και πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση μιας εργασίας που πραγματοποιείται στο φυσικό περιβάλλον. Αυτή η διαδικασία είναι αρκετά κρίσιμη καθώς παρέχει τις απαιτούμενες πληροφορίες στο υπολογιστικό σύστημα για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος στο φυσικό. Γενικά ένας αισθητήρας είναι μια συσκευή που έχει την δυνατότητα να ανιχνεύσει μεταβολές ενός φυσικού μεγέθους (θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ.) και να τις μετατρέψει σε μια έξοδο ηλεκτρικού σήματος που είναι μετρήσιμη, δηλαδή σε μορφή τάσης ή έντασης.

Συνολικά υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αισθητήρων [19] :

1. Αναλογικοί : Μετρούν φυσικά φαινόμενα όπως θερμοκρασία και η έξοδος που παράγουν είναι σε μορφή αναλογικών σημάτων.
2. Ψηφιακοί : Μετατροπή φυσικών σημάτων σε ψηφιακό σήμα, προκειμένου να γίνει πιο εύκολη η επεξεργασία του σήματος από ψηφιακά κυκλώματα. Παραδείγματα ψηφιακών αισθητήρων είναι οι οθόνες αφής και οι αισθητήρες κίνησης.

Οι αισθητήρες διακρίνονται σε πολλές μορφές ανάλογα με τον τύπο μέτρησης που απαιτείται. Μερικοί τύποι αισθητήρων είναι :

1. Θερμοκρασίας : Θερμοζεύγη, RTDs (Ανιχνευτές θερμοκρασίας αντίστασης), Θερμίστορ.
2. Κίνησης : Επιταχυνσιόμετρα, Γυροσκόπια, Αισθητήρες υπερύθρων - υπερήχων.
3. Πίεσης : Πιεζοηλεκτρικοί, Οπτικοί, Capacitive sensors (δυο αγώγιμες πλάκες που σχηματίζουν έναν πυκνωτή ο οποίος αλλάζει χωρητικότητα υπό πίεση).
4. Υγρασίας : Gravimetric sensors (μεταβολή μάζας λόγω μεταβολή υγρασίας), Φασματοσκοπικοί (μέτρηση αλλαγής στην απορρόφηση του φωτός από μεταβολές στην υγρασία).
5. Φωτός : Φωτοдиодοι, Φωτοτρανζίστορ, Φωτοαντιστάσεις, Φωτοβολταϊκά στοιχεία.
6. Ήχου : Μικρόφωνα, Δονησιόμετρα λέιζερ Doppler (ανίχνευση δονήσεων από ηχητικά κύματα με την χρήση δέσμης λέιζερ).

Σε ένα κυβερνοφυσικό σύστημα που επιτελεί κάποια συγκεκριμένη λειτουργία, η ορθή επιλογή των αισθητήρων είναι άκρως σημαντική καθώς μπορεί να επηρεάσει όλο το σύστημα. Τα κριτήρια επιλογής ενός αισθητήρα θα πρέπει να βασίζονται στα παρακάτω χαρακτηριστικά [20] :

1. Ακρίβεια : Αναφέρεται στο ποσοστό επιτυχίας μέτρησης του αισθητήρα με την πραγματική τιμή του φυσικού μεγέθους που μετράται.
2. Επαναληψιμότητα : Κατα πόσο ικανός είναι ο αισθητήρας να παράγει το ίδιο αποτέλεσμα με την ίδια είσοδο σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.
3. Εύρος : Ο περιορισμός του αισθητήρα στις ελάχιστες και μέγιστες τιμές του μετρούμενου φυσικού μεγέθους.
4. Γραμμικότητα : Ποσοστό αναλογίας εξόδου αισθητήρα προς το μετρούμενο φυσικό μέγεθος. Η έξοδος προσεγγίζει την είσοδο του αισθητήρα στο γράφημα με μια ευθεία γραμμή.
5. Χρόνος απόκρισης : Το χρονικό διάστημα ανταπόκρισης του αισθητήρα στις μεταβολές του φυσικού μεγέθους.
6. Ευαισθησία : Αναφέρεται στην ελάχιστη μετρούμενη μεταβολή του φυσικού μεγέθους που μπορεί ο αισθητήρας να ανιχνεύσει.
7. Θόρυβος : Τυχαίες διακυμάνσεις στο σήμα εξόδου του αισθητήρα που παραμορφώνουν το σήμα επηρεάζοντας την ακρίβειά του.
8. Κόστος : Το χρηματικό ποσό που απαιτείται για την αγορά του αισθητήρα και διαφέρει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του.
9. Χρόνος λειτουργίας : Μέτρηση ανθεκτικότητας του αισθητήρα στην πάροδο του χρόνου με βάση της προδιαγραφές του.
10. Στατικό σφάλμα : Σφάλμα που υπάρχει σε κάθε φάση μέτρησης, το οποίο μπορεί να εξαλειφθεί με την χρήση φίλτρων στην έξοδο του αισθητήρα.
11. Σφάλμα : Το ποσοστό διαφοράς της μετρούμενης με της πραγματικής τιμής.

Εν κατακλείδι, όλοι οι παραπάνω παράγοντες πρέπει να αξιολογηθούν πριν την ενσωμάτωση αισθητήρων σε ένα κυβερνοφυσικό σύστημα, ώστε οι μετρήσεις του περιβάλλοντος και οι πληροφορίες που λαμβάνει το υπολογιστικό σύστημα να είναι ακριβείς.

2.3.3 Ενεργοποιητές – Actuators

Οι ενεργοποιητές αποτελούν ένα λειτουργικό στοιχείο μιας μηχανής, και εκτελούν φυσικές κινήσεις ή πραγματοποιούν διαδικασίες ελέγχου σε ένα κυβερνοφυσικό

σύστημα. Ο κύριος σκοπός των ενεργοποιητών είναι να μετατρέπουν ψηφιακά σήματα που λαμβάνουν από το λογικό σύστημα ελέγχου, σε φυσικές ενέργειες που επηρεάζουν άμεσα το περιβάλλον. Επίσης, στο πεδίο των ενεργοποιητών επιτρέπεται η ανάκτηση πληροφοριών του φυσικού περιβάλλοντος προκειμένου να εισαχθούν οι κατάλληλες τιμές στο σύστημα για να εκτελεστεί η επιθυμητή ενέργεια.

Για την ομαλή λειτουργία ενός ενεργοποιητή απαραίτητη είναι η χρήση μιας συσκευής ελέγχου και μια πηγή ενέργειας η οποία τροφοδοτεί το σύστημα. Ο μηχανισμός του ενεργοποιητή ποικίλει ανάλογα με το είδος του κυβερνοφυσικού συστήματος αλλά η βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Αρχικά, ο ενεργοποιητής λαμβάνει ένα ψηφιακό σήμα χαμηλής ενέργειας (ηλεκτρική τάση, ρεύμα) από το σύστημα ελέγχου το οποίο ενεργοποιεί τις λειτουργίες του ενεργοποιητή ο οποίος στην συνέχεια παράγει κάποια μηχανική κίνηση (γραμμική ή περιστροφική μετατόπιση) στο περιβάλλον που δραστηριοποιείται [21] [22]. Αυτή η κίνηση βασίζεται στην τιμή που εισάγεται από το σύστημα καθώς και στον προγραμματισμό και τις προδιαγραφές του ενεργοποιητή.

Πιο συγκεκριμένα, στο πεδίο των κυβερνοφυσικών συστημάτων, οι ενεργοποιητές λαμβάνουν ηλεκτρικό σήμα από την λογική ελέγχου με βάση τα στοιχεία εισόδου των αισθητήρων. Καθώς γίνεται η ενεργοποίηση πραγματοποιούνται φυσικές διεργασίες στο χώρο της εφαρμογής.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου ενεργοποιητή βασίζεται κατά κύριο λόγο στις απαιτήσεις της φυσικής διεργασίας που εκτελείται. Αυτές οι απαιτήσεις μπορεί να βασίζονται σε παράγοντες όπως : ασκούμενη δύναμη, ταχύτητα - ακρίβεια κίνησης, ποιότητα και χρόνος λειτουργίας. Μερικοί από τους τύπους και τις λειτουργίες των ενεργοποιητών είναι οι ακόλουθοι :

1. Ηλεκτρικοί ενεργοποιητές : Πρόκειται για ένα από τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είδη ενεργοποιητών στα κυβερνοφυσικά συστήματα λόγω του μεγάλου εύρους χρήσης τους. Η βασική τους λειτουργία βασίζεται στην μετατροπή ηλεκτρικών σημάτων σε μηχανική κίνηση χρησιμοποιώντας έναν ηλεκτροκινητήρα. Ο σχεδιασμός ενός ηλεκτρικού ενεργοποιητή βασίζεται κατά κύριο λόγο στον ηλεκτρικό κινητήρα που θα χρησιμοποιήσει. Ο ηλεκτρικός κινητήρας αποτελείται από δύο βασικά εξαρτήματα: Στάτης (μαγνήτης), Ρότορας(τοποθετείται στο κέντρο του στάτη και επηρεάζεται από το μαγνητικό πεδίο που παράγει ο μαγνήτης προκαλώντας περιστροφή σε κίνηση) Ο κινητήρας παρέχει κίνηση σε ένα μηχανισμό γραναζιών, τα οποία με την σειρά τους ενισχύουν την ροπή που παρέχεται από τον κινητήρα [23]. Οι ηλεκτρικοί ενεργοποιητές εκτελούν κυρίως περιστροφικές και γραμμικές κινήσεις. Τέτοιου είδους ενεργοποιητές αξιοποιούνται σε αυτοκινούμενα οχήματα μεταφοράς, καθώς και στην αυτοκινητοβιομηχανία γενικότερα σε εφαρμογές συγκόλλησης - σύνδεσης. Επιπρόσθετα, χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου (upstream, midstream, downstream).
2. Υδραυλικοί ενεργοποιητές : Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα σε υδραυλική πίεση, όπου στην συνέχεια παράγουν

μηχανική δύναμη. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στην αρχή συμπίεσης των υγρών, και υπάρχουν δύο βασικές μονάδες υδραυλικών ενεργοποιητών. Η μονάδα μονής ενέργειας (κύλινδροι μετατόπισης) ασκούν πίεση στην μια μεριά του εμβόλου, έτσι προκειμένου να επαναληφθεί αυτή η εργασία και να επιστρέψει το έμβολο στην αρχική του θέση απαιτείται η χρήση ελατηρίου. Στις μονάδες διπλής ενέργειας έχουμε άσκηση πίεσης σε δύο πλευρές του εμβόλου. Δημιουργώντας διαφορά πίεσης στις δύο πλευρές, καθορίζεται και η φορά κίνησης του εμβόλου. Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές εκτελούν κινήσεις γραμμικές και περιστροφικές. Οι υδραυλικοί ενεργοποιητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην βιομηχανία για να ελέγχουν την κίνηση των διαφόρων μηχανημάτων όπως : πρέσες, πριόνια και λοιπά μηχανήματα επεξεργασίας μετάλλων [24]. Επίσης, χρησιμοποιείται σε κατασκευαστικά μηχανήματα όπως γερανοί και εσκαφείς καθώς προσφέρει υψηλή ισχύ εξόδου και με μεγάλη ακρίβεια.

3. Πνευματικοί ενεργοποιητές : Οι πνευματικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούν αέρια ρευστά αντί για υγρά. Αποτελείται συνήθως από ένα έμβολο το οποίο παράγει δύναμη κίνησης, διατηρώντας τον αέρα στο ανώτερο τμήμα του κυλίνδρου, ο οποίος στην συνέχεια ωθεί το στοιχείο ελέγχου της βαλβίδας να κινηθεί [25]. Σκοπός των βαλβιδών είναι να διπλασιάσουν την δύναμη εισόδου τους, καθώς στην είσοδο τους λαμβάνουν ελάχιστη πίεση. Η είσοδος στη βαλβίδα ονομάζεται και ως σήμα ελέγχου, το οποίο προέρχεται από συσκευές μέτρησης και μεταβάλλοντας την πίεση μεταβάλλεται και το σημείο ρύθμισης της βαλβίδας [26]. Τυπικά, τα βασικά μέρη ενός πνευματικού ενεργοποιητή είναι :
 - a. Έμβολο : Εξάρτημα μετατροπής αέρα σε μηχανική δύναμη (γραμμική κίνηση).
 - b. Κύλινδρος : Το σώμα του ενεργοποιητή που περιέχει το έμβολο.
 - c. Στέλεχος βαλβίδας : Έλεγχος ροής μέσω της βαλβίδας.
 - d. Καπάκια άκρων : Συγκρατούν το έμβολο στη θέση του και ασφαλίζουν τα άκρα του κυλίνδρου.
 - e. Θύρες : Επιτρέπουν την ροή του αέρα εντός και εκτός του κυλίνδρου.
 - f. Οδηγοί : Πρόκειται για ρουλεμάν που διατηρούν το έμβολο ευθυγραμμισμένο μέσα στον κύλινδρο.

Η χρήση πνευματικών ενεργοποιητών σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι απαραίτητη λόγω αξιοπιστίας και χαμηλού κόστους. Μπορούν να εφαρμοστούν για έλεγχο βαλβίδων σε συστήματα αγωγών πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς και σε εφαρμογές ρομποτικής που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια στις κινήσεις.

4. Πιεζοηλεκτρικοί ενεργοποιητές : Στους πιεζοηλεκτρικούς ενεργοποιητές κυριαρχεί το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο προκειμένου να γίνει μετατροπή

ηλεκτρικού φορτίου σε μηχανική κίνηση. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρείται σε υλικά όπως κεραμικά και κρυσταλλικά, τα οποία παραμορφώνονται όταν εφαρμόζεται πάνω τους ηλεκτρικό φορτίο. Η παραμόρφωση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία δύναμης. Για την διαδικασία της παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται στρώματα πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, και όταν εφαρμόζεται τάση στα στοιχεία, αυτά διαστέλλονται ή συστέλλονται βάσει της πολικότητας της τάσης. Η ενέργεια αυτή φέρει μια κίνηση μικρού μεγέθους αλλά μεγάλης ακριβείας, που μπορεί να αξιοποιηθεί ως οδηγός για κάποιο στοιχείο ελέγχου (βαλβίδα, αντλία κ.τ.λπ) [27]. Τα πλεονεκτήματα στην χρήση των πιεζοηλεκτρικών ενεργοποιητών είναι η ακρίβεια, η γρήγορη ανταπόκριση και οι μικρές κινήσεις που παράγουν. Επιπρόσθετα διακρίνονται για την ανθεκτικότητά τους, καθώς λειτουργούν υπό δυσμενής συνθήκες, αφού δεν αποτελούνται από κινούμενα μέρη και δεν επηρεάζεται η λειτουργία τους από μαγνητικά πεδία. Ωστόσο, λόγω του σχεδιασμού τους, περιορίζονται στην εκτέλεση μεγάλων διαδρομών υψηλού φορτίου.

Στην βιομηχανία χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές διαδικασίες κατά κύριο λόγο όπως σφυρηλάτηση ή σφράγιση. Επίσης, χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία ως συστήματα πέδησης και σε συστήματα υδραυλικών τιμονιών [28].

Συνοπτικά, σε όλες τις περιπτώσεις ο ενεργοποιητής λαμβάνει ένα ψηφιακό σήμα και μέσω ενός συστήματος ελέγχου, ανάλογα με τον τύπο του ενεργοποιητή, το μετατρέπει σε μηχανική κίνηση ή δύναμη. Συμπερασματικά, η χρήση ενεργοποιητών στα κυβερνοφυσικά συστήματα, επιτρέπει την ανάπτυξη και την δημιουργία νέων εφαρμογών στο πεδίο του αυτοματισμού, της ρομποτικής και στα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου.

2.3.4 Υπολογιστικά Συστήματα – Computer based Systems

Στα κυβερνοφυσικά συστήματα, για την επίτευξη της αλληλεπίδρασης φυσικών και ψηφιακών δεδομένων χρησιμοποιούνται υπολογιστικά συστήματα. Τα υπολογιστικά συστήματα επιτρέπουν την άντληση πληροφοριών από μια φυσική διεργασία προκειμένου να ελέγξουν την λειτουργία της αλλά και να την βελτιστοποιήσουν με την εισαγωγή των κατάλληλων παραμέτρων. Στα υπολογιστικά συστήματα διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες :

1. Φυσικά συστήματα : Σκοπός των φυσικών συστημάτων είναι η άμεση αλληλεπίδραση με τις μεταβολές του φυσικού περιβάλλοντος. Συλλέγουν

δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον μέσω αισθητήρων. Έπειτα ξεκινάει η διαδικασία της επεξεργασίας των πληροφοριών αυτών, όπως η ταξινόμηση και η κατηγοριοποίηση. Αφού τα δεδομένα ελεγχθούν το σύστημα μέσω στατιστικών αναλύσεων και μηχανικής μάθησης δημιουργεί τις νέες παραμέτρους εισόδου του συστήματος, για την βελτιστοποίηση της απόδοσης του. Οι νέες τιμές εισόδου εκχωρούνται από το υπολογιστικό σύστημα στους ενεργοποιητές οι οποίοι εφαρμόζουν τις μεθόδους βελτιστοποίησης στο φυσικό περιβάλλον. Για παράδειγμα, στην βιομηχανία, σε χώρους ηλεκτρονικών συσκευών που βρίσκονται διαρκώς σε λειτουργία όπως PLC's ή Servers, γίνεται μόνιμη παρακολούθηση της θερμοκρασίας του δωματίου προκειμένου οι συσκευές να μην υπερθερμούνται. Οι αισθητήρες λαμβάνουν την μεταβολή στην θερμοκρασία του δωματίου και το υπολογιστικό σύστημα της ελέγχει προκειμένου να ενεργοποιήσει τον κλιματισμό και να ρυθμίσει τα RPM στους ανεμιστήρες που καθορίζουν την ροή του αέρα για την αποτελεσματική ψύξη των ηλεκτρονικών συσκευών.

2. Συστήματα και πρωτόκολλα επικοινωνίας : Πρόκειται για συστήματα τα οποία μεταφέρουν την πληροφορία από το φυσικά σύστημα στο υπολογιστικό και αντίστροφα. Για την μετάδοση των δεδομένων και των σημάτων ελέγχου χρησιμοποιούνται ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα. Τα ενσύρματα δίκτυα είναι αρκετά πιο γρήγορα, αποτελεσματικά και με μεγαλύτερη απόκριση από ότι τα ασύρματα. Μεγάλο τους μειονέκτημα όμως είναι η χρήση καλωδίων (οπτικές ίνες) για την επικοινωνία μιας συσκευής με μια άλλη, καθιστώντας έτσι τις συσκευές αυτές περιορίσιμες ως προς την απόστασή τους και την κίνηση τους. Στις βιομηχανίες, το Ethernet αποτελεί μια από τις τυποποιημένες τεχνολογίες ενσύρματης τεχνολογίας και χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας TCP/IP, το οποίο προσφέρει υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και υψηλό εύρος ζώνης. Ωστόσο, οι βιομηχανίες επωφελούνται πλήρως και από ασύρματα πρωτόκολλα δικτύωσης. Το Zigbee (IEEE 802.12.4) είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας χαμηλής ισχύος, ικανό για μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις (εώς και 100 μέτρα). Επίσης, προσφέρει αξιόπιστη και ασφαλή επικοινωνία και είναι ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων, παραδείγματος χάρη δεδομένα αισθητήρων που είναι τοποθετημένοι σε μακρινή απόσταση από το υπολογιστικό σύστημα. Η επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας που θα χρησιμοποιηθεί στο κυβερνοφυσικό σύστημα βασίζεται κατά κύριο λόγο στα χαρακτηριστικά των δεδομένων που λαμβάνουν και στέλνουν οι συσκευές, καθώς και στις προδιαγραφές των ίδιων των συσκευών. Πρέπει να ληφθούν υπόψη παράγοντες εύρους επικοινωνίας, ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, κατανάλωση ενέργειας και απαιτήσεις ασφάλειας.
3. Συστήματα επεξεργασίας δεδομένων : Πρόκειται για υπολογιστικά συστήματα που επεξεργάζονται τα δεδομένα που λαμβάνουν από φυσικά συστήματα και

παρέχουν υπηρεσίες λήψης αποφάσεων για την βελτίωση της απόδοσης του συστήματος που απασχολούνται. Τα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων χρησιμοποιούν τεχνολογίες και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για την ανάλυση των πληροφοριών προκειμένου να γίνει η λήψη ορθών αποφάσεων για την διαχείριση του συστήματος. Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να προβλέπουν τις επερχόμενες συνθήκες του συστήματος, μέσω προηγούμενων μετρήσεων που έχουν αποθηκευτεί και αναλυθεί. Ιδιαίτερη χρήση βρίσκουν σε εφαρμογές μηχανημάτων που καταναλώνουν υψηλά ποσοστά ενέργειας. Με την χρήση προηγούμενων δεδομένων μπορούν να προσδιορίσουν την ακριβή ποσότητα που απαιτείται δίχως να γίνεται σπατάλη ενέργειας.

Τέλος, τα υπολογιστικά συστήματα αποτελούν μια τεχνολογία ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη των κυβερνοφυσικών συστημάτων, καθώς εννοποιούν τον φυσικό κόσμο με τον ψηφιακό, με αποτέλεσμα να βελτιστοποιούν ή και να εκτελούν πολύπλοκες φυσικές διεργασίες που ο άνθρωπος δεν θα μπορούσε να διαχειριστεί [29].

2.3.5 Επικοινωνιακά δίκτυα – Communication networks

Τα επικοινωνιακά δίκτυα αποτελούν βασικό χαρακτηριστικό των κυβερνοφυσικών συστημάτων καθώς επιτρέπουν την αλληλεπίδραση και την μετάδοση πληροφοριών από τις συσκευές του φυσικού συστήματος, στις συσκευές του ψηφιακού και αντίστροφα. Τα δίκτυα ορίζουν τους παράγοντες που καθορίζουν την ταχύτητα, την εμπέλεια και τον όγκο της πληροφορίας. Έτσι σε ένα σύστημα η απόφαση του τύπου του δικτύου που θα χρησιμοποιηθεί είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική και ομαλή λειτουργία του συστήματος [30]. Ο σχεδιασμός του δικτύου αναπτύσσεται με βάση την ανεκτικότητα στα σφάλματα κατά την διάρκεια μετάδοσης της πληροφορίας.

Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου επικοινωνίας σε ένα CPS είναι :

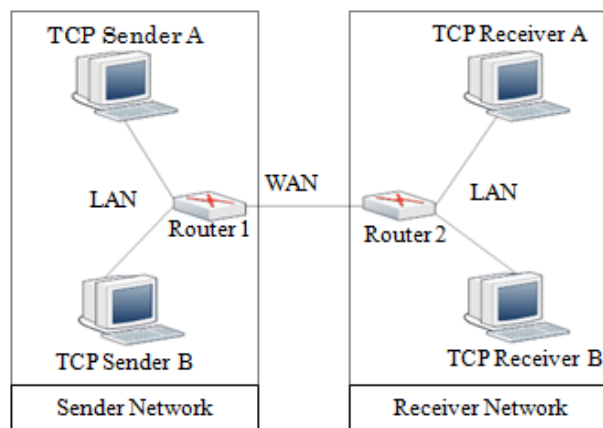
- **Ανθεκτικότητα** : Πολλές φορές κατά την διαδικασία αλληλεπίδρασης των συστημάτων προκύπτουν τυχαία σφάλματα αλλά και σταθερά, το δίκτυο θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο να είναι ανθεκτικό σε διακοπές και αστοχίες των σημάτων μετάδοσης, προκειμένου το σύστημα να συνεχίσει την λειτουργία του ακόμη και αν ορισμένα στοιχεία του αποτύχουν.
- **Ασφάλεια** : Το δίκτυο και πιο συγκεκριμένα το πρωτόκολλο που χρησιμοποιεί, θα πρέπει να παρέχει την δυνατότητα πρόληψης σφαλμάτων και παραβιάσεων των δεδομένων που μεταδίδονται. Επίσης, να είναι ικανό να εντοπίσει μη εξουσιοδοτημένες προσβάσεις, και να κάνει τακτικούς ελέγχους για τον εντοπισμό παραβιάσεων του συστήματος.
- **Επεκτασιμότητα** : Τα δίκτυα επικοινωνίας θα πρέπει να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες του συστήματος, όπως το φάσμα του και την

πολυπλοκότητά του. Ακόμα και αν σε αρχικό στάδιο το κυβερνοφυσικό σύστημα είναι απλοϊκό και μικρό σε μέγεθος, το δίκτυο επικοινωνίας που θα επιλεγεί θα πρέπει να είναι συμβατό με ένα σύστημα πιο απαιτητικό καθώς στην πάροδο του χρόνου μπορούν να προστεθούν περισσότερες συσκευές που είναι πιο σύνθετες και που μεταδίδουν πληροφορίες μεγαλύτερου όγκου.

Τα δίκτυα επικοινωνίας μπορούν να επιτρέπουν τη μετάδοση και την λήψη δεδομένων ενσύρματα ή ασύρματα. Στα κυβερνοφυσικά συστήματα χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι δικτύων επικοινωνίας, μερικοί βασικοί είναι :

1. Controller Area Network (CAN) – ISO-11898 : Πρόκειται για ένα σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτείται κατανεμημένη επικοινωνία, πραγματικού χρόνου σε πολλές συσκευές. Το CAN επιτρέπει την συνδεσιμότητα πολλαπλών συσκευών μέσω ενός κοινού διαύλου, χρησιμοποιώντας ένα message-based μοντέλο επικοινωνίας. Ο τρόπος λειτουργίας του δικτύου είναι η επικοινωνία συσκευών με την χρήση μηνυμάτων μέσω του διαύλου. Κάθε μήνυμα περιέχει ένα αναγνωριστικό που καθορίζει τον τύπο των δεδομένων που αποστέλλονται. Οι συσκευές έχουν μεταξύ τους αμφίδρομη επικοινωνία. Το CAN χαρακτηρίζεται από το χαμηλό του κόστος, καθώς επιτρέπει στις ηλεκτρονικές μονάδες ελέγχου (ECU) να έχουν μια διεπαφή χρήσης αντί για αναλογικές και ψηφιακές εισόδους για κάθε μια συσκευή του συστήματος. Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του δικτύου είναι η χρήση ελεγκτή ο οποίος είναι ευφυής, δηλαδή ελέγχει τα μηνύματα που μεταδίδονται και έτσι βελτιστοποιεί την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών σε θέμα απόκρισης και πρόβλεψης σχετικών μηνυμάτων. Περαιτέρω, χρησιμοποιεί ντετερμινιστική επικοινωνία, καθώς γίνεται λήψη μηνυμάτων με βάση την προτεραιότητά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μηνύματα με την υψηλότερη προτεραιότητα να μεταδίδονται ανεξαρτήτως του πλήθους των υπόλοιπων μηνυμάτων, καθιστώντας το σύστημα μη καταστροφικό. Όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, το CAN δεν είναι σχεδιασμένο για να λειτουργεί σε μεγάλη εμβέλεια, για αυτό όσο υψηλότερος είναι ο ρυθμός μετάδοσης, τόσο μειώνεται η μέγιστη εμβέλεια, λόγω υποβάθμισης των frames εξαιτίας του θορύβου που δημιουργείται. Για την ασφάλεια του δικτύου και την προστασία από σφάλματα στα frames χρησιμοποιείται κώδικας κυκλικού πλεονασμού (CRC). Όταν βρεθεί κάποιο frame που έχει σφάλμα στο περιεχόμενό του, ο ελεγκτής το αναγνωρίζει και σηματοδοτεί το σφάλμα στο δίκτυο. Επίσης ο ελεγκτής έχει την δυνατότητα διάκρισης των σφαλμάτων σε Global και Local, και αντίστοιχα λαμβάνει μέτρα ασφάλειας, δηλαδή εξαναγκάζει τους αντίστοιχους κόμβους που μεταδίδουν λανθασμένα frames να σταματήσουν ή να αποσυνδεθούν εντελώς από το δίκτυο επικοινωνίας [31] [32].

2. Local Area Network (LAN) : Το τοπικό δίκτυο αναφέρεται σε ένα δίκτυο υπολογιστικών συστημάτων που επικοινωνούν μεταξύ τους σε ένα περιορισμένο εύρος εμβέλειας. Τα δίκτυα αυτά είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να παρέχουν γρήγορη επικοινωνία και να καθιστούν εύκολη την σύνδεση των συσκευών μεταξύ τους για την ανταλλαγή πόρων [33]. Χρησιμοποιείται ευρέως σε νοικοκυριά, επιχειρήσεις, βιομηχανίες καθώς και σε άλλους οργανισμούς. Ο τύπος δικτύου στα τοπικά δίκτυα μπορεί να είναι ενσύρματος ή ασύρματος ανάλογα με τις απαιτήσεις. Τα ενσύρματα LAN (WLAN) χρησιμοποιούν ethernet για την σύνδεση των συσκευών, οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε έναν μεταγωγέα δικτύου ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος δικτύωσης. Για την σύνδεση κάθε συσκευής στο κεντρικό δίκτυο απαιτείται ξεχωριστό καλώδιο, δημιουργώντας έτσι μια τοπολογία ενσύρματος δικτύου [34].

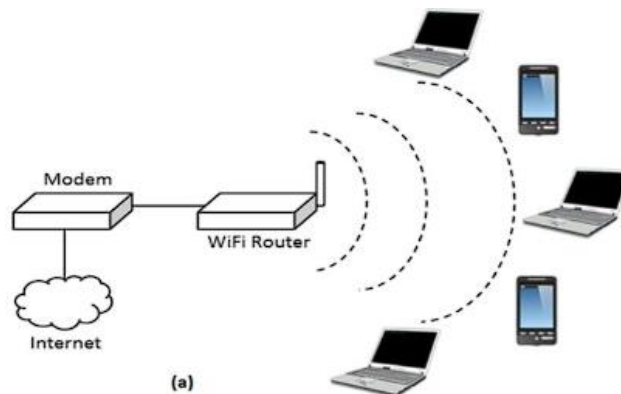


Πίνακας 3 : Τοπολογία ενσύρματος δικτύου

Το TCP αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στα LAN για την ασφαλή μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των συσκευών. Σε αρχικό στάδιο γίνεται η σύνδεση των συσκευών και έπειτα πραγματοποιείται η διαδικασία μετάδοσης των δεδομένων. Έτσι διασφαλίζεται ότι η μετάδοση των πακέτων πληροφορίας είναι αξιόπιστη και ότι το ποσοστό απώλειας δεδομένων είναι αρκετά χαμηλό. Όπως παρατηρούμε από το σχήμα 3 υπάρχει η κατηγορία υπολογιστικών συστημάτων που στέλνει δεδομένα (sender) και το σύστημα που τα λαμβάνει (Receiver). Η σειρά επικοινωνίας πραγματοποιείται με την συσκευή αποστολής μηνυμάτων να στέλνει πακέτα στην συσκευή λήψης

και έπειτα περιμένει το αντίστοιχο μήνυμα επιβεβαίωσης από τον receiver για να προχωρήσει η αποστολή του επόμενου πακέτου κ.ο.κ. Εάν δεν ληφθεί επιβεβαίωση, το πακέτο αποστέλλεται εκ νέου μέχρι να γίνει η παράδοση των δεδομένων και να γίνει η επιβεβαίωσή της [35].

Στα ασύρματα LAN (WLAN) η μετάδοση των δεδομένων γίνεται μέσω ενός πρωτοκόλλου ασύρματης δικτύωσης (802.11), όπως το Wi-Fi ή το MIMO. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν μέγιστο εύρος κάλυψης δεδομένων έως 90 ή 100 μέτρα. Ωστόσο παρέχουν ασφαλή και αποτελεσματική σύνδεση με ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας και υψηλή ταχύτητα απόκρισης [36]. Προκειμένου να γίνει η σύνδεση μεταξύ των συσκευών απαιτείται ένα ασύρματο σημείο πρόσβασης (WAP) το οποίο αναλαμβάνει την μετάδοση και την λήψη σημάτων στις ασύρματες συσκευές εντός εύρους ζώνης. Οι συσκευές αυτές θα πρέπει να είναι ικανές να πραγματοποιούν σύνδεση στο τοπικό δίκτυο μέσω του WAP στέλνοντας αίτημα για την σύνδεσή τους. Έπειτα πραγματοποιείται ένας έλεγχος ταυτότητας των συσκευών για την ασφάλεια του δικτύου. Έτσι οι συσκευές που επιθυμούν να συνδεθούν στο δίκτυο πρέπει να αναζητήσουν το SSID του δικτύου και να εισάγουν έναν κωδικό πρόσβασης. Η ροή πληροφορίας του δικτύου πριν την σύνδεση είναι κρυπτογραφημένη για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης. Αφού πιστοποιηθεί η συσκευή και συνδεθεί στο δίκτυο, αποκτά μια αποκλειστική διεύθυνση IP. Έτσι δημιουργείται η επικοινωνία με άλλες συσκευές στο τοπικό δίκτυο, αποκτώντας πρόσβαση σε κοινόχρηστους πόρους (π.χ αρχεία) [37].



Πίνακας 4 : Τοπολογία ασύρματου δικτύου

3. Zigbee : Το Zigbee αποτελεί ένα πρότυπο ασύρματης επικοινωνίας που λειτουργεί στην ζώνη των 2.4 GHz και πρόκειται για ένα δίκτυο χαμηλής ισχύος. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται πολλά pathways, για την μετάδοση των δεδομένων, αμφίδρομα μεταξύ των συσκευών. Στο Zigbee, χρησιμοποιούνται τρεις βασικές τοπολογίες δικτύου. Στο δίκτυο πλέγματος δεν υπάρχει ιεραρχική τυπολογία, δηλαδή οποιαδήποτε συσκευή συσκευή έχει την δυνατότητα να επικοινωνήσει με μια άλλη. Στην τυπολογία του τύπου αστέρα, υπάρχει η συσκευή-συντονιστής (master) και οι υπόλοιπες συσκευές που

επικοινωνούν μόνο με αυτόν (slaves). Στην τυπολογία δέντρου, υπάρχει ιεραρχική διάταξη, καθώς ο συντονιστής είναι η ρίζα του δέντρου και τα κλαδιά είναι στοιχεία που επικοινωνούν με αυτόν και υποτάσσονται στις εντολές του [38]. Συνήθως στην τοπολογία αυτή υπάρχουν καθυστερήσεις στην απόκριση του δικτύου. Η δυνατότητα του Zigbee να λειτουργεί με χαμηλή ισχύ, το καθιστά ιδανικό για χρήση σε συσκευές που απαιτούν ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η χαμηλή ισχύ προκαλεί και χαμηλό ρυθμό δεδομένων. Για την ασφάλεια του δικτύου χρησιμοποιείται κρυπτογράφηση 128-bit, αλγόριθμος AES (Advanced Encryption Standard), ο οποίος παρέχει έλεγχο ταυτότητας των μεταδιδόμενων πακέτων στον διακομιστή αλλά και στις τελικές συσκευές. Το Zigbee στον τομέα της ασφάλειας είναι αρκετά ευέλικτο καθώς μπορεί να λάβει ενημερώσεις υλικολογισμικού over-the-air, χωρίς την ανάγκη φυσικής παρέμβασης [39].

4. LoRaWAN (Low Power Wide Area Networking) : Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας σχεδιασμένο για εφαρμογές IoT και μεταδίδει δεδομένα σε μεγάλη εμβέλεια, ενώ παρέχει επίσης χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το LoRaWAN προκύπτει από την χρήση φυσικού στρώματος LoRa που επιτρέπει την μετάδοση της πληροφορίας σε μια μεγάλη εμβέλεια [40]. Το πρωτόκολλο λειτουργεί, βασισμένο στην τοπολογία του αστέρα, όπου ο κεντρικός διακομιστής λαμβάνει δεδομένα από τις τελικές συσκευές μέσω gateways. Οι συσκευές αυτές επικοινωνούν μόνο με τον κεντρικό διακομιστή. Περαιτέρω, οι συσκευές για εξοικονόμηση ενέργειας μεταδίδουν δεδομένα και επικοινωνούν με το δίκτυο μόνο όταν έχουν ληφθεί νέα δεδομένα για αποστολή. Τα δεδομένα αυτά ελέγχονται από τα φίλτρα προστασίας του διακομιστή. Εάν είναι αξιόπιστα και ασφαλή, προωθούνται στους διακομιστές εφαρμογών. Το LoRaWAN χρησιμοποιείται ευρέως, σε εφαρμογές εξωτερικού χώρου όπου απαιτείται χαμηλός ρυθμός δεδομένων και υπάρχουν μεγάλες αποστάσεις, με πιθανά εμπόδια στη διαδρομή του σήματος που μεταδίδεται μεταξύ των συσκευών [41].

Πρωτόκολλο επικοινωνίας	Συχνότητα	Εύρος Ζώνης - Bandwidth	Εμβέλεια	Κατανάλωση Ενέργειας
Controller Area Network	Σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας, που σημαίνει ότι τα δεδομένα μεταδίδονται σε Bit. Θεωρητικά, ο πραγματικός ρυθμός δεδομένων είναι μικρότερος από το Bandwidth.	125 Kbps / 1 Mbps	500 m / 40 m	Χαμηλή

Local Area Network	(2.4, 5, 60) GHz	(10, 100) Mbps/ (1, 10) Gbps	100 m	Υψηλή
Zigbee	2.4 Ghz , (784,868) MHz , 915 MHz	250 kbps	300 m	Χαμηλή
LoRaWAN	(430/433/868/915) MHz	0.3 - 50 Kbps	15-30 km	Χαμηλή

Πίνακας 5 : Συγκεντρωτικά στοιχεία προαναφερόμενων πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

2.3.6 Διεπαφή χρήστη – User Interface

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας τα περισσότερα κυβερνοφυσικά συστήματα λειτουργούν πλέον αυτόνομα. Όμως, πολλές φορές απαιτείται ένας χρήστης για την διαχείριση, τον έλεγχο και την ανάπτυξη του συστήματος. Ο χρήστης αναλαμβάνει ευθύνες για την διόρθωση σφαλμάτων, την συντήρηση και τον έλεγχο του υπολογιστικού συστήματος, για αυτό θα πρέπει να παρέχεται η ικανότητα του συστήματος να επικοινωνεί άμεσα με τον χρήστη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διεπαφής χρήστη (User Interface). Ο όρος αυτός, αναφέρεται στα στοιχεία (hardware και software) ενός συστήματος που επιτρέπουν την αλληλεπίδραση της μηχανής με τον χρήστη και αντίστροφα. Σκοπός της διεπαφής χρήστη είναι, η εκχώρηση εντολών στο λογισμικό του συστήματος και να λαμβάνουν την ανάλογη ανατροφοδότηση από αυτό. Επίσης, όλη αυτή η διαδικασία θα πρέπει να είναι άμεση, αποτελεσματική και ικανοποιητική ως προς τον χρήστη. Για αυτόν τον λόγο στη ανάπτυξη διαδραστικών συστημάτων, λαμβάνεται σημαντικά υπόψη η ευχρηστία και ο ανθρωποκεντρικός σχεδιασμός. Με τον όρο ευχρηστία στα διαδραστικά συστήματα προσδιορίζεται η ικανότητα του συστήματος να είναι αποτελεσματικό και αποδοτικό ως προς τους χρήστες του. Η ανθρωποκεντρική σχεδίαση, αποτελεί ένα πλάνο σχεδιασμού της διεπαφής χρήστη, με γνώμονα τις ανάγκες του χρήστη. Προκειμένου ο χρήστης να εκχωρήσει εισόδους στο υπολογιστικό σύστημα χρησιμοποιεί μια συσκευή εισόδου. Αυτή η συσκευή ή αλλιώς μετατροπέας, έχει την δυνατότητα να λαμβάνει φυσικά ερεθίσματα από το περιβάλλον και να τα εκχωρεί σε ψηφιακή μορφή στο σύστημα. Μερικές από τις πιο σύνηθες σε χρήση συσκευές εισόδου είναι : πληκτρολόγιο, ποντίκι, γραφίδα και οθόνες αφής. Για να έχει ανατροφοδότηση ο χρήστης από το σύστημα χρησιμοποιούνται συσκευές εξόδου. Στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα για έξοδο χρησιμοποιούν οθόνες. Υπάρχουν πολλά είδη οθονών όπως LCD, LED, και για κάθε εφαρμογή χρησιμοποιείται ο καταλληλότερος τύπος. Για παράδειγμα σε μια υπαίθρια εφαρμογή, όπου τις πρωινές ώρες θα υπάρχει έντονο φως, η χρήση οθόνης LED είναι μια ορθή επιλογή καθώς παράγουν παραπάνω φωτεινότητα από τις LCD. Επίσης, συσκευή εξόδου αποτελούν και τα ηχεία τα οποία με την χρήση ηχητικών

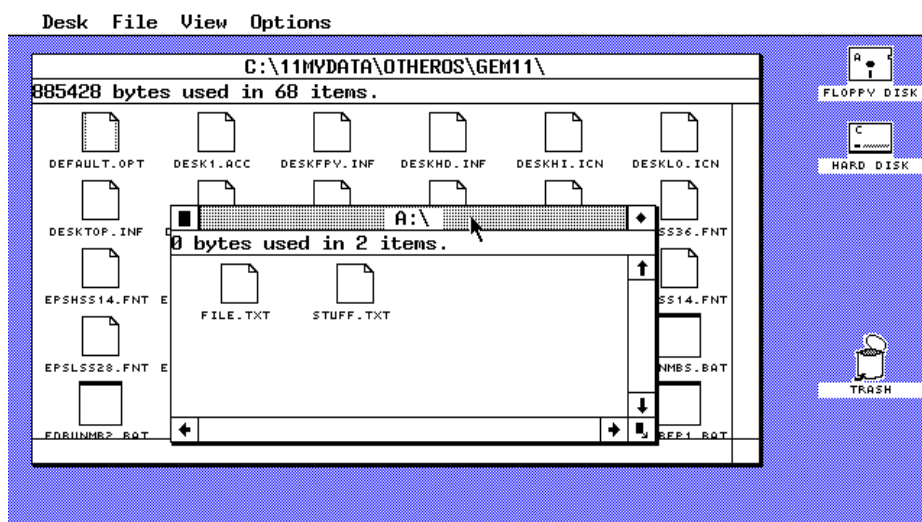
σημάτων ενημερώνουν τον χρήστη για την κατάσταση του συστήματος. Όσον αφορά την διεπαφή χρήστη, ο σχεδιασμός της είναι αρκετά κρίσιμος καθώς μπορεί να καθορίσει την ικανοποίηση των χρηστών και επομένως την παραγωγικότητά τους. Επίσης, επιδρά στην διευκόλυνση της χρήσης του λογισμικού και μειώνει τον κίνδυνο από σφάλματα που μπορεί να προκύψουν. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δύο μορφές διεπαφές χρήστη, οι γραφικές (GUI-Graphical User Interface) και του τύπου γραμμών εντολών (CLI-Command Line Interface) [42]. Στις γραφικές υπάρχει άμεση αλληλεπίδραση με απευθείας χειρισμό από τον χρήστη, καθώς τα αντικείμενα ενδιαφέροντος του χρήστη παραστώνται γραφικά στην οθόνη του, είτε με την μορφή εικόνων, παραθύρων, κουμπιών είτε ως μενού. Τις περισσότερες φορές, χρησιμοποιείται γραφική αναπαράσταση όπου είναι δυνατόν για τον τρόπο αλληλεπίδρασης, καθώς είναι πιο βαθιά η κατανόηση λειτουργία της, υπάρχει άμεση αποτελεσματικότητα στις ενέργειες του χρήστη, και οι ενέργειες αυτές είναι αντιστρεπτές. Απο την άλλη πλευρά, η χρήση γραμμών εντολών, βασίζεται στη μορφή κειμένου όπου ο χρήστης είναι αναγκασμένος να εισάγει εντολές, χρησιμοποιώντας μια συσκευή εισόδου (πληκτρολόγιο). Η μέθοδος αυτή παρέχει σημαντικό πλεονέκτημα στο πόσο γρήγορα και αποτελεσματικά ο χρήστης εκτελεί πολύπλοκες λειτουργίες. Ωστόσο, ο χρήστης θα πρέπει να είναι έμπειρος, καθώς ο χειρισμός μέσω εντολών για άπειρους χρήστες είναι ακατάλληλος, διότι θα πρέπει να γνωρίζουν την γλώσσα προγραμματισμού σε ένα καλό επίπεδο, και αυτό απαιτεί μακροχρόνια εκπαίδευση.

```

root@localhost:~# ping -q fo.wikimedia.org
PING fo.wikimedia.org (209.69.152.21) 56(84) bytes of data:
60 packets transmitted, 1 received, 99% packet loss, Time 0ms
rtt min/avg/max/mdev = 540.528/540.529/540.528/0.000 ms
root@localhost:~# pwd
/root
root@localhost:~# cd /var
root@localhost:~# ls -la
total 72
drwxr-xr-x. 18 root root 4096 Jul 30 22:43 .
drwxr-xr-x. 23 root root 4096 Sep 14 20:42 ..
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 account
drwxr-xr-x. 11 root root 4096 Jul 31 22:26 cache
drwxr-xr-x. 3 root root 4096 May 18 16:03 db
drwxr-xr-x. 3 root root 4096 May 18 16:03 empty
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 games
drwxr-xr-x. 2 root gdm 4096 Jun 2 18:39 gdm
drwxr-xr-x. 38 root root 4096 May 18 16:03 lib
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 local
lrwxrwxrwx. 1 root root 11 May 14 00:12 lock -> ../run/lock
drwxr-xr-x. 14 root root 4096 Sep 14 20:42 log
lrwxrwxrwx. 1 root root 10 Jul 30 22:43 mail -> spool/mail
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 misc
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 opt
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 preserve
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 Jul 1 22:11 report
lrwxrwxrwx. 1 root root 6 May 14 00:12 run -> ../run
drwxr-xr-x. 14 root root 4096 May 18 16:03 spool
drwxr-xr-x. 4 root root 4096 Sep 14 20:43 ssh
drwxr-xr-x. 2 root root 4096 May 18 16:03 yp
root@localhost:~# yum search wiki
Loaded plugins: langpacks, presto, refresh-packagekit, remove-with-leaves
repulsion-free-updates                               | 2.7 kB    00:00
repulsion-free-updates/primary_db                   | 206 kB   00:04
repulsion-free-updates                               | 2.7 kB    00:00
updates/metaline                                    | 5.9 kB   00:00
updates                                              | 4.7 kB   00:00
updates/primary_db                                  | 79% [#####] | 62 kB/s | 2.6 MB 00:15 ETA

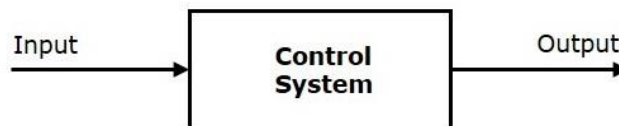
```

Πίνακας 6 : Command Line Interface



2.4 Επισκόπηση υφιστάμενων συστημάτων ελέγχου

Τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, υπάρχει μεγάλη πρόοδος στις εφαρμογές των κυβερνοφυσικών συστημάτων και ταυτόχρονα ο έλεγχος σε σύνθετα συστήματα γίνεται πιο δύσκολος και απαιτητικός. Προκειμένου τα συστήματα να λειτουργούν με ακρίβεια και αποδοτικότητα, απαραίτητη είναι η χρήση συστημάτων ελέγχου. Τα κυβερνοφυσικά συστήματα χρησιμοποιούν συστήματα ελέγχου για τον έλεγχο και την διαχείριση της συμπεριφοράς των φυσικών διεργασιών του συστήματος. Τα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούνται σε πολλές βιομηχανίες, σε τομείς του ποιοτικού ελέγχου, σε γραμμές συναρμολόγησης και στον έλεγχο εργαλειομηχανών. Δηλαδή, σε τομείς που πρέπει να ελέγχονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα, καθώς οι επιδόσεις τους μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά το τελικό προϊόν, προκαλώντας κόστος για την επιχείρηση. Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος ελέγχου είναι: τα στοιχεία που έχει ως στόχο να ελέγξει, τα χαρακτηριστικά του και το αποτέλεσμα της εξόδου του, δηλαδή το αποτέλεσμα των ενεργειών του. Πολλές φορές, τα στοιχεία αυτά και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση, μπορούν να αναπαρασταθούν γραφικά σε ένα μπλοκ διάγραμμα [43].



Πίνακας 8 : Βασικά στοιχεία ενός συστήματος ελέγχου

Έχουν αναπτυχθεί αρκετά συστήματα ελέγχου προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες των διαφόρων εργασιών, και το κάθε ένα έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.

2.4.1 Συστήματα ελέγχου ανατροφοδότησης

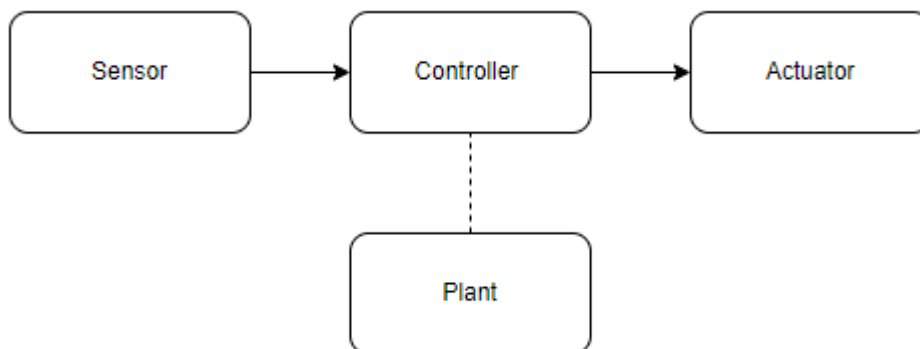
Η βασική λειτουργία της ανατροφοδότησης σε ένα σύστημα είναι ο συνεχής έλεγχος της εξόδου του συστήματος, καθώς και η σύγκριση της με μια τιμή που ορίζει ο χρήστης. Η ανατροφοδότηση χρησιμοποιείται κυρίως για την εξάλειψη των σφαλμάτων μεταξύ των τιμών εισόδου και εξόδου. Ένα σύστημα ελέγχου ανατροφοδότησης, ενισχύει την σταθερότητα, την ευαισθησία και το συνολικό κέρδος ως προς την έξοδο του. Αυτός ο τύπος συστήματος ελέγχου βασίζεται στις μετρήσεις των αισθητήρων του περιβάλλοντος για την προσαρμογή της εξόδου, διασφαλίζοντας έτσι την ορθή λειτουργία του συστήματος. Για την ανάδραση του συστήματος χρησιμοποιείται ένας βρόχος ελέγχου. Η αρχή λειτουργίας είναι η εισαγωγή πληροφοριών στον ελεγκτή του συστήματος από τους αισθητήρες. Ο ελεγκτής συγκρίνει τις πληροφορίες με την επιθυμητή τιμή ή το σημείο ρύθμισης που έχει οριστεί. Έπειτα, υπολογίζει το σφάλμα, το οποίο είναι η διαφορά της τιμής εισόδου με την επιθυμητή τιμή. Στη συνέχεια ο ελεγκτής στέλνει σήμα στον ενεργοποιητή προκειμένου να ρυθμίσει την είσοδο του συστήματος, στην περίπτωση που το σφάλμα δεν βρίσκεται στα επιθυμητά πλαίσια [44]. Η συμπεριφορά ενός συστήματος με ανατροφοδότηση μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τον εξής τύπο :

$$G(s) = C(s)P(s) / (1+C(s)P(s)H(s))$$

Στον παραπάνω τύπο περιγράφεται η σχέση εισόδου και εξόδου του συστήματος με την χρήση συναρτήσεων μεταφοράς. Πιο αναλυτικά οι συναρτήσεις μεταφοράς :

- $G(s)$: Συστήματος
- $C(s)$: Ελεγκτή – Παρέχει σταθερότητα, ταχύτητα απόκρισης και ακρίβεια παρακολούθησης στο σύστημα.
- $P(s)$: (Plant) Εγκατάστασης – Αντιπροσωπεύει την συμπεριφορά της φυσικής διεργασίας που ελέγχεται και μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις.
- $H(s)$: Βρόχου ανάδρασης – Ορίζει την επίδραση που έχει ο βρόχος στη λειτουργία του συστήματος και πολλές φορές αντιπροσωπεύεται από την συνάρτηση μεταφοράς του αισθητήρα.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ενός συστήματος με ανάδραση :



Πρόκειται για ένα ένα διάγραμμα, όπου η έξοδος της εγκατάστασης (Plant), μετράται από τον αισθητήρα ο οποίος δίνει τιμές στον ελεγκτή. Στον ελεγκτή γίνεται σύγκριση της πραγματικής τιμής με την επιθυμητή και υπολογίζεται το σφάλμα, το οποίο μετέπειτα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εισόδου. Ο ενεργοποιητής αφού λάβει την είσοδο από τον ελεγκτή, δηλαδή το σφάλμα που προκύπτει, εκτελεί ρυθμίσεις στη φυσική διεργασία, η οποία παράγει μια νέα έξοδο που διαβάζεται από τους αισθητήρες. Ο κύκλος συνεχίζεται μέχρι την επιθυμητή μεταβολή των φυσικών διεργασιών που ελέγχονται. Η συνάρτηση μεταφοράς αυτού του συστήματος υπολογίζεται ως εξής :

$$G(s) = Y(s) / E(s)$$

Όπου $Y(s)$ και $E(s)$ είναι μετασχηματισμοί Laplace της εξόδου και του σφάλματος. Με αυτή την συνάρτηση δίνεται η δυνατότητα, εύρεσης εκείνων των μεταβλητών που θα κάνουν πιο αποδοτικό και σταθερό το σύστημα. Επίσης με την χρήση αυτής της συνάρτησης μπορούν να υπολογιστούν τα κέρδη του ελεγκτή. Τα κέρδη είναι παράμετροι που προσαρμόζουν την συμπεριφορά του ελεγκτή σε ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης. Παραδείγματος χάρη, σε έναν αναλογικό ελεγκτή υπάρχει το αναλογικό κέρδος (Proportional Gain) και το ολοκληρωτικό κέρδος (Integral Gain), εν συντομία K_p και K_i . Το K_p προσδιορίζει την ισχύ της απόκρισης στο σήμα σφάλματος. Αυξάνοντας την μεταβλητή K_p , θα υπάρξει ισχυρότερη απόκριση και μικρότερος χρόνος για την διόρθωση του σφάλματος. Ωστόσο, μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα υπερπήδησης και σε ταλαντώσεις των σημάτων. Για αυτό θα πρέπει πάντα να υπολογίζεται η ιδανική τιμή, λαμβάνοντας υπόψη άλλες παραμέτρους του συστήματος. Το ολοκληρωτικό κέρδος K_i , ορίζει την ισχύ απόκρισης στο ολοκλήρωμα του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου. Δίνοντας υψηλότερη τιμή K_i , θα αυξηθεί ο ρυθμός διόρθωσης του σφάλματος με την πάροδο του χρόνου, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αστάθεια, αν ρυθμιστεί πολύ υψηλά. Σε ένα αναλογικό ελεγκτή με ανάδραση, υπάρχει και το κέρδος παραγώγου (Derivative Gain) ή K_d . Αυτό το κέρδος ορίζει την ισχύ απόκρισης στον ρυθμό μεταβολής του σφάλματος. Μια υψηλή τιμή διορθώνει τις υπερβάσεις και τις ταλαντώσεις, αλλά μπορεί να κάνει το σύστημα πιο ευάλωτο στο θόρυβο προκαλώντας έτσι περισσότερα σφάλματα στις μετρήσεις [45].

Τα συστήματα ελέγχου ανατροφοδότησης ταξινομούνται συνήθως με τις απαιτήσεις και τον κύριο σκοπό του συστήματος. Ανάλογα με την μέθοδο του σχεδιασμού τα συστήματα ελέγχου μπορούν να ταξινομηθούν ως γραμμικά, μη γραμμικά και χρονικά μεταβαλλόμενα ή χρονικά αμετάβλητα.

1. Γραμμικά – Μη γραμμικά συστήματα ελέγχου : Στην πραγματικότητα τα γραμμικά συστήματα δεν υφίστανται, λόγω του ότι όλα τα φυσικά συστήματα είναι κατά ένα μεγάλο μέρος τους μη γραμμικά. Τα μη γραμμικά συστήματα με πολύπλοκη δυναμική είναι εξαιρετικά δύσκολο να αναλυθούν και να ελεγχθούν. Για αυτό τον λόγο, χρησιμοποιείται η τεχνική της γραμμικοποίησης προκειμένου ένα σύστημα να μετατραπεί σε γραμμικό, ώστε να γίνει πιο εύκολος ο σχεδιασμός του ελεγκτή. Η βασική λειτουργία πίσω από την

γραμμικοποίηση ενός συστήματος με ανάδραση, είναι η χρήση ενός νόμου ελέγχου ανάδρασης, που έχει την δυνατότητα να ακυρώσει τις μη γραμμικότητες του συστήματος. Τα γραμμικά συστήματα ελέγχου εκφράζουν την σχέση εισόδου-εξόδου με γραμμικές εξισώσεις, οι οποίες μπορούν να αναπαρασταθούν με την μορφή πινάκων ή διανυσμάτων. Δηλαδή, μπορεί εύκολα να γίνει πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος σε μια δεδομένη είσοδο με την χρήση γραμμικής άλγεβρας. Η τεχνική της γραμμικοποίησης βασίζεται σε δύο βασικά βήματα :

- a. Χρήση μετασχηματισμού συντεταγμένων για τον μετασχηματισμό σε γραμμικό σύστημα
- b. Σχεδιασμός γραμμικού ελεγκτή για τον έλεγχο του μετασχηματισμένου συστήματος.

Προκειμένου να παραμετροποιηθεί και να ελεγχθεί η λειτουργία του συστήματος, γίνεται ανάλυση της συνάρτησης μεταφοράς [46]. Έτσι οι αναλυτές του συστήματος μπορούν να προβλέψουν αρκετά εύκολα την απόκριση του συστήματος σε διαφορετικές εισόδους και να αναπτύξουν ελεγκτές ικανούς για την ρύθμιση της συμπεριφοράς του συστήματος. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι η γραμμικοποίηση συστημάτων με ανάδραση, απαιτεί ακριβές γνώση του συστήματος, και ο σχεδιασμός του ελεγκτή πρέπει να τροποποιηθεί ανάλογα. Υπάρχουν αρκετοί τύποι ελεγκτών που χρησιμοποιούνται σε γραμμικά συστήματα, μερικοί είναι :

- Αναλογικοί-Ολοκληρωτικοί-Διαφορικοί ελεγκτές (PID) : Οι ελεγκτές αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές ελέγχου και βελτιώνουν την απόκριση του συστήματος, με την χρήση του ρυθμού μεταβολής του σφάλματος.
- State feedback controllers : Βασική αρχή λειτουργίας τους είναι η χρήση βρόχου ανάδρασης για την ρύθμιση της συμπεριφοράς του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρούμενες μεταβλητές κατάστασης. Σχεδιάζονται με γνώμονα το μοντέλο του χώρου κατάστασης (state) και μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερα επίπεδα απόδοσης από του υπόλοιπους γραμμικούς ελεγκτές. Απο την άλλη μεριά όμως απαιτούν πλήρες γνώση της κατάστασης του συστήματος.
- Output feedback controllers : Οι ελεγκτές ανατροφοδότησης εξόδου, χρησιμοποιούν μόνο την μετρούμενη έξοδο για να ρυθμίσουν την συμπεριφορά του συστήματος. Βρίσκουν εφαρμογή σε συστήματα όπου οι μεταβλητές κατάστασης του συστήματος δεν είναι άμεσα μετρήσιμη.

Όλοι οι παραπάνω ελεγκτές σχεδιάζονται για να ρυθμίζουν τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος, όπως την απόδοση, την ευστάθεια και την απόρριψη διαταραχών [47].

Απο την άλλη μεριά στα μη γραμμικά συστήματα η σχέση εισόδου-εξόδου είναι μη αναλογική. Μπορούν να αναπαρασταθούν μαθηματικά με την χρήση μη διαφορικών εξισώσεων, καθιστώντας την επίλυση των εξισώσεων αυτών συχνά μια πρόκληση. Σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, τα μη γραμμικά δεν ακολουθούν την αρχή της επαλληλίας. Ο σχεδιασμός ενός μη γραμμικού ελέγχου είναι πολλές φορές αρκετά δύσκολος και με πολλές απαιτήσεις, λόγω της πολυπλοκότητας των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της συμπεριφοράς του συστήματος. Παρα αυτό το γεγονός αποτελεί βασικό πεδίο μελέτης για πολλές μηχανολογικές εφαρμογές, καθώς τα περισσότερα φυσικά συστήματα παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Προκειμένου να γίνει ο σχεδιασμός ενός μη γραμμικού συστήματος χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές. Όταν οι παράμετροι ενός συστήματος είναι χρονικά μεταβαλλόμενες, χρησιμοποιείται η τεχνική του προσαρμοστικού ελέγχου (Adaptive Control). Στην τεχνική αυτή γίνεται χρήση ενός προσαρμοστικού αλγορίθμου ο οποίος ρυθμίζει τις παραμέτρους του ελεγκτού σε πραγματικό χρόνο, με γνώμονα την μετρούμενη έξοδο του συστήματος [48]. Στόχος είναι η επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης, καθώς διατηρείται η σταθερότητα του συστήματος.

Συνοψίζοντας, η μετατροπή μη γραμμικών συστημάτων σε γραμμικά είναι αρκετά σημαντική. Καθώς τα γραμμικά συστήματα προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία στην ανάλυση και τον έλεγχο ποικίλων συστημάτων στην σύγχρονη εποχή.

Παρακάτω δίνεται ένας πίνακας που ορίζει τις βασικές διαφορές των γραμμικών και των μη γραμμικών συστημάτων.

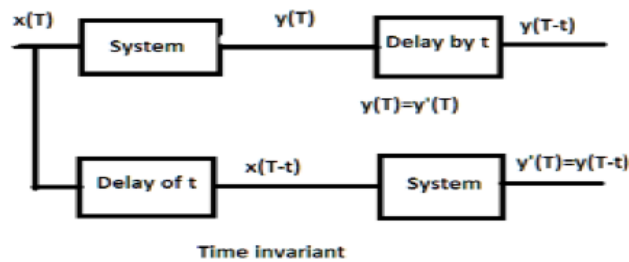
Χαρακτηριστικό	Γραμμικά Συστήματα	Μη Γραμμικά Συστήματα
Είσοδος - Έξοδος	Αναλογική	Μη αναλογική
Αρχή της επαλληλίας	Χρησιμοποιείται	Δεν χρησιμοποιείται
Μαθηματική μοντελοποίηση	Γραμμικές διαφορικές εξισώσεις	Μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις
Σχεδιασμός ελέγχου	Γραμμικές τεχνικές ελέγχου	Ειδικές μη γραμμικές τεχνικές ελέγχου
Ανάλυση σταθερότητας	Εφικτή	Αρκετά δύσκολη
Συμπεριφορά συστήματος	Προβλέψιμη	Πολύπλοκη - Απρόβλεπτη

Μηχανολογικές εφαρμογές	Αυτοκινητοβιομηχανία / Ηλεκτρικά Συστήματα	Χημικά - Βιολογικά Συστήματα
-------------------------	--	------------------------------

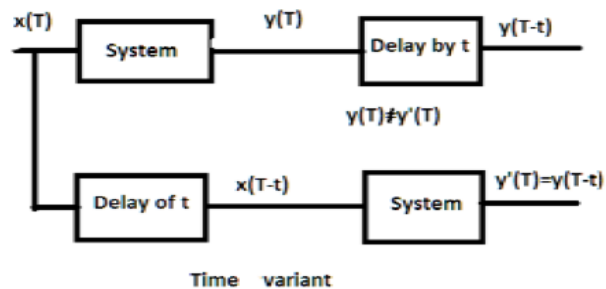
Πίνακας 9 : Διαφοροποίηση Γραμμικού με Μη γραμμικού συστήματος ελέγχου

2. Χρονικά μεταβαλλόμενα – αμετάβλητα συστήματα ελέγχου : Τα χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα, αποτελούν συστήματα ελέγχου με χρονικά μεταβλητή δυναμική κατά την διαδικασία λειτουργίας του συστήματος. Τις περισσότερες φορές τα στοιχεία του περιβάλλοντος παρουσιάζουν μεταβολές με την πάροδο του χρόνου. Τέτοια στοιχεία μπορεί να είναι η μάζα ενός αντικειμένου ή η θερμοκρασία ενός σημείου. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση του ελέγχου και προκαλούν αστάθεια. Έτσι, ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένος, προκειμένου να προσαρμόζεται στις μεταβολές που υφίστανται τα στοιχεία του συστήματος [49]. Ο ελεγκτής χρησιμοποιεί πολύπλοκες τεχνικές για την επίλυση του προβλήματος, όπως : Προσαρμοστικός έλεγχος, έλεγχος ολίσθησης και πρόβλεψης. Ο προσαρμοστικός έλεγχος αποσκοπεί στην επεξεργασία των παραμέτρων ελέγχου με γνώμονα την εκτιμώμενη τιμή. Ως αποτέλεσμα, η υπολογιστική μονάδα έχει την δυνατότητα να υποστηρίζει την λειτουργία του συστήματος απέναντι σε χρονικά μεταβαλλόμενα στοιχεία. Ο έλεγχος πρόβλεψης χρησιμοποιεί έναν νόμο ελέγχου, ο οποίος ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους, για να προβλέψει την συμπεριφορά του σε κάποιο χρονικό διάστημα. Τα χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των γραμμικών συστημάτων, ωστόσο είναι αρκετά απαιτητικά και πολύπλοκα ως προς την σχεδίασή τους σε σχέση με τα γραμμικά χρονικά αμετάβλητα συστήματα ελέγχου. Απο την άλλη μεριά τα χρονικά αμετάβλητα συστήματα ελέγχου έχουν παραμέτρους σταθερές με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που καθιστά τις παραμέτρους του ελεγκτή σταθερές, χωρίς να γίνει ανάλυση για τυχόν αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος. Οι τεχνικές ελέγχου είναι λιγότερο απαιτητικές, και συνήθως χρησιμοποιούνται PID controllers και έλεγχος με ανατροφοδότηση, για την χρήση αυτών των τεχνικών. Ο έλεγχος με PID controllers πραγματοποιείται με την κλασική τεχνική σύγκρισης της επιθυμητής τιμής με της μετρούμενης, προσαρμόζοντας την έξοδο του ελεγκτή ανάλογα με το μετρούμενο σφάλμα. Ο έλεγχος με την τεχνική της ανατροφοδότησης χρησιμοποιεί την κατάσταση ολόκληρου του συστήματος για την επίλυση του νόμου ελέγχου, ο οποίος προσφέρει καλύτερη επίδοση σε σχέση με τον PID, σε περίπτωση που είναι εφικτή η ανάλυση της δυναμική του συστήματος [50]. Παρα το γεγονός ότι τα χρονικά αμετάβλητα συστήματα έχουν γενικά πιο απλή λειτουργία σε σχέση με τα χρονικά μεταβαλλόμενα, ενδέχεται να μην είναι άξια εφαρμογής σε συστήματα που δεν είναι εύκολη η περιγραφή και η ανάλυση της κατάστασής τους. Σε μια τέτοια περίπτωση θα είναι υποχρεωτική χρήση προηγμένων τεχνικών ελέγχου, όπως

αυτές που προαναφέρθηκαν, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή απόδοση ελέγχου.



Πίνακας 10 : Αναπαράσταση χρονικά αμετάβλητου συστήματος ελέγχου



Πίνακας 11 : Αναπαράσταση χρονικά μεταβαλλόμενου συστήματος ελέγχου

2.4.2 Συστήματα κλειστού/ανοικτού βρόχου – Open/Closed Loop Systems

Η κατανόηση των διαφορών που έχουν τα συστήματα ελέγχου κλειστού και ανοικτού βρόχου μεταξύ τους είναι αρκετά σημαντική, για να γίνει η σωστή επιλογή και ενσωμάτωση του συστήματος σε μια εφαρμογή. Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του κάθε συστήματος, τα πλεονεκτήματα, τα μειονεκτήματά τους, οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται, καθώς και μια σύγκριση των επιδόσεών τους.

- Ανοικτού βρόχου : Τα συστήματα ελέγχου ανοικτού βρόχου, λειτουργούν δίχως ανατροφοδότηση στην έξοδο, δηλαδή η έξοδος του δεν χρησιμοποιείται για την τροποποίηση του σήματος εισόδου. Για αυτό τον λόγο ονομάζονται και ως Non-Feedback systems καθώς δεν παρουσιάζουν την λειτουργία της ανατροφοδότησης. Συμπερασματικά το σήμα εισόδου είναι πάντα

προκαθορισμένο και το σύστημα απλώς ανταποκρίνεται στην είσοδο με τον τρόπο που έχει σχεδιαστεί. Συνήθως, η σχεδίαση του συστήματος ανοικτού βρόχου είναι αρκετά απλή. Τα βασικά στοιχεία που το απαρτίζουν είναι ο ελεγκτής και την διεργασία που επεξεργάζεται. Ο τρόπος λειτουργίας του ελεγκτή είναι αρκετά απλός. Αρχικά, λαμβάνει ένα σήμα εισόδου, με το πέρας της διαδικασίας ελέγχου στην έξοδο του στέλνει ένα σήμα ενεργοποίησης, με σκοπό να γίνει έλεγχος της φυσικής διεργασίας προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η διαδικασία ελέγχου μπορεί να ενισχύσει το σήμα (ενισχυτής), να το φιλτράρει (φίλτρο) ή να το επεξεργαστεί με διάφορους τρόπους χρησιμοποιώντας άλλα στοιχεία ελέγχου. Εάν η διαδικασία απαιτεί ισχυρή υπολογιστική δύναμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μικροεπεξεργαστής. Καθώς το σύστημα ανοικτού βρόχου μπορεί να σχεδιαστεί με αρκετά μικρό κόστος, χρησιμοποιείται συχνά σε απλοϊκές εφαρμογές και διεργασίες που δεν είναι κρίσιμες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο της ταχύτητας ενός κινητήρα ή της θερμοκρασίας ενός φούρνου. Ένα παράδειγμα καθημερινής χρήσης συστήματος ανοικτού βρόχου είναι η λειτουργία ενός αυτόματου πλυντηρίου ρούχων. Ο προγραμματισμός του πλυντηρίου του επιτρέπει να εκτελεί διάφορες διαδικασίες πλύσης, όπως η ανάδευση, η πλήρωση με νερό και η αποστράγγιση. Όλες αυτές οι διαδικασίες πραγματοποιούνται δίχως να γίνεται έλεγχος του αποτελέσματος. Δηλαδή το μηχάνημα δεν έχει τρόπο να παρακολουθήσει την κατάσταση των ρούχων και να προσαρμοστεί ανάλογα με αυτήν. Ένα άλλο παράδειγμα που αφορά την βιομηχανία είναι η χρήση συστημάτων ανοικτού τύπου σε μεταφορικές ταινίες που μεταφέρουν προϊόντα ή υλικά από ένα σημείο στο άλλο. Το σύνολο των δεδομένων για την είσοδο σε αυτή την περίπτωση είναι προκαθορισμένο όπως και με το πλυντήριο ρούχων, γίνεται προγενέστερα η ρύθμιση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του μεταφορικού ιμάντα και δεν υπάρχει μεταβολή αυτών των παραμέτρων κατά την διαδικασία της μετακίνησης [51]. Παρόλο που η απλή λειτουργία των συστημάτων ανοικτού βρόχου τους επιτρέπει την οικονομική σχεδίαση και υλοποίηση, επιφέρει σημαντικά μειονεκτήματα στην ακρίβεια και την προσαρμοστικότητα. Δυο στοιχεία που διακρίνουν την ικανότητα ενός συστήματος και το πλαίσιο εφαρμογών του. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το σήμα εισόδου δεν αλλάζει κατά με βάση την απόκριση του συστήματος, το καθιστά ευάλωτο σε εξωτερικές διαταραχές και στις μεταβολές του περιβάλλοντος επηρεάζοντας έτσι σε σημαντικό βαθμό την απόδοση του συστήματος. Συνοψίζοντας, τα συστήματα ανοικτού βρόχου αποτελούν συστήματα όπου η έξοδος τους δεν επηρεάζει την είσοδο του. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε κατασκευαστικές και βιομηχανικές εφαρμογές που δεν προϋποθέτουν προσαρμοστικότητα και όπου απαιτείται χαμηλό κόστος για την λειτουργία του συστήματος.

- Κλειστού βρόχου : Ένα σύστημα ελέγχου κλειστού βρόχου ανήκει στην κατηγορία συστημάτων ελέγχου με ανατροφοδότηση. Αυτό σημαίνει ότι η έξοδος του συστήματος ελέγχεται διαρκώς και συγκρίνεται με μια τιμή που έχει

οριστεί με σκοπό την επίτευξη μιας επιθυμητής λειτουργίας. Όπως έχει προαναφερθεί, εφόσον υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο τιμών, προσαρμόζεται η είσοδος του συστήματος σε πραγματικό χρόνο μέχρι αυτή η διαφορά να μηδενιστεί. Τα δύο βασικά στοιχεία που ξεχωρίζουν ένα σύστημα ενός κλειστού βρόχου είναι η λειτουργία του ελεγκτή και ο βρόχος ανάδρασης. Ο ελεγκτής συγκρίνει την επιθυμητή τιμή με την πραγματική τιμή εισόδου και εντοπίζει το σφάλμα. Η συσκευή του ελεγκτή μπορεί να είναι απλή ή σύνθετη ανάλογα με την εφαρμογή. Ο βρόχος ανάδρασης επιτρέπει την ανατροφοδότηση στον ελεγκτή επιτρέποντάς του να υπολογίσει την απαραίτητη είσοδο στο σύστημα, με βάση την μετρούμενη έξοδο, ώστε να επιτευχθεί η σωστή τιμή εξόδου. Τα συστήματα κλειστού βρόχου παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα υπόλοιπα συστήματα. Η δυνατότητά τους να προσαρμόζουν την συμπεριφορά τους άμεσα, όταν παρουσιάζεται κάποια αλλαγή στις παραμέτρους του συστήματος τα καθιστά εξαιρετικά ακριβή και σταθερά στο αποτέλεσμά τους. Ένα μεγάλο ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα είναι η αντοχή σε διάφορες διαταραχές που μπορούν να επηρεάσουν την τιμή εξόδου και να επηρεάσουν την απόδοση του συστήματος. Ωστόσο, όπως και σε όλα τα συστήματα ελέγχου υπάρχουν και μειονεκτήματα, που καθιστούν τα συστήματα ελέγχου κλειστού βρόχου πολλές φορές μη ιδανική λύση για κάποιες περιπτώσεις. Για να υφίσταται η σωστή λειτουργία της ανατροφοδότησης και της ένταξής της με τον σωστό ελεγκτή, μπορεί να προκαλέσει μεγάλες δαπάνες και δυσκολίες στο σχεδιασμό. Επίσης, η ανατροφοδότηση μειώνει το συνολικό κέρδος του συστήματος. Ακόμη, απαιτεί συνήθως συχνότερη συντήρηση και έλεγχο από ότι τα συστήματα ανοικτού βρόχου [52]. Ένα παράδειγμα χρήσης ενός συστήματος κλειστού βρόχου με αυξημένη πολυπλοκότητα είναι ο έλεγχος ταχύτητας σε ένα αυτοκίνητο. Το cruise control, σκοπεύει στην διατήρηση μιας προκαθορισμένης ταχύτητας, η οποία ελέγχεται με την παρακολούθηση της περιστροφής των τροχών (επιθυμητή έξοδος συστήματος). Το σύστημα ελέγχου είναι ικανό να ρυθμίσει το γκάζι του αυτοκινήτου και την ισχύ του κινητήρα που αποτελεί την είσοδο στο σύστημα. Το σενάριο αυτό θεωρείται περίπλοκο, καθώς υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την σχέση της θέσης του γκαζιού και της ταχύτητας. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να είναι, το βάρος του φορτίου, η κλίση του δρόμου, η αντίσταση του αέρα και η πίεση στα ελαστικά του αυτοκινήτου. Ως εκ τούτου το σύστημα θα πρέπει να συντονιστεί και να σχεδιαστεί σχολαστικά προκειμένου να γίνει διαχείριση των παραγόντων αυτών [53]. Ένα ακόμη παράδειγμα χρήσης του συστήματος κλειστού βρόχου είναι ο έλεγχος ενός κινητήρα ο οποίος καθορίζει την κλίση ενός ηλιακού πάνελ. Αυτή η εφαρμογή χρησιμοποιείται σε smart homes και σε βιομηχανίες για την άντληση της μέγιστης ηλιακής ενέργειας και ονομάζεται Sunseeker solar system. Σκοπός της λειτουργίας του είναι η αυτόματη καθοδήγηση της κλίσης του φωτοβολταϊκού πάνελ, μέσω περιστροφικής κίνησης που προκαλείται από έναν κινητήρα. Είσοδος του συστήματος είναι η φωτεινότητα που λαμβάνουν οι αισθητήρες. Έπειτα ένας μικροεπεξεργαστής διαβάζει την

τάση στην είσοδο του, κάνει επεξεργασία των δεδομένων και σηματοδοτεί στην έξοδο του, δηλαδή στον συνδεδεμένο κινητήρα να εκτελέσει μια περιστροφική κίνηση η οποία θα περιστρέψει το φωτοβολταϊκό πάνελ προς τον ήλιο προκειμένου να διαρκέσει όσο πιο πολύ γίνεται η άντληση ενέργειας από το φως του ηλίου [54]. Με την ανατροφοδότηση στο σύστημα γίνεται δυνατή η αυτοματοποίηση των διαδικασιών του.

2.5 Κυβερνοασφάλεια

Τα κυβερνοφυσικά συστήματα όπως παρουσιάστηκε περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση υπολογιστικών συστημάτων και φυσικών συσκευών, συνδυάζοντας υλικό, λογισμικό και τρόπους δικτύωσης για να σχηματίσουν το σύνολο ενός συστήματος ικανό να αλληλεπιδράσει με τον φυσικό κόσμο. Εκτός από την διασφάλιση της σωστής λειτουργίας του συστήματος, οι σχεδιαστές πρέπει να λάβουν υπόψη τους και την ασφάλεια του συστήματος από επιθέσεις στον κυβερνοχώρο. Επιθέσεις που μπορούν να προκαλέσουν φυσικές καταστροφές, οικονομικές απώλειες ακόμη και την έκθεση των ανθρώπων σε κίνδυνο. Για αυτό, η κυβερνοασφάλεια περιλαμβάνει προστασία υλικού, λογισμικού και της ευρύτερης υποδομής του συστήματος από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση και τροποποίηση της λειτουργίας του [55]. Οι βασικές λειτουργίες της κυβερνοασφάλειας περιλαμβάνουν :

1. Ακεραιότητα : Εξακρίβωση της αξιοπιστίας των δεδομένων και των πληροφοριών που ρέουν στο σύστημα. Δηλαδή, πραγματοποιείται έλεγχος για το αν τα δεδομένα έχουν αλλοιωθεί ή τροποποιηθεί με κάποιο τρόπο.
2. Εμπιστευτικότητα : Διασφάλιση ότι τα δεδομένα ρέουν σε ένα εμπιστευτικό περιβάλλον και υπάρχει πρόσβαση σε αυτά μόνο από εμπιστους χρήστες.
3. Αυθεντικοποίηση - Εξουσιοδότηση : Διαδικασία ελέγχου εξουσιοδότησης χρηστών που χρησιμοποιούν και έχουν πρόσβαση στο σύστημα. Γίνεται διαδικασία διασφάλισης ότι οι χρήστες κατέχουν τις απαραίτητες άδειες και δικαιώματα για την πρόσβαση στο δίκτυο.
4. Διαθεσιμότητα : Οι χρήστες με εξουσιοδότηση μπορούν συνεχώς να έχουν εύκολη πρόσβαση στα δεδομένα και τις πληροφορίες όταν είναι επιθυμητό.

Η κυβερνοασφάλεια έχει επίσης μεγάλη σημασία στις βιομηχανίες. Με τον όρο της βιομηχανικής κυβερνοασφάλειας (ICS) ορίζεται ένα σύνολο λύσεων για την προστασία των συστημάτων βιομηχανικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA –

Supervisory Control and Data Acquisition), καθώς και λοιπών συστημάτων επιχειρησιακής τεχνολογίας από οποιαδήποτε απειλή στον κυβερνοχώρο [56]. Τα βιομηχανικά συστήματα όπως δίκτυα μεταφορών, ηλεκτρικής ενέργειας και εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, κατέχουν κρίσιμο ρόλο για την βιωσιμότητα στην σύγχρονη εποχή, και η παραβίαση της λειτουργίας τους με οποιονδήποτε τρόπο μπορεί να προκαλέσει σοβαρά ζητήματα. Για την αποφυγή και την καταπολέμηση τέτοιων προβλημάτων, έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες που χρησιμοποιούν εργαλεία ειδικά σχεδιασμένα για την ασφάλεια των βιομηχανικών συστημάτων έναντι απειλών στον κυβερνοχώρο [57] [58]. Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανική κυβερνοασφάλεια και όχι μόνο [59].

- Τείχος προστασίας (Firewall) : Πρόκειται για προστασία του δικτύου της βιομηχανίας προσφέροντας προστασία και φιλτράρισμα εισερχόμενης και εξερχόμενης κυκλοφορίας δεδομένων με βάση τους κανόνες ασφαλείας που έχουν οριστεί. Ένα παράδειγμα τείχους προστασίας είναι το NGFW (Next-Generation Firewall), το οποίο αποτελεί μια ανανεωμένη και πιο ισχυρή έκδοση ενός τυπικού τείχους προστασίας. Περιλαμβάνει τα βασικά χαρακτηριστικά ασφαλείας καθώς και αναγνώριση και απόκλιση απειλών με βάση περισσότερων παραμέτρων, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη ασφάλεια στον έλεγχο κυκλοφορίας.
- Τμηματοποίηση δικτύου (Network Segmentation) : Τεχνολογία διαίρεσης του δικτύου σε μικρότερα τμήματα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η εξάπλωση του κινδύνου σε όλο το δίκτυο. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιείται από τα VLAN (Virtual Local Area Networks) που διαχωρίζουν το δίκτυο σε μικρότερα λογικά ξεχωριστά δίκτυα.
- Συστήματα διαχείρισης πληροφοριών και συμβάντων ασφαλείας (SIEM) : Ένα σύστημα που έχει ως σκοπό να συλλέξει και να αναλύσει συμβάντα ασφαλείας από πολλαπλές πηγές για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση απειλών ασφαλείας. Η διαδικασία αυτή μπορεί να αναφερθεί και ως Log Management - Διαχείριση αρχείων καταγραφής.
- Κρυπτογράφηση (Encryption) : Τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την μετατροπή της πληροφορίας που κυκλοφορεί στο δίκτυο, σε ασφαλή κώδικα για την αντιμετώπιση μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης με σκοπό την υποκλοπή προσωπικών στοιχείων της εταιρείας.

Εκτός από τα παραπάνω εργαλεία, στην βιομηχανία, η κυβερνοασφάλεια περιέχει επίσης σχέδια αντιμετώπισης απειλών, ανάλυση και αξιολόγηση του κινδύνου και προγράμματα κατάρτισης του εργατικού δυναμικού. Έτσι γίνεται η διασφάλιση ότι όλες οι πτυχές της βιομηχανίας έχουν εξοπλιστεί με τα κατάλληλα εργαλεία και γνώσεις για την αντιμετώπιση και την πρόληψη τυχόν απειλών. Συνοψίζοντας, όλες οι παραπάνω λύσεις προσφέρουν στα βιομηχανικά συστήματα ασφάλεια, αξιοπιστία και λειτουργικότητα, προστατεύοντάς τις υποδομές τους από κυβερνοεπιθέσεις.

Κεφάλαιο 3ο – Τεχνολογία και χρήσεις των ψηφιακών διδύμων

3.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια τα κυβερνοφυσικά συστήματα συνδυάζουν φυσικές διεργασίες και υπολογιστικά στοιχεία για την σχεδίαση ευφών συστημάτων που χρησιμοποιούνται καθημερινά για την ανάπτυξη διαφόρων εφαρμογών. Τα ψηφιακά δίδυμα λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ του φυσικού και ψηφιακού κόσμου. Σκοπός τους είναι να παρέχουν έναν τρόπο μοντελοποίησης και προσομοίωσης των χαρακτηριστικών και συμπεριφορών των φυσικών συστημάτων σε ένα εικονικό περιβάλλον, επιτρέποντας έτσι την παρακολούθηση, την δοκιμή και την βελτιστοποίηση των συστημάτων σε πραγματικό χρόνο ή και πριν από την εφαρμογή τους στον πραγματικό κόσμο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ευελιξία στον χώρο των δοκιμών δίχως κόστος και φύρα, δίνοντας έτσι αυξημένα περιθώρια για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων που καθορίζουν την λειτουργία ενός συστήματος.

3.2 Βασικοί ορισμοί ψηφιακού διδύμου

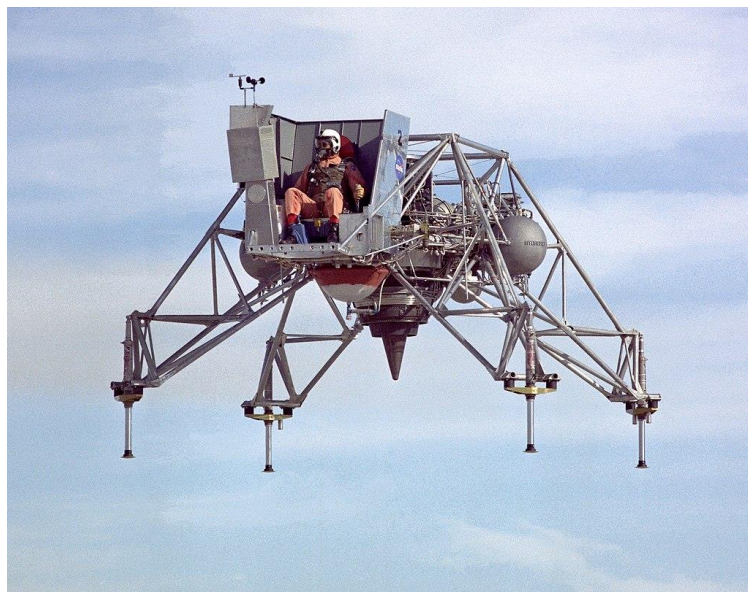
Ένα ψηφιακό δίδυμο (Digital Twin) είναι μια εικονική/ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, συστήματος ή μιας διαδικασίας. Σκοπός αυτού του ψηφιακού

μοντέλου είναι να αντικατοπτρίσει ψηφιακά τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς ενός συστήματος του πραγματικού κόσμου, λαμβάνοντας από αυτόν δεδομένα, προκειμένου να τα αναλύσει και να τα προσομοιώσει. Έχοντας συλλέξει αυτά τα δεδομένα, έχει την δυνατότητα να αναπαράγει ψηφιακά συμπεριφορές του πραγματικού συστήματος μέσω της προσομοίωσης [60]. Η συλλογή των δεδομένων αυτών πραγματοποιείται συχνά με την χρήση αισθητήρων, επιτρέποντας στο ψηφιακό δίδυμο να ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο καθώς αλλάζουν οι συνθήκες του περιβάλλοντος. Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών όπως στις μεταφορές, στην υγειονομική περίθαλψη και στα έξυπνα εργοστάσια ή πόλεις. Προσφέρουν σημαντική βοήθεια στην εύρεση των ιδανικών λύσεων για την βελτιστοποίηση των λειτουργιών της εφαρμογής, καθώς επίσης και λύσεις για την συντήρηση και επισκευή του συστήματος. Με λίγα λόγια, η εφαρμογή τους σε οποιοδήποτε σύστημα με την κατάλληλη χρήση τους, προσφέρει συνολική βελτίωση στην απόδοση λειτουργίας του. Ένα εξαιρετικό παράδειγμα εφαρμογής ενός ψηφιακού διδύμου για ενεργειακές λύσεις είναι η χρήση του σε μια ανεμογεννήτρια, καθώς μοντελοποιεί και προσομοιώνει την συμπεριφορά της και συλλέγει δεδομένα από διαφορετικές συνθήκες ανέμου, όπως για παράδειγμα πόση ενέργεια παράγεται, θερμοκρασία, υγρασία κ.α, έχοντας έτσι την δυνατότητα να βελτιστοποιήσει την απόδοσή της. Ως εκ τούτου η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων αποτελεί βασικό στοιχείο του Industry 4.0 και δεν θα μπορούσε να μην χρησιμοποιείται από τις σύγχρονες βιομηχανίες, λόγω της επιχειρηματικής του αξίας και της χρησιμότητάς του σε ποικίλες εφαρμογές.

3.3 Ιστορική αναδρομή

Πολύ πριν οριστεί η σημασία και η τεχνολογία των DT (digital twins) όπως είναι γνωστά σήμερα, η NASA είχε εφαρμόσει μοντέλα προσομοίωσης για να προετοιμάσει τις αποστολές Apollo και να αναλύσει δεδομένα από την επιφάνεια του φεγγαριού. Προκειμένου να γίνει η προσομοίωση των συνθηκών προσγείωσης στο φεγγάρι χρησιμοποιήθηκε το Lunar Landing Research Vehicle, που πρόκειται για ένα όχημα δοκιμών ειδικά σχεδιασμένο να μιμείται την μειωμένη βαρύτητα και την έλλειψη ατμόσφαιρας στο φεγγάρι. Η τεχνολογία αυτή προετοίμασε τους αστροναύτες να εξασκηθούν σε διάφορες τεχνικές προσγείωσης σε ένα περιβάλλον που ανταποκρινόταν σε πραγματικές συνθήκες και σεναρία [61]. Πραγματοποιήθηκαν επίσης προσομοιώσεις για την μοντελοποίηση της τροχιάς του διαστημικού σκάφους, που βοήθησαν στην εύρεση κινδύνων και γενικότερα στην βελτιστοποίηση του σχεδίου πτήσης. Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια της αποστολής το ψηφιακό δίδυμο βρισκόταν σε λειτουργία, συλλέγοντας αυτήν την φορά δεδομένα από την πραγματική πτήση, παρέχοντας έτσι λύσεις ασφαλείας, συντήρησης και

βελτιστοποίησης σε διάφορα ζητήματα που ερχόντουσαν αντιμέτωποι οι αστροναύτες κατά την διάρκεια της αποστολής.



Πίνακας 12 : Η πρώτη πτήση του LLRV το 1967

Την δεκαετία του 1990 άρχισε να παρουσιάζεται για πρώτη φορά η μορφή των ψηφιακών διδύμων ως έννοια ψηφιακής μοντελοποίησης όπως είναι γνωστή στην σύγχρονη εποχή. Η ανάγκη διαχείρισης του κύκλου ζωής ενός προϊόντος από την σύλληψη μέχρι και την διάθεσή του οδήγησε στην δημιουργία ενός λογισμικού σχεδίασης με υπολογιστή (AutoCAD) το οποίο είχε κυκλοφορήσει το 1960 από την Autodesk, αλλά το 1990 άρχισε να χρησιμοποιείται από πολλές βιομηχανίες γνωρίζοντας έτσι μεγάλη φήμη. Το λογισμικό αυτό το χρησιμοποιούσαν μηχανικοί για την δημιουργία ψηφιακών δυσδιάστατων ή τρισδιάστατων μοντέλων προϊόντων, δοκιμάζοντας έτσι την απόδοσή τους σε εικονικά περιβάλλοντα [62]. Αυτά τα πρώιμα ψηφιακά μοντέλα επιτελούσαν λειτουργίες προσομοίωσης για τον εντοπισμό πιθανών σχεδιαστικών λαθών ή κατασκευαστικών προβλημάτων πολύ πριν την παραγωγή τους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά το κόστος παραγωγής των προϊόντων. Τα ψηφιακά δίδυμα ως ιδέα προτάθηκαν πρώτη φορά από τον καθηγητή μηχανικής του Πανεπιστημίου του Michigan : Dr Michael Grieves, σε ένα έγγραφο που δημοσιεύτηκε

το 2002. Ο Michael Grieves πρότεινε την χρήση μοντέλου DT για την διαχείριση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (product life management - PLM) [63].

Το 2010 επινοήθηκε επίσημα ο όρος “Digital Twin” από τον ερευνητή του Κέντρου Διαστημικών Πτήσεων της NASA : John Vickers, ο οποίος αναφέρθηκε στον όρο προκειμένου να περιγράψει ένα ψηφιακό μοντέλο ενός διαστημικού σκάφους που προοριζόταν για την ανάλυση της συμπεριφοράς του και της απόδοσης του. Το 2010 έφερε ραγδαία εξέλιξη στους αισθητήρες, την ανάλυση δεδομένων και την υπολογιστική νέφους επιτρέποντας έτσι την περαιτέρω ανάπτυξη των μοντέλων.

Το 2015, μια ομάδα εταιρειών ονόματι Industrial Internet Consortium (IIC), ασχολείται με την προώθηση της χρήσης του IoT στην βιομηχανία προκειμένου η έννοια των ψηφιακών διδύμων να λάβει μεγαλύτερες διαστάσεις. Αρχικά δημιούργησε μια ομάδα εργασίας η οποία ανέπτυξε βέλτιστες πρακτικές και πρότυπα για τα ψηφιακά δίδυμα. Έπειτα, έγινε μια δημοσίευση από την ομάδα το 2016 με τίτλο “Industrial Internet of Things Analytics Framework”, το οποίο εξηγούσε λεπτομερώς την εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η δημοσίευση του άρθρου ήταν αρκετά πετυχημένη και ευαισθητοποίησε σημαντικά τις εταιρείες για την έννοια του ψηφιακού διδύμου.

Το 2017, η Siemens κυκλοφόρησε μια τεχνολογία ψηφιακών διδύμων ονόματι MindSphere, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανίες για την βελτίωση των συστημάτων τους και των διαδικασιών τους [64].

Στα επόμενα χρόνια η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων λαμβάνει μεγάλη αναγνώριση από τους οργανισμούς και τις εταιρείες, πιο συγκεκριμένα το 2018 κατατάχθηκε στην λίστα των πιο φημισμένων στρατηγικών τεχνολογιών για το έτος, της εταιρείας Gartner. Η εταιρεία αυτή είναι κορυφαία στις έρευνες, και στην παροχή συμβουλών για διάφορους κλάδους, τεχνολογίες και τάσεις [65].

Το 2020 και κατά την διάρκεια την πανδημίας COVID-19, τα ψηφιακά δίδυμα ανταποκρίθηκαν σε ζητήματα ελέγχου διεργασιών, με απομακρυσμένη πρόσβαση. Διατηρώντας τις διαδικασίες των συστημάτων ελεγχόμενες και σε λειτουργία, παρά το γεγονός έλλειψης προσωπικού.

Έκτοτε, διάφοροι κλάδοι χρησιμοποιούν την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων για την βελτιστοποίηση των συστημάτων τους, όπως στις διαδικασίες μεταφορών, στην διαχείριση της ενέργειας και στον κλάδο της υγειονομικής περίθαλψης.

Σήμερα, η τεχνολογία των Digital Twins έχει επεκταθεί εκτός από την χρήση σε υλικά αντικείμενα, στην χρήση τους σε ανθρώπους, οργανισμούς, εργοστάσια και ολόκληρες πόλεις. Με την εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης, η χρήση των ψηφιακών διδύμων προβλέπεται να αυτοματοποιηθεί πλήρως στα επόμενα χρόνια, μηδενίζοντας έτσι τα ανθρώπινα λάθη που μπορούν ακόμα να υπάρξουν.

3.4 Οι Λειτουργίες και η δομή των ψηφιακών διδύμων.

Τα ψηφιακά δίδυμα καθώς αποτελούν ένα σύστημα, απαρτίζονται από φυσικά στοιχεία/συστήματα, το ψηφιακό τους μοντέλο και τα στοιχεία επικοινωνίας που επιτρέπουν την διασύνδεση του φυσικού περιβάλλοντος με το ψηφιακό. Παρακάτω παρουσιάζεται λεπτομερώς η δομή των ψηφιακών διδύμων.

- Φυσικό Σύστημα : Για να μπορέσει να εφαρμοστεί η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, θα πρέπει να υπάρχει ένας φυσικός χώρος ο οποίος περιλαμβάνει ένα σύστημα ή κάποιο στοιχείο, το οποίο υπόκειται σε μοντελοποίηση και έπειτα σε επεξεργασία και παρακολούθηση. Αυτό μπορεί να είναι κάποιο αντικείμενο φυσικής υπόστασης ή ένα σύστημα που επιτελεί κάποια συγκεκριμένη φυσική διεργασία (π.χ μηχανήμα, κτίριο ή και μια ολόκληρη πόλη.).
- Ψηφιακό μοντέλο : Η αναπαράσταση του φυσικού συστήματος σε ψηφιακή μορφή πραγματοποιείται με την χρήση ψηφιακών μοντέλων. Το ψηφιακό μοντέλο, απαιτεί σχεδίαση πριν την χρήση του, έτσι χρησιμοποιούνται εργαλεία λογισμικού, όπως λογισμικό σχεδίασης με την βοήθεια υπολογιστή (CAD) ή άλλα εργαλεία προσομοίωσης. Το μοντέλο θα πρέπει να αναπαριστά το φυσικό στοιχείο με μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου να μην υπάρχουν αποκλίσεις με την πραγματικότητα καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένες παραμέτρους και μετρήσεις.
- Ενσωμάτωση δεδομένων : Το τρίτο στοιχείο της δομής, ολοκληρώνει σε επικοινωνιακό επίπεδο, την διασύνδεση και την κυκλοφορία των δεδομένων του φυσικού στοιχείου με το ψηφιακό μοντέλο του. Στο επίπεδο αυτό θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του τρόπου επικοινωνίας (wireless, wired), στα πρωτόκολλα επικοινωνίας που θα χρησιμοποιηθούν και στην ασφάλεια των δεδομένων. Συμπερασματικά, το συγκεκριμένο επίπεδο είναι αρκετά κρίσιμο, διότι καθορίζει την δυνατότητα του ψηφιακού διδύμου να αντικατοπτρίζει το φυσικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο, ασφαλίζοντας την εγκυρότητα των δεδομένων και την κυκλοφορία τους στο σύστημα.

Τα ψηφιακά δίδυμα έχουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών που μπορούν να προσφέρουν σε ποικίλες εφαρμογές με διάφορους τρόπους, όπως ο σχεδιασμός, η δοκιμή, η παρακολούθηση και η βελτιστοποίηση. Οι λειτουργίες που επιτελούν είναι οι εξής :

1. Παρακολούθηση - Monitoring : Βασική χρήση των ψηφιακών διδύμων γίνεται όταν είναι επιθυμητή η παρακολούθηση, κάποιου φυσικού στοιχείο ή κάποιου υφιστάμενου συστήματος. Χρησιμοποιούνται, προκειμένου να παρακολουθούν την απόδοση και την κατάσταση συστημάτων παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες στον χρήστη. Συλλέγοντας τα δεδομένα από τους αισθητήρες και άλλες πηγές, τα ψηφιακά δίδυμα ενημερώνουν τον χρήστη, αναλύοντας τον

έλεγχο του συστήματος και τον τρόπο λειτουργίας του σε πραγματικό χρόνο. Με την δυνατότητα της παρακολούθησης δίνεται η δυνατότητα έγκυρης και άμεσης αντιμετώπισης ενός προβλήματος που μπορεί να προκύψει κατά την λειτουργία του συστήματος, ειδοποιώντας τον χρήστη για το αν χρειάζεται επισκευή ή συντήρηση σε πραγματικό χρόνο. Επίσης με την παρακολούθηση, γίνεται εφικτός ο έλεγχος της ενέργειας που καταναλώνει ένα σύστημα για να λειτουργήσει, βρίσκοντας μέσω ανάλυσης το ακριβές ποσοστό ενέργειας που χρειάζεται, και την εύρεση του χρονικού περιθωρίου που μπορεί να βρίσκεται εκτός λειτουργίας.

2. Προληπτική συντήρηση - Predictive Maintenance : Τα ψηφιακά δίδυμα με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης έχουν την δυνατότητα να προβλέψουν την λειτουργία ενός συστήματος σε ένα μεγάλο φάσμα των παραμέτρων του. Ένα μέρος του συστήματος είναι η συντήρησή του, η οποία μπορεί να προβλεφθεί από το ψηφιακό δίδυμο. Έχοντας λάβει δεδομένα εισόδου και εξόδου του συστήματος, και κρίνοντας από προηγούμενες επιδιορθώσεις και επισκευές που αποφασίστηκαν με βάση τον ανθρώπινο παράγοντα (αντιδραστική συντήρηση), μπορεί να εντοπίσει το ακριβές χρονικό περιθώριο αποτελεσματικής λειτουργίας, παραδείγματος χάρη, ενός μηχανήματος. Έτσι μειώνει σημαντικά τις άσκοπες ή πρόωρες επισκευές και αυτομάτως την φύρα που προκύπτει εάν το μηχάνημα υπολειτουργεί. Παράλληλα γίνεται εξοικονόμηση χρόνου και μεταβλητών κόστων της επιχείρησης.
3. Προσομοίωση - Simulation : Για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή ενός συστήματος ή ενός φυσικού αντικειμένου με τους παραδοσιακούς τρόπους, όσον αφορά την αντοχή του, τον χρόνο λειτουργίας του και την αποδοτικότητά του, απαιτείται ο σχεδιασμός και η παραγωγή του ίδιου συστήματος ή αντικειμένου πολλαπλές φορές καθώς οι δοκιμές αναπαριστούν ακραία σενάρια που φέρουν το φυσικό στοιχείο στα όρια λειτουργίας του. Επομένως, απαιτείται η επιπλέον παραγωγή του για να εξεταστεί περαιτέρω όταν τα ήδη δοκιμασμένα είναι εκτός των πλαισίων χρήσης τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι επιχειρήσεις να έχουν υψηλές δαπάνες κόστους παραγωγής, ιδιαίτερα εάν πρόκειται για προϊόν το οποίο συμβάλλει στην εξασφάλιση της ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής (π.χ σασί οχήματος). Τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και την συμπεριφορά των προϊόντων σε διαφορετικές συνθήκες ή σενάρια. Αυτό μπορεί να χρησιμεύει στη δοκιμή νέων σχεδίων, διαμορφώσεων, ή για την πρόβλεψη της απόδοσης ενός συστήματος στο μέλλον με ελάχιστο κόστος. Όσο πιο σύνθετο και απαιτητικό είναι το περιβάλλον της προσομοίωσης, τόσο περισσότερη είναι και η υπολογιστική δύναμη που απαιτείται. Επομένως θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα υπολογιστικό σύστημα που να αντέχει τους υπολογισμούς (π.χ υπερυπολογιστές).

4. Βελτιστοποίηση - Optimization : Με την διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων από τα ψηφιακά δίδυμα, είναι δυνατή η εύρεση ευκαιριών βελτιστοποίησης της απόδοσης που έχει ένα φυσικό αντικείμενο ή ένα σύστημα. Τα ψηφιακά δίδυμα αντιλαμβάνοντας την απόδοση της εξόδου του συστήματος, βελτιστοποιούν την είσοδο καθώς και την λειτουργία του συστήματος σε διάφορες παραμέτρους. Αυτές οι παράμετροι μπορεί να είναι μεγέθη θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας και ηλεκτρικού ρεύματος. Μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τον ρυθμό παραγωγής ενός προϊόντος σε χρονικά επίπεδα και σε επίπεδα κατανάλωσης ισχύος. Όσον αφορά το φυσικό αντικείμενο μπορεί να βελτιστοποιήσει την δομή του, προτείνοντας λύσεις ενίσχυσης του σώματός του, και γενικότερα βελτίωση των χαρακτηριστικών που καθορίζουν την χρήση του.
5. Εκπαίδευση - Training : Όπως έχει προαναφερθεί, μια βασική λειτουργία των ψηφιακών διδύμων είναι η προσομοίωση, η οποία χρησιμεύει στην ψηφιακή δοκιμή σε διάφορα σενάρια που μπορούν να προκύψουν. Σε μια επιχείρηση, ή πιο συγκεκριμένα σε μια βιομηχανία, οι υπάλληλοι πρέπει να είναι πλήρως ενημερωμένοι σχετικά με το αντικείμενο εργασίας τους. Παρόλα αυτά πολλές φορές οι εργαζόμενοι άπειροι και μη, έρχονται αντιμέτωποι με προβλήματα και σενάρια που δεν έχουν συναντήσει στο παρελθόν. Έτσι μέσω των ψηφιακών διδύμων, γίνεται εκπαίδευση του χρήστη στο ψηφιακό μοντέλο, το οποίο ανταποκρίνεται πλήρως με αυτό του φυσικού κόσμου, προκειμένου ο χρήστης να εξοικειωθεί με αυτό. Έτσι, δημιουργείται ένα ασφαλές και ελεγχόμενο περιβάλλον, χωρίς τον κίνδυνο να καταστραφεί ο εξοπλισμός ή να προκληθούν ατυχήματα. Άλλο παράδειγμα εκπαίδευσης μέσω DT (digital twins), είναι η χρήση προσομοιωτή αεροπλάνου, ο οποίος εκπαιδεύει τον πιλότο ενός αεροσκάφους, εκθέτοντάς τον σε διάφορα σενάρια και περιβάλλοντα πτήσης.
6. Τηλεχειρισμός - Remote Control : Η δυνατότητα μοντελοποίησης ενός φυσικού συστήματος σε ψηφιακή μορφή, προσφέρει την ικανότητα τηλεχειρισμού των συστημάτων αυτών. Τέτοια συστήματα μπορεί να βρίσκονται σε ρομπότ, μη επανδρωμένα αεροσκάφη ή ακόμα και μηχανήματα που βρίσκονται σε μια γραμμή παραγωγής ενός εργοστασίου. Ο τηλεχειρισμός μπορεί να φανεί αρκετά χρήσιμος στην εκτέλεση εργασιών σε επικίνδυνες ή δυσπρόσιτες τοποθεσίες. Πολλές φορές χρησιμοποιείται και για την αντιμετώπιση και διάγνωση προβλημάτων ενός συστήματος εξ αποστάσεως. Βασικό στοιχείο στον τηλεχειρισμό, είναι η άμεση σύνδεση του συστήματος με το υπολογιστικό σύστημα, καθώς τυχόν καθυστερήσεις στην απόκριση επικοινωνίας του συστήματος μπορεί να προκαλέσουν λανθασμένες αποφάσεις σχετικά με τον χειρισμό του.

Εκτός από τα οφέλη και τις λειτουργίες που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν επίσης την ανακάλυψη νέων δυνατοτήτων που προηγουμένως θεωρούνταν αδύνατες ή ανέφικτες. Με την χρήση της προσομοίωσης, είναι δυνατός ο

εντοπισμός νέων τρόπων βελτίωσης της αποδοτικότητας ή της μείωσης της σπατάλης που δεν ήταν εμφανείς πριν. Συνολικά, τα ψηφιακά δίδυμα έχουν την δυνατότητα να μεταμορφώσουν τις βιομηχανίες και τις διαδικασίες παραγωγής, παρέχοντας μια εικονική αναπαράσταση των φυσικών συστημάτων ή διαδικασιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη μιας εργασίας ή μιας λειτουργίας.

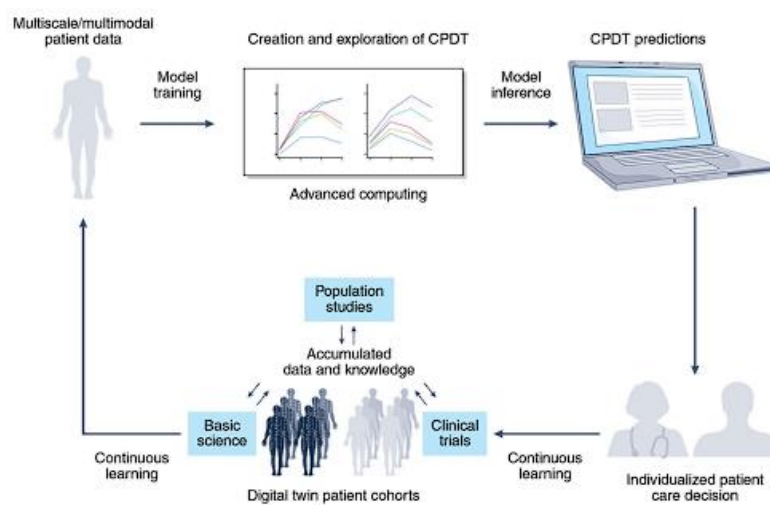
3.5 Τομείς εφαρμογών των ψηφιακών διδύμων.

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων όσο αναπτύσσεται χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο, και πλέον μπορεί να ενταχθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, προσφέροντας σημαντική βοήθεια με ποικίλους τρόπους. Σε αυτήν την ενότητα θα αναλυθούν μερικοί σημαντικοί τομείς εφαρμογών που αξιοποιούν την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων καθώς και τον τρόπο λειτουργίας τους.

3.5.1 Υγειονομική περίθαλψη

Στην υγειονομική περίθαλψη τα Digital Twins χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση και την ανάλυση δεδομένων σχετικά με την υγεία των ασθενών. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούν ένα αποκλειστικό μοντέλο που αφορά τον κάθε ασθενή ξεχωριστά, το οποίο προορίζεται για εξέταση και ανάλυση της ανατομίας ή της φυσιολογίας του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την εύρεση των κατάλληλων φαρμάκων, την αύξηση της αποδοτικότητας ενός χειρουργείου και γενικά στην ελαχιστοποίηση των ατυχημάτων που μπορούν να συμβούν στον ασθενή κατά την διάρκεια της θεραπείας του. Για παράδειγμα, πλέον είναι δυνατή η δημιουργία ψηφιακών διδύμων μεμονωμένων οργάνων ή και ολόκληρων σωμάτων, προκειμένου να αναλυθούν από τους γιατρούς, οι οποίοι θα διαγνώσουν την κατάσταση του ασθενή και μέσω των ψηφιακών διδύμων να δοκιμάσουν ψηφιακά διάφορους τρόπους για την θεραπεία του, και τέλος να επιλέξει το σενάριο που είναι περισσότερο πιθανό να θεραπεύσει τον ασθενή. Βέβαια, όταν το ζήτημα αφορά την υγεία ενός ζωντανού οργανισμού, ο γιατρός θα πρέπει να εμπιστευτεί και την δική του γνώση και εμπειρία. Η λάθος διάγνωση από το ψηφιακό δίδυμο προς το παρόν δεν αποκλείεται αφού αφορά μια νέα τεχνολογία η οποία ακόμα, στον συγκεκριμένο τομέα βρίσκεται σε στάδια ανάπτυξης. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αποδειχθούν ένα πολύ ισχυρό εργαλείο για τους γιατρούς. Υπάρχουν περιπτώσεις δύσκολων επεμβάσεων και χειρουργείων, όπου πολλές φορές ο ασθενής πρέπει να ταξιδέψει σε άλλη χώρα προκειμένου να λάβει την κατάλληλη ιατρική περίθαλψη, από έναν γιατρό ο οποίος είναι έμπειρος πάνω στον κλάδο της ασθένειας

που υπάρχει. Τα ψηφιακά δίδυμα, έχουν την δυνατότητα της παρακολούθησης της υγείας του ασθενή από απόσταση. Ακόμη, προσφέρουν την ικανότητα της χειρουργικής επέμβασης εξ αποστάσεως, που σημαίνει έγκαιρη επέμβαση από τον κατάλληλο γιατρό, δίχως σπατάλη χρόνου και ταλαιπωρίας του ασθενή λόγω της μετακίνησης [66]. Εκτός από την πρόβλεψη της υγείας του ασθενούς, την δοκιμή θεραπευτικών επιλογών στο ψηφιακό του μοντέλο, και την απομακρυσμένη παρακολούθηση και επέμβαση, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να βοηθήσουν και στην δημιουργία νέων θεραπευτικών φαρμάκων, συσκευών και μηχανημάτων που θα βοηθήσουν τον ασθενή στην αποκατάσταση της υγείας του.



Πίνακας 13 : Διαδικασία ανάπτυξης ψηφιακού διδύμου ενός ασθενή με καρκίνο.

3.5.2 Διαστημικές αποστολές

Η εξερεύνηση του διαστήματος από τον άνθρωπο είναι εξαιρετικά σημαντική για την απάντηση θεμελιωδών ερωτημάτων σχετικά με το σύμπαν, συμπεριλαμβανομένης της αναζήτησης ζωής πέρα από τη Γη, της κατανόησης της προέλευσης του ηλιακού συστήματος και του σύμπαντος και της αξιολόγησης της μακροπρόθεσμης κατοικήσιμης κατάστασης του διαστήματος. Ωστόσο, οι πρακτικές προκλήσεις για την επιβίωση του ανθρώπου στο διάστημα για παρατεταμένες χρονικές περιόδους είναι πολυάριθμες και πολύπλοκες. Οι περιορισμοί των πόρων, συμπεριλαμβανομένης της έλλειψης καυσίμων και δομικών υλικών, καθώς και η ενεργειακή κρίση των τελευταίων ετών, θέτουν σημαντικά εμπόδια στην ανάπτυξη των απαραίτητων τεχνολογιών για τη διαρκή εξερεύνηση του διαστήματος. Τα ψηφιακά δίδυμα προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη λύση σε αυτές τις προκλήσεις, επιτρέποντας την εικονική/ψηφιακή εξερεύνηση και δοκιμή των διαστημικών τεχνολογιών, επιτρέποντας την αποτελεσματική ανάπτυξη των διαστημικών συστημάτων και μειώνοντας την ανάγκη για δαπανηρές και απαιτητικές σε πόρους φυσικές δοκιμές. Ως

εκ τούτου, τα ψηφιακά δίδυμα αναδεικνύονται σε ουσιαστικό εργαλείο για την πρόοδο της εξερεύνησης του διαστήματος. Στο πλαίσιο των διαστημικών αποστολών, τα ψηφιακά δίδυμα αποκτούν όλο και περισσότερη σημασία, καθώς επιτρέπουν στους χειριστές να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά πολύπλοκων συστημάτων σε ένα εικονικό περιβάλλον μοντελοποίησης πριν από την εφαρμογή τους στο διάστημα. Αυτό συμβάλλει στη ελαχιστοποίηση του κινδύνου ατυχημάτων, στη βελτιστοποίηση των επιδόσεων και στην αύξηση της επιχειρησιακής διάρκειας ζωής. Το ψηφιακό δίδυμο που χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή MER (Mars Exploration Rover), κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης και προσομοίωσης που συνδύαζαν πληροφορίες από πολλαπλές πηγές, συμπεριλαμβανομένων προηγούμενων αποστολών στον Άρη και επίγειων πειραμάτων. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου εικονικού μοντέλου των ρόβερ, το οποίο περιελάμβανε όλους τους αισθητήρες, τα συστήματα και τα εξαρτήματά τους. Το ψηφιακό δίδυμο συνδέθηκε με τα φυσικά ρόβερ μέσω ενός συστήματος επικοινωνίας που έδωσε στους χειριστές της αποστολής την ικανότητα να στέλνουν εντολές και να λαμβάνουν δεδομένα σχεδόν σε πραγματικό χρόνο [67]. Αυτό επέτρεψε στους χειριστές να ελέγχουν εξ αποστάσεως τα ρόβερ και να διεξάγουν επιστημονικά πειράματα στον Άρη χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρουσία στον πλανήτη. Η τεχνολογία του ψηφιακού δίδυμου που χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή MER είχε πολλά πλεονεκτήματα.

Πρώτον, επέτρεψε στους χειριστές της αποστολής να βελτιστοποιήσουν τις επιδόσεις των ρόβερ και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής τους πέρα από τις αρχικές προδιαγραφές σχεδιασμού τους. Αυτό ήταν ζωτικής σημασίας, δεδομένου του υψηλού κόστους και κινδύνου των διαστημικών αποστολών.

Δεύτερον, ο ψηφιακός δίδυμος επέτρεψε στους χειριστές της αποστολής να διαγνώσουν και να αντιμετωπίσουν προβλήματα σε πραγματικό χρόνο, πράγμα κρίσιμο δεδομένης της απόστασης μεταξύ Γης και Άρη. Το ψηφιακό δίδυμο λειτουργούσε έτσι ώστε να παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των συστημάτων και των αισθητήρων του οχήματος, επιτρέποντας στους χειριστές να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα άμεσα και αποτελεσματικά.

Συνολικά, η τεχνολογία ψηφιακών δίδυμων είναι ένα σημαντικό εργαλείο που έχει φέρει επανάσταση στη διαστημική εξερεύνηση, επιτρέποντας την προσομοίωση και την ανάπτυξη της αποδοτικότητας της συμπεριφοράς πολύπλοκων συστημάτων σε ένα εικονικό περιβάλλον. Το ψηφιακό δίδυμο που χρησιμοποιήθηκε στην αποστολή MER αποτελεί βασικό παράγοντα της επιτυχίας της, επιτρέποντας στη NASA να επιτύχει υψηλή επιστημονική απόδοση, μειώνοντας παράλληλα τον κίνδυνο και το κόστος.

3.5.3 Ναυτιλία

Τα τελευταία έτη, η ναυτιλιακή βιομηχανία έχει υποστεί μεταρρυθμίσεις στον τρόπο λειτουργίας της λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για αποδοτικότητα, ασφάλεια και περιβαλλοντικές επιδόσεις. Για να ανταποκριθούν σε αυτές τις προκλήσεις, οι ναυτιλιακές εταιρείες στρέφονται προς τα ψηφιακά δίδυμα για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών τους και τη μείωση του κόστους. Τα ψηφιακά δίδυμα σε αυτήν την βιομηχανία χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης των πλοίων και των κρίσιμων συστημάτων τους, την πρόβλεψη συντήρησης, την ενίσχυση της ασφάλειας και την παροχή μοντέλων που προσφέρουν ρεαλιστικές προσομοιώσεις εκπαίδευσης για τα πληρώματα των πλοίων. Αξιοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και προηγμένες αναλύσεις, οι ναυτιλιακές εταιρείες μπορούν να βελτιώσουν τις λειτουργίες τους και να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

Η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στη ναυτιλιακή βιομηχανία έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται, λειτουργούν και συντηρούνται τα πλοία με διάφορους τρόπους. Όπως προαναφέρθηκε, η προγνωστική συντήρηση στην ναυτιλία χρησιμοποιείται κυρίως στο τομέα των μηχανών και κινητήρων των πλοίων. Γίνεται χρήση αισθητήρων για την συλλογή πολύτιμων δεδομένων, όπως θερμοκρασία, πίεση και κραδασμούς, τα ψηφιακά δίδυμα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τον κινητήρα σε πραγματικό χρόνο. Έπειτα οι πληροφορίες αυτές αναλύονται, καθιστώντας δυνατή την πρόβλεψη συντήρησης, ορίζοντας τον προληπτικό προγραμματισμό της [68]. Παραδείγματος χάρη, η Rolls-Royce έχει ενσωματώσει την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων στους κινητήρες των πλοίων της, και παρέχει υπηρεσίες προληπτικής συντήρησης μηχανών σε ναυτιλιακές εταιρείες [69].

Ένα άλλο παράδειγμα χρήσης των ψηφιακών διδύμων στην ναυτιλιακή βιομηχανία είναι η χρήση τους για την εύρεση των αποδοτικότερων τιμών που ρυθμίζουν την συμπεριφορά του πλοίου. Αυτό πραγματοποιείται με την προσομοίωση του ψηφιακού μοντέλου του πλοίου σε διαφορετικά σενάρια με διαφορετικές συνθήκες, και παρακολουθείται η συμπεριφορά του πλοίου στις εκάστοτε αλλαγές του περιβάλλοντος. Πραγματικό παράδειγμα περίπτωσης είναι αυτό της εταιρείας Maersk, η οποία έχει ενσωματώσει την λειτουργία των ψηφιακών διδύμων για την ρύθμιση του trim του πλοίου, με αποτέλεσμα την σημαντική μείωση στην κατανάλωση καυσίμων [70].

Ένας ακόμη σοβαρός παράγοντας που εξασφαλίζει την ομαλή λειτουργία των ναυτιλιακών βιομηχανικών είναι η ασφάλεια. Μια από τις πολλές χρήσεις τους στον τομέα αυτό, είναι η προσομοίωση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, όπως συγκρούσεις, και στόχος τους είναι ο εντοπισμός μείωσης του κινδύνου για τους επιβάτες του πλοίου αλλά και του φορτίου. Επίσης, χρησιμεύουν στην παρακολούθηση κρίσιμων συστημάτων, όπως του εξοπλισμού πλοήγησης και επικοινωνίας, προσφέροντας ασφάλεια προειδοποιώντας τον χειριστή άμεσα για τυχόν περιπτώσεις δυσλειτουργίας του συστήματος.

Η κατάλληλη εκπαίδευση του πληρώματος είναι επίσης μια πολύ σημαντική πτυχή της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Εδώ τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται ώστε να παρέχουν ρεαλιστικές προσομοιώσεις εκπαίδευσης στο πλήρωμα του πλοίου, δίνοντας την ευκαιρία της κατάλληλης προετοιμασίας για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης,

ενισχύοντας τις δεξιότητες του πληρώματος. Για παράδειγμα, για μια περίπτωση δυσμενών καιρικών συνθηκών, όπως καταιγίδες ή παλίρροιες, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προσομοιώσουν αυτό το σενάριο εκπαιδεύοντας τα μέλη του πληρώματος, εξετάζοντας την αντίδρασή τους σε αυτόν τον τύπο κινδύνου.

Συνοψίζοντας, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να φέρουν την επανάσταση στην ναυτιλία, προσφέροντας μια νέα αποδοτικότερη προσέγγιση σε μεθόδους συντήρησης, παρακολούθησης, καθώς και σε θέματα κατασκευής, σχεδιασμού και λειτουργίας των πλοίων. Αξιοποιώντας τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, οι ναυτιλιακές εταιρείες, έχουν πλέον την δυνατότητα να βελτιστοποιήσουν σημαντικά τις δραστηριότητές τους, μειώνοντας το κόστος, ενώ παράλληλα βελτιώνουν την ασφάλειά τους, και τις περιβαλλοντικές επιδόσεις τους.

3.5.4 Βιομηχανίες παραγωγής

Οι βιομηχανίες παραγωγής προσπαθούν συνεχώς να βελτιώνουν την αποδοτικότητά τους, να μειώνουν το κόστος και να βελτιώνουν την ποιότητα. Η χρήση ψηφιακών διδύμων έχει αναδειχθεί ως μια τεχνολογία η οποία μπορεί να φέρει εις πέρας αυτούς τους στόχους. Με τη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου μιας γραμμής παραγωγής ή μιας μηχανής, οι χειριστές μπορούν να παρακολουθούν την απόδοσή τους, να προβλέπουν τις ανάγκες συντήρησης και να βελτιστοποιούν τις λειτουργίες τους. Τον τύπο των ψηφιακών διδύμων μπορούμε να τα διαφοροποιήσουμε με βάση την χρήση τους.

- Ψηφιακά δίδυμα βασισμένα στη φυσική – Physics-Based Digital Twins : Σε αυτόν τον τύπο το μοντέλο του ψηφιακού διδύμου ανταποκρίνεται σε φυσικούς νόμους και εξισώσεις. Συχνά χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση πολύπλοκων φυσικών συστημάτων, όπως χημικές αντιδράσεις ή δυναμική ρευστών. Η χρήση τους γίνεται προκειμένου να δοκιμαστούν οι συμπεριφορές των προϊόντων, ή μιας παραγωγικής διαδικασίας σε διαφορετικά σενάρια περιβάλλοντος [71].
- Ψηφιακά δίδυμα με βάση τα δεδομένα – Data-Driven Digital Twins : Πρόκειται για ψηφιακά δεδομένα που λειτουργούν με γνώμονα τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες, μηχανές και άλλες πηγές. Λειτουργούν μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, δημιουργώντας έτσι ένα μοντέλο με συνεχή ανάπτυξη. Αυτά τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού και την πρόβλεψη του πότε απαιτείται συντήρηση. Χρησιμοποιούνται επίσης για την βελτιστοποίηση διαφόρων διαδικασιών παραγωγής, εντοπίζοντας τα σημεία συμφόρησης [72].

- Υβριδικά ψηφιακά δίδυμα – Hybrid Digital Twins : Στην παρούσα κατηγορία υπάρχει συνδυασμός των μοντέλων που βασίζονται στους φυσικούς νόμους και στα δεδομένα, για να δημιουργήσουν μια ολοκληρωμένη και πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του φυσικού συστήματος. Συνήθως χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση σύνθετων διαδικασιών παραγωγής που περιλαμβάνουν τόσο φυσικά όσο και ψηφιακά στοιχεία [73].
- Ψηφιακά δίδυμα προϊόντων – Process Digital Twins : Τα ψηφιακά δίδυμα προϊόντων αναπαριστούν με πιστότητα εικονικά, τα προϊόντα του φυσικού κόσμου. Σχεδιάζονται και δημιουργούνται από την συλλογή δεδομένων κατά την διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής. Σκοπός τους είναι να προσομοιώνουν την συμπεριφορά των προϊόντων σε διαφορετικά σενάρια χρήσης ή για να εντοπίσουν σχεδιαστικές ατέλειες πριν την έναρξη της παραγωγικής διαδικασίας [74].

Παραδείγματα στο πεδίο:

- Πρόβλεψη συντήρησης: Ένα παράδειγμα χρήσης των ψηφιακών διδύμων στις βιομηχανίες παραγωγής είναι η εφαρμογή της προγνωστικής συντήρησης. Με τη χρήση αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση του εξοπλισμού, οι χειριστές μπορούν να προβλέψουν πότε απαιτείται συντήρηση και να την προγραμματίσουν προληπτικά. Για παράδειγμα, η Siemens έχει εφαρμόσει ψηφιακά δίδυμα για ανεμογεννήτριες, επιτρέποντας στους χειριστές να παρακολουθούν την κατάσταση των ανεμογεννητριών και να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα πριν οδηγήσουν σε διακοπή λειτουργίας [75].
- Ποιοτικός έλεγχος: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση του ποιοτικού ελέγχου των γραμμών παραγωγής. Με την προσομοίωση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προσδιορίσουν τις πιο αποτελεσματικές ρυθμίσεις για τη διαδικασία παραγωγής, διασφαλίζοντας ότι τα προϊόντα κατασκευάζονται σύμφωνα με τα υψηλότερα πρότυπα [76]. Για παράδειγμα, η BMW έχει εφαρμόσει ψηφιακά δίδυμα για τις γραμμές παραγωγής αυτοκινήτων της, επιτρέποντας στους χειριστές να βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία συναρμολόγησης και να βελτιώσουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος [77].
- Σχεδιασμός προϊόντων: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του σχεδιασμού προϊόντων, προσομοιώνοντας την απόδοση διαφορετικών σχεδίων και εντοπίζοντας τις πιο αποδοτικές οικονομικά επιλογές. Για παράδειγμα, η Airbus έχει εφαρμόσει ψηφιακά δίδυμα για τη διαδικασία σχεδιασμού αεροσκαφών, επιτρέποντας στους μηχανικούς να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά διαφορετικών

εξαρτημάτων αεροσκαφών και να βελτιστοποιούν το σχεδιασμό τους για μέγιστη αποδοτικότητα [78].

- Βελτιστοποίηση της αλυσίδας εφοδιασμού: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της αλυσίδας εφοδιασμού των βιομηχανιών παραγωγής. Με την προσομοίωση της ροής των υλικών και των προϊόντων μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού, οι φορείς μπορούν να εντοπίσουν τις ανεπάρκειες και να βελτιστοποιήσουν τη διαδικασία για μέγιστη αποδοτικότητα. Για παράδειγμα, η Dow Chemical έχει εφαρμόσει ψηφιακά δίδυμα για την αλυσίδα εφοδιασμού της, επιτρέποντας στους χειριστές να παρακολουθούν την κατάσταση των πρώτων υλών και να βελτιστοποιούν τη διαδικασία παραγωγής για μέγιστη αποδοτικότητα [79].

Συμπερασματικά, η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων μεταμορφώνει τον κλάδο της μεταποίησης, επιτρέποντας στις εταιρείες να δημιουργούν εικονικά αντίγραφα των φυσικών προϊόντων και διαδικασιών τους. Η χρήση των ψηφιακών διδύμων στις βιομηχανίες παραγωγής έχει τη δυνατότητα να αλλάξει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται και παραδίδονται τα προϊόντα. Αξιοποιώντας τους διαφορετικές τεχνολογίες των ψηφιακών διδύμων, οι εταιρείες μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητά τους, να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων τους.

3.5.5 Ψηφιακά εργοστάσια

Τα ψηφιακά εργοστάσια φέρνουν επανάσταση στη μεταποιητική βιομηχανία εφαρμόζοντας προηγμένες τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής και την αύξηση της αποδοτικότητας των μηχανημάτων τους. Η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στα ψηφιακά εργοστάσια περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός εικονικού μοντέλου του εξοπλισμού και των διαδικασιών του εργοστασίου, το οποίο στη συνέχεια συνδέεται με αισθητήρες που εφαρμόζονται στο φυσικό μοντέλο για την παρακολούθηση και την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, τον εντοπισμό και τη διάγνωση προβλημάτων και τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων.

Τα ψηφιακά δίδυμα παρέχουν διάφορα οφέλη στα ψηφιακά εργοστάσια. Μπορούν να μειώσουν τον χρόνο διακοπής λειτουργίας με τον εντοπισμό και τη διάγνωση ζητημάτων προτού λάβουν μεγαλύτερη διάσταση, να βελτιστοποιήσουν την παραγωγή με τον εντοπισμό σημείων προς βελτίωση και να μειώσουν το κόστος επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν επίσης να

χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση και τη δοκιμή νέων προϊόντων και διαδικασιών πριν από την εφαρμογή τους, μειώνοντας τον κίνδυνο σφαλμάτων και αποτυχιών.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής ψηφιακών διδύμων σε ψηφιακά εργοστάσια είναι στην αυτοκινητοβιομηχανία. Τα εργοστάσια αυτοκινητοβιομηχανίας χρησιμοποιούν ψηφιακά δίδυμα για να δημιουργήσουν εικονικά μοντέλα των γραμμών παραγωγής τους. Αυτό τους επιτρέπει να παρακολουθούν την παραγωγή, να εντοπίζουν περιοχές προς βελτίωση, να μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, και να βρίσκουν έγκαιρα τυχόν σφάλματα κατά την διαδικασία παραγωγής. Για παράδειγμα, ένας κατασκευαστής αυτοκινήτων μπορεί να δημιουργήσει ένα ψηφιακό δίδυμο μιας συγκεκριμένης γραμμής παραγωγής, το οποίο περιλαμβάνει όλο τον εξοπλισμό, τα εργαλεία και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενός συγκεκριμένου μοντέλου αυτοκινήτου. Το ψηφιακό δίδυμο συνδέεται στη συνέχεια με αισθητήρες που παρακολουθούν διάφορες παραμέτρους. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται και αναλύονται σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στον κατασκευαστή να εντοπίσει τυχόν προβλήματα ή αποκλίσεις από την αναμενόμενη απόδοση [80]. Περαιτέρω, εάν τα δεδομένα από το ψηφιακό δίδυμο δείχνουν ότι μια συγκεκριμένη μηχανή λειτουργεί με χαμηλότερη απόδοση από την αναμενόμενη, ο κατασκευαστής μπορεί να πραγματοποιήσει μια ανάλυση στα δεδομένα αυτά για να εντοπίσει τη βασική αιτία του προβλήματος. Αυτό μπορεί να συνεπάγεται με την προσαρμογή των ρυθμίσεων του μηχανήματος, την αλλαγή της διαδικασίας παραγωγής ή την αντικατάσταση του μηχανήματος. Λαμβάνοντας αποφάσεις με βάση τις γνώσεις που παρέχει το ψηφιακό δίδυμο, ο κατασκευαστής μπορεί να βελτιστοποιήσει την παραγωγή και να μειώσει το κόστος. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η δυνατότητα προσομοίωσης και δοκιμής νέων προϊόντων και διαδικασιών. Με τη δημιουργία ενός εικονικού μοντέλου ενός νέου μοντέλου αυτοκινήτου ή μιας διαδικασίας παραγωγής, οι βιομηχανίες μπορούν να δοκιμάζουν διαφορετικά σενάρια και να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα πριν αυτά εμφανιστούν στον πραγματικό κόσμο. Αυτό μειώνει τον κίνδυνο σφαλμάτων και αποτυχιών και επιτρέπει την αποτελεσματικότερη ανάπτυξη και δοκιμή.

Η βιομηχανία ενέργειας επίσης χρησιμοποιεί την τεχνολογία για να μπορέσει να ελέγχει ψηφιακά τα συστήματά της. Τα ψηφιακά δίδυμα σε αυτόν τον κλάδο βιομηχανίας χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση της απόδοσης ανεμογεννητριών και άλλου εξοπλισμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Με τη δημιουργία εικονικών μοντέλων του εξοπλισμού και τη σύνδεσή τους με ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι κατασκευαστές μπορούν να παρακολουθούν και να αναλύουν την απόδοση, να εντοπίζουν και να διαγιγνώσκουν προβλήματα και να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει δεδομένων για τη βελτίωση της απόδοσης [81].

Ακόμη ένα παράδειγμα εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων σε ψηφιακά εργοστάσια, αφορά τις βιομηχανίες τροφίμων. Σε αυτήν την βιομηχανία τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής τροφίμων, όπως το ψήσιμο και η ζυθοποιία. Με τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων των διαδικασιών και τη σύνδεσή τους με ροές δεδομένων, γίνεται δυνατή η παρακολούθηση και η ανάλυση των διεργασιών, εντοπίζοντας παράλληλα περιοχές για βελτίωση, με

αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση της ποιότητας και της αποδοτικότητας κατά την διαδικασία παραγωγής.

Εν κατακλείδι, τα ψηφιακά εργοστάσια υιοθετούν την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, την αύξηση της αποδοτικότητας και τη μείωση του κόστους. Με τη δημιουργία εικονικών αντιγράφων φυσικών στοιχείων και διαδικασιών, τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν την άμεση παρακολούθηση και ανάλυση, η οποία μπορεί να φέρει σημαντικά πλεονεκτήματα για τον εντοπισμό και τη διάγνωση προβλημάτων, τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και της λήψης αποφάσεων.

Κεφάλαιο 4ο – Διαχείριση ενέργειας στις σύγχρονες βιομηχανίες

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ψηφιακά δίδυμα αναλαμβάνουν την βελτιστοποίηση συστημάτων που μπορούν να ενσωματωθούν με αυτά. Η διαδικασία αξιολόγησης της ενεργειακής απόδοσης των βιομηχανικών διεργασιών και ο εντοπισμός των τρόπων μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας με παράλληλη διατήρηση ή αύξηση της παραγωγικότητας, είναι κρίσιμης σημασίας, και πολλές φορές οι επιχειρήσεις στρέφονται στις λύσεις των ψηφιακών διδύμων για να μειώσουν τα ενεργειακά κόστη, και τις περιβαλλοντικές ρυπάνσεις που μπορεί να προκαλούν. Ωστόσο, η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων είναι ακόμα αναπτυσσόμενη και πολλές βιομηχανίες χρησιμοποιούν ακόμη παραδοσιακές μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας. Σύμφωνα με τα τελευταία ευρωπαϊκά πρότυπα στο πεδίο της εξοικονόμησης ενέργειας, στόχος για τις ευρωπαϊκές χώρες είναι να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας κατά 9% μέχρι το 2030 [82].

Η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και το αυξανόμενο κόστος που συνδέεται με αυτήν έχουν προκαλέσει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ενεργειακή απόδοση στις βιομηχανίες. Με τον εκσυγχρονισμό των βιομηχανικών διεργασιών, οι βιομηχανίες έχουν καταστεί σημαντικοί καταναλωτές ενέργειας. Ως εκ τούτου, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις βιομηχανίες έχει γίνει ένας κρίσιμος τομέας εστίασης για τους ενδιαφερόμενους φορείς διαφόρων βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Το παρόν κεφάλαιο παρέχει μια επισκόπηση της έννοιας της ενεργειακής απόδοσης, της σημασίας της στις σύγχρονες βιομηχανίες, καθώς και την περιγραφή της τεχνολογίας των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας.

4.2 Συστήματα ενεργειακής διαχείρισης

Στις σύγχρονες βιομηχανίες τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης (EnMS), αποτελούν βασικό εργαλείο βελτιστοποίησης ενεργειακών αποδόσεων, επιδρώντας σημαντικά στην μείωση της κατανάλωσης ενέργειας. Ένα σύστημα ενεργειακής διαχείρισης, αποτελείται από τον ενεργειακό σχεδιασμό, την παρακολούθηση και την

υποβολή προτάσεων που θα εξελίξουν την ενεργειακή απόδοση με συνεχή ρυθμό. Παράλληλα, παρέχει μια συστηματική προσέγγιση για τη διαχείριση της χρήσης ενέργειας και μέσω ελέγχου εντοπίζει ευκαιρίες για εξοικονόμηση κόστους, και ενέργειας για περιβαλλοντικά οφέλη. Με την εφαρμογή ενός EnMS, οι εταιρείες μπορούν να εντοπίσουν ευκαιρίες για τη μείωση της χρήσης ενέργειας και του κόστους, οδηγώντας σε σημαντική μείωση του ενεργειακού κόστους. Επιπλέον, επιτρέπει στις εταιρείες να εντοπίζουν και να εφαρμόζουν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας που δεν απαιτούν υψηλές κεφαλαιακές επενδύσεις, καθιστώντας το μια οικονομικά αποδοτική λύση [83].

Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία και εκπαίδευση του προσωπικού. Οι εταιρείες πρέπει να διαθέτουν μια εξειδικευμένη ομάδα με τις απαραίτητες δεξιότητες και γνώσεις για την αποτελεσματική διαχείριση και συντήρηση του συστήματος. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι το σύστημα χρησιμοποιείται στο έπακρο, οδηγώντας στη μέγιστη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας και σε άλλα οφέλη. Υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις βιομηχανίες, μερικά παραδείγματα είναι :

1. Συστήματα παρακολούθησης ενέργειας - Energy Monitoring Systems : Τα συστήματα αυτά λαμβάνουν δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας κατά την λειτουργία των διαφόρων συστημάτων της βιομηχανίας, έτσι μετρούν και παρακολουθούν την χρήση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Αποτελεσματικά, οι επιχειρήσεις μπορούν αναλύοντας τα δεδομένα του συστήματος, να εντοπίσουν τις περιοχές σπατάλης ενέργειας και να προβούν στην αντιμετώπιση του προβλήματος. Για την λειτουργία του συστήματος απαιτείται η ενσωμάτωση αισθητήρων στους χώρους που είναι επιθυμητή η παρακολούθηση της χρήσης ενέργειας, όπως σε γραμμές παραγωγής, μια συγκεκριμένη περιοχή μιας εγκατάστασης ή και ακόμα σε ένα μηχάνημα. Συνήθως, τα συστήματα αυτά βασίζονται πάνω σε ένα λογισμικό, το οποίο παρέχει υπηρεσίες παρακολούθησης και ανάλυσης της ενέργειας. Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι η συνεχή παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας σε επίπεδο εξοπλισμού (μηχανήματα ή κομμάτια εξοπλισμού), στην συνέχεια η ανάλυση των δεδομένων της κατανάλωσης παρέχοντας στον χρήστη αναφορές που εντοπίζουν περιοχές ενεργειακής σπατάλης, και το πως μπορεί να γίνει η βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας στα δεδομένα μηχανήματα [84]. Τα λογισμικά αυτά προκειμένου να είναι εύκολα προσβάσιμα και κατανοητά προς τους χρήστες, διαθέτουν ένα φιλικό περιβάλλον εργασίας, επιτρέποντάς του να προβάλλει δεδομένα χρήσης ενέργειας, να δημιουργεί αναφορές και να εντοπίζει εύκολα και γρήγορα τυχόν σπατάλες ενέργειας.
2. Συστήματα αυτοματισμού κτιρίων - Building automation systems : Τα BAS χρησιμοποιούνται για την αυτόματη προσαρμογή των διαφόρων συστημάτων (π.χ φωτισμός και εξαερισμός) σε ένα κτίριο ανάλογα με τις μεταβολές του περιβάλλοντος για την βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας. Τα συστήματα

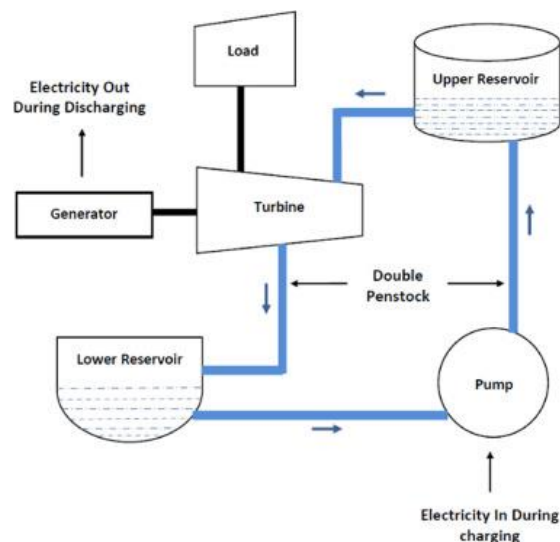
αυτά, έχουν την δυνατότητα να προγραμματιστούν από τον χειριστή, προκειμένου να απενεργοποιούν τον εξοπλισμό όταν δεν χρησιμοποιείται και να ρυθμίζουν την θερμοκρασία ενός χώρου ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή όταν είναι αυτό απαραίτητο. Τα συστήματα αυτά συνδιάζουν υλικό και λογισμικό για την αυτοματοποίηση βιομηχανικών κτιρίων. Το σύστημα περιλαμβάνει μια σειρά από αισθητήρες, ελεγκτές και άλλες συσκευές που συλλέγουν δεδομένα σχετικά με τις συνθήκες του κτιρίου, όπως η θερμοκρασία, και η υγρασία. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κτιρίου και της ενεργειακής απόδοσης. Η ενσωμάτωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης στα συστήματα αυτά προσφέρουν την ικανότητα της εκμάθησης του συστήματος στην προσαρμογή των παραμέτρων του καθώς οι συνθήκες του κτιρίου μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα να κάνει προσαρμογές στα συστήματα HVAC (Heating, Ventilation, Air Condition), στο φωτισμό και σε άλλα συστήματα του κτιρίου σε πραγματικό χρόνο, με βάση τις τρέχουσες συνθήκες. Το λογισμικό επίσης έχει την δυνατότητα να ειδοποιήσει τον χρήστη σχετικά την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου.

3. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας - Energy storage systems : Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπουν την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας με σκοπό την χρήση της σε μεταγενέστερο χρόνο. Χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση της αναντιστοιχίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης ενέργειας, η οποία αποτελεί βασική πρόκληση στον τομέα της βιομηχανικής ενέργειας [85]. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, στην αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας και στη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπανσης. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να λάβουν πολλές διαφορετικές μορφές και κάθε τύπος τους έχει τα δικά του δυνατά και αδύνατα σημεία. Η επιλογή του συστήματος εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η συγκεκριμένη εφαρμογή, η απαιτούμενη ενεργειακή χωρητικότητα και ισχύς, και το κόστος της τεχνολογίας. Παρακάτω αναλύονται μερικοί από τους πιο γνωστούς τύπους συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

- a. Ένας από τους πιο συνηθισμένους τύπους συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας είναι οι ηλεκτροχημικές μπαταρίες. Πρόκειται για συσκευές που αποθηκεύουν ενέργεια σε χημική μορφή και την απελευθερώνουν ως ηλεκτρική ενέργεια όταν είναι επιθυμητό. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες (BESS) είναι μία από τις πιο δημοφιλείς τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στις σύγχρονες βιομηχανίες. Ένα BESS αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή χημικής ενέργειας χρησιμοποιώντας ένα σύνολο κυψελών μπαταρίας χαμηλής τάσης/ισχύος που συνδέονται παράλληλα και σε σειρά για να επιτύχουν ένα επιθυμητό ηλεκτρικό χαρακτηριστικό. Κάθε κυψέλη αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη, μια άνοδο και μια κάθοδο.

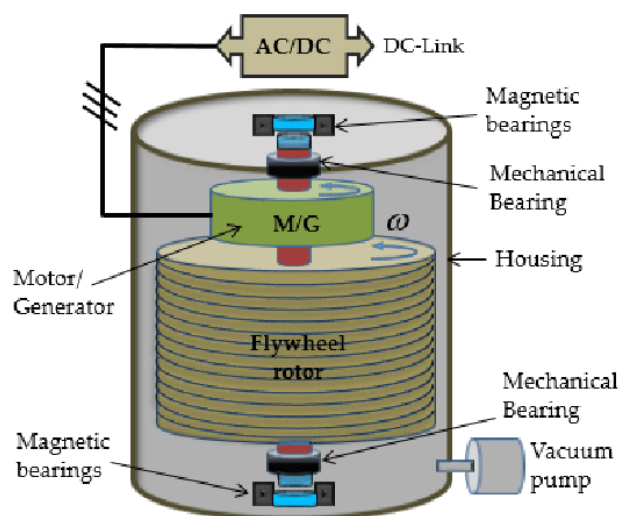
Η μπαταρία φορτίζεται με εσωτερική χημική αντίδραση υπό δυναμικό που εφαρμόζεται και στα δύο ηλεκτρόδια. Η αντίδραση αυτή είναι αντιστρεπτή και επιτρέπει στην μπαταρία να αποδίδει την ενέργεια που έχει λάβει για εκφόρτιση [86]. Οι μπαταρίες έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως πολύ γρήγορο χρόνο απόκρισης, μικρές απώλειες και υψηλή απόδοση κυκλικής διαδρομής. Ωστόσο, οι μπαταρίες περιέχουν τοξικά μέταλλα που μπορούν να οδηγήσουν σε οικολογικά προβλήματα. Επιπλέον, ο κύκλος ζωής ορισμένων μπαταριών είναι περιορισμένος, γεγονός που περιορίζει την εφαρμογή τους ως συσκευές αποθήκευσης μεγάλης κλίμακας. Οι μπαταρίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες εφαρμογές, από την τροφοδοσία φορητών ηλεκτρονικών συσκευών καθώς και για την παροχή εφεδρικής ενέργειας για κρίσιμες υποδομές όπως νοσοκομεία και κέντρα δεδομένων.

- b. Εξίσου σημαντικής αξίας για την αποθήκευση της ενέργειας έχουν και τα συστήματα υδροηλεκτρικής ενέργειας (pumped hydro storage - PHS). Η διάταξη ενός τέτοιου συστήματος αποτελείται από δύο δεξαμενές νερού, με το σώμα με το υψηλότερο υψόμετρο να αντιπροσωπεύει την αποθηκευμένη ενέργεια. Κατά τη διάρκεια των ωρών εκτός αιχμής, το σύστημα αντλεί νερό από τη χαμηλότερη δεξαμενή στην ανώτερη, η οποία θεωρείται η διαδικασία φόρτισης. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, το νερό από τον ανώτερο ταμιευτήρα απελευθερώνεται και ρέει μέσω υδροστροβίλων συνδεδεμένων με γεννήτριες, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια [87]. Το σύστημα αυτό έχει την υψηλότερη ισχύ και ενεργειακή απόδοση, με μεγάλη διάρκεια ζωής και ελάχιστες απώλειες εκφόρτισης. Ωστόσο, ένα του βασικό μειονέκτημα είναι ο αργός χρόνος απόκρισης, καθώς και η ιδιαιτερότητα που έχει για τον χώρο εγκατάστασής του, όσον αφορά τις καιρικές συνθήκες και το φυσικό περιβάλλον.



Πίνακας 14 : Αναπαράσταση συστήματος υδροηλεκτρικής αποθήκευσης ενέργειας

- c. Οι σφόνδυλοι (flywheels), είναι ακόμη ένας τύπος συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και η βασική του λειτουργία είναι η αποθήκευση κινητικής ενέργειας. Οι σφόνδυλοι πρωτοεμφανίστηκαν σε εφαρμογές την δεκαετία του 1970, χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο χαλύβδινο περιστρεφόμενο σώμα με μηχανικά έδρανα. Σε αυτή την τεχνολογία, η περιστροφική ενέργεια αποθηκεύεται εντός ενός επιταχυνόμενου ρότορα, ο οποίος είναι ένας μεγάλος περιστρεφόμενος κύλινδρος. Το σύστημα απαρτίζεται από διάφορα εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένου ενός περιστρεφόμενου κυλίνδρου, έδρανα και έναν άξονα. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω ανεμοπίεσης, ολόκληρη η δομή τοποθετείται σε ένα περίβλημα κενού. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης, ο ρότορας επιταχύνεται σε πολύ υψηλή ταχύτητα, η οποία μπορεί να κυμαίνεται έως πάνω από 50.000 στροφές ανά λεπτό, και η ενέργεια αποθηκεύεται στον σφόνδυλο διατηρώντας το περιστρεφόμενο σώμα σε σταθερή ταχύτητα [88]. Κατά τη διαδικασία εκφόρτισης, ο σφόνδυλος τροφοδοτεί τη γεννήτρια. Η τεχνολογία του σφονδύλου διαθέτει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως μεγάλη διάρκεια ζωής με πλήρεις κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης, ελάχιστο κόστος συντήρησης, υψηλή πυκνότητα ισχύος και υψηλή απόδοση. Επιπλέον, αυτός ο τύπος συστήματος έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ενίσχυση της απόσβεσης. Οι πρωταρχικοί περιορισμοί περιλαμβάνουν τη μικρή διάρκεια λειτουργίας και τις υψηλές απώλειες αυτοεκφόρτισης, γι' αυτό και η τεχνολογία του σφονδύλου εφαρμόζεται συχνά σε συνδυασμό με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αντί να λειτουργεί ανεξάρτητα.



Πίνακας 15 : Δομικά στοιχεία σφονδύλου.

4.3 Προεπισκόπηση προτύπων ISO για την διαχείριση της ενέργειας.

Η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας είναι ένας αναδυόμενος τομέας που μπορεί να επωφεληθεί από τη χρήση των προτύπων ISO. Ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO) είναι ένας παγκοσμίως αναγνωρισμένος οργανισμός καθορισμού προτύπων που αναπτύσσει διεθνή πρότυπα για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Στον κλάδο που αφορά την διαχείριση της ενέργειας έχει αναπτύξει ένα σύνολο προτύπων γνωστών ως σειρά ISO 50001.

Το ISO 50001 είναι ένα πρότυπο για συστήματα διαχείρισης ενέργειας που παρέχει ένα πλαίσιο για τους οργανισμούς να διαχειρίζονται και να αναπτύξουν τις ενεργειακές τους επιδόσεις. Το πρότυπο έχει σχεδιαστεί ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους οργανισμών, ανεξαρτήτως μεγέθους, τομέα ή τοποθεσίας. Καθορίζει τις απαιτήσεις ενός οργανισμού για την εφαρμογή, διατήρηση και βελτίωση ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης, με γνώμονα τις μετρήσεις της ενεργειακής απόδοσης.

Εκτός από το ISO 50001, υπάρχουν πολλά άλλα πρότυπα ISO που σχετίζονται με τη διαχείριση της ενέργειας, όπως το ISO 14001 (συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης), το ISO 9001 (συστήματα διαχείρισης ποιότητας) και το ISO 26000 (κοινωνική ευθύνη).

Ως συμπέρασμα, τα πρότυπα ISO παρέχουν ένα σύνολο κανονισμών και λύσεων για συστήματα διαχείρισης ενέργειας που μπορούν να βοηθήσουν τους οργανισμούς να βελτιώσουν την ενεργειακή τους απόδοση και να μειώσουν το ενεργειακό κόστος. Η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων σε συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας είναι ένας σημαντικός τομέας έρευνας που μπορεί να επωφεληθεί από τη χρήση των προτύπων ISO για να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας είναι αποτελεσματικά και αποδοτικά [89].

Πριν την επισκόπηση των ISO καλό είναι να γίνει μια βασική διατύπωση των όρων που θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω.

- EnB (Energy Baseline) : Χρησιμοποιείται στα ενεργειακά πρότυπα για τον καθορισμό ενός σημείου εκκίνησης για την μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης. Πρόκειται για ένα στιγμιότυπο της κατανάλωσης ενέργειας ενός οργανισμού σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- EnMS (Energy Management System) : Αναφέρεται στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας, ως ένα σύνολο διεργασιών και πολιτικών που χρησιμοποιεί ένας οργανισμός για την διαχείριση και βελτίωση της ενεργειακής του απόδοσης.
- EnPIs (Energy Performance Indicator) : Ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης ενός EnMS. Εκφράζει την αξιολόγηση της ενέργειας με διάφορους τρόπους όπως η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα παραγωγής, ανά μονάδα επιφάνειας ή ανά εργαζόμενο.

- EnPTs (Energy Performance Targets) : Οι στόχοι ενεργειακής απόδοσης αναφέρονται σε συγκεκριμένους και μετρήσιμους στόχους που θέτει ένας οργανισμός για την βελτίωση του EnMS.
- Normalization : Η κανονικοποίηση επιτρέπει στους οργανισμούς να συγκρίνουν την ενεργειακή απόδοση με την πάροδο του χρόνου και μεταξύ διαφορετικών εγκαταστάσεων ή διεργασιών σε ισότιμη βάση, λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις αυτών των μεταβλητών και παρουσιάζοντας τα δεδομένα σε κοινή κλίμακα.
- M&V (Measurement and Verification) : Πρόκειται για μια διαδικασία που περιλαμβάνει την ποσοτικοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει συνήθως τη μέτρηση και τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή των μέτρων ενεργειακής απόδοσης, την επαλήθευση της εξοικονόμησης που επιτεύχθηκε μέσω των μέτρων αυτών και την απόδοση της εξοικονόμησης αυτής στα μέτρα που εφαρμόστηκαν.

4.3.1 ISO 50001

Το ISO 50001 όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί ένα διεθνές πρότυπο, το οποίο ορίζει τις απαιτήσεις που πρέπει να καλύπτει ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Σκοπός του είναι να παρέχει στους οργανισμούς που διαχειρίζονται τέτοια συστήματα, ένα ευρύ φάσμα λύσεων με συγκεκριμένες προϋποθέσεις για την εφαρμογή τους, προκειμένου να βελτιώσουν την ενεργειακή τους απόδοση και να ελαχιστοποιήσουν τις μολύνσεις που μπορεί να προκαλούν στο περιβάλλον.

Η ανάπτυξη του ISO 50001 καθοδηγήθηκε από την παγκόσμια ανάγκη να αντιμετωπιστεί η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και οι σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως η κλιματική αλλαγή. Ιστορικά, το ISO 50001 στα πρώιμα στάδια ανάπτυξής του χρονολογείται από το 2007, και δημιουργήθηκε με βάση την επιθυμία ανάπτυξης ενός διεθνούς προτύπου ενεργειακής διαχείρισης, από τον οργανισμό βιομηχανικής ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (UNIDO) και του εθνικού ινστιτούτου μετρολογίας, ποιότητας και τεχνολογίας της βραζιλίας (INMETRO), ως έναν τρόπο αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Το 2008 ακολούθησε, η υιοθέτηση του προτύπου από τον διεθνή οργανισμό τυποποίησης (ISO), και μια ομάδα η οποία απαρτίζεται από εκπροσώπους βιομηχανιών, κυβερνητικά πρόσωπα και μη κυβερνητικές οργανώσεις, οι οποίοι ανέλαβαν την σχεδίαση και την ανάπτυξη του προτύπου για τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης [90]. Η πρώτη έκδοση του προτύπου δημοσιεύθηκε τον Ιούνιο του 2011 και αναθεωρήθηκε και επικαιροποιήθηκε το 2018. Το μοντέλο που αποτέλεσε βάση για την ανάπτυξη των κανονισμών του προτύπου, ονομάζεται PDCA, δηλαδή Plan-Do-Check-Act [91]. Ουσιαστικά ορίζει την σειρά που θα πρέπει να εξετάζεται ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας ξεκινώντας από

ένα πλάνο ή ένα σχέδιο για την βελτιστοποίηση του. Μετά ακολουθεί η ενέργεια, δηλαδή η εφαρμογή του σχεδίου στο σύστημα και έπειτα ο έλεγχος της ορθότητας της λειτουργίας του συστήματος. Τέλος, ανάλογα την επιτυχία ή την αποτυχία του σχεδίου ο οργανισμός θα πρέπει να δράσει αναλόγως και να αναθεωρήσει το αρχικό πλάνο. Αποτελεσματικά, αυτό το μοντέλο διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για τις βιομηχανίες και για λοιπούς οργανισμούς να δημιουργούν, να εφαρμόζουν και να διατηρούν συνεχώς ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Περαιτέρω, καθορίζει τις απαιτήσεις για τους δείκτες ενεργειακής απόδοσης, τις ενεργειακές βάσεις και τους στόχους βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

Το ISO 50001 είναι αρκετά ευέλικτο ως προς τις προϋποθέσεις και τους κανονισμούς που ορίζει καθώς έχει την δυνατότητα εφαρμογής σε πλήθος οργανισμών ανεξαρτήτως με το είδος τους και το περιβάλλον που εδρεύουν. Ο σχεδιασμός του προτύπου, του επιτρέπει να είναι εύκολα προσαρμόσιμο, ώστε οι βιομηχανίες να είναι σε θέση να μεταβάλλουν τις ρυθμίσεις των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που έχουν στην διάθεσή τους, ανάλογα με τις ανάγκες τους. Πολύ σημαντικό είναι επίσης ότι το πρότυπο συνεργάζεται άριστα με άλλα πρότυπα διαχείρισης, όπως το ISO 9001 που αφορά την διαχείριση της ποιότητας και το ISO 140001 για την περιβαλλοντική διαχείριση.

Το πρότυπο βασίζεται σε ορισμένες αρχές, μεταξύ των οποίων είναι :

- Κατανόηση της χρήσης και των προτύπων κατανάλωσης ενέργειας του οργανισμού.
- Προσδιορισμός δεικτών ενεργειακών επιδόσεων και στόχων ενεργειακών επιδόσεων.
- Δέσμευση από την ανώτατη διοίκηση για τη δημιουργία ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας.
- Εφαρμογή μέτρων ενεργειακής απόδοσης και παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης.
- Τακτική παρακολούθηση, μέτρηση και υποβολή εκθέσεων σχετικά με τις ενεργειακές επιδόσεις.
- Συνεχής βελτίωση του συστήματος μέσω του κύκλου PDCA.

Περισσότερες από 20.000 επιχειρήσεις παγκοσμίως συμμερίζονται τις αρχές του προτύπου ISO 50001 και έχουν πιστοποιηθεί για την πληρότητα των ευθυνών που καλούνται να καλύψουν. Το πρότυπο έχει βραβευτεί για την ευελιξία του, επιτρέποντας στους οργανισμούς να προσαρμόζουν τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας που έχουν στην κατοχή τους, στις συγκεκριμένες ανάγκες τους.

4.3.2 ISO 50003

Ως ένα εργαλείο το οποίο βοηθά στην ενσωμάτωση του προτύπου ISO 50001, το ISO 50003 δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά το 2014 και το 2021 αναθεωρήθηκε προκειμένου να βελτιώσει την χρηστικότητα του και να ευθυγραμμιστεί πλήρως με τις αρχές του ISO 50001:2018 [1].

Κύριο μέλημα του ISO 50003 είναι να παρέχει οδηγίες στους οργανισμούς για την βέλτιστη και αποτελεσματική εφαρμογή του ISO 50001. Το πρότυπο έχει σχεδιαστεί ώστε να παρέχει οδηγίες σχετικά με τον τρόπο δημιουργίας, εφαρμογής, διατήρησης και βελτίωσης ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου του τρόπου διεξαγωγής μιας ενεργειακής ανασκόπησης και ανάπτυξης μιας ενεργειακής γραμμής βάσης. Το πρότυπο παρέχει επίσης καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο παρακολούθησης και μέτρησης της ενεργειακής απόδοσης και τον τρόπο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

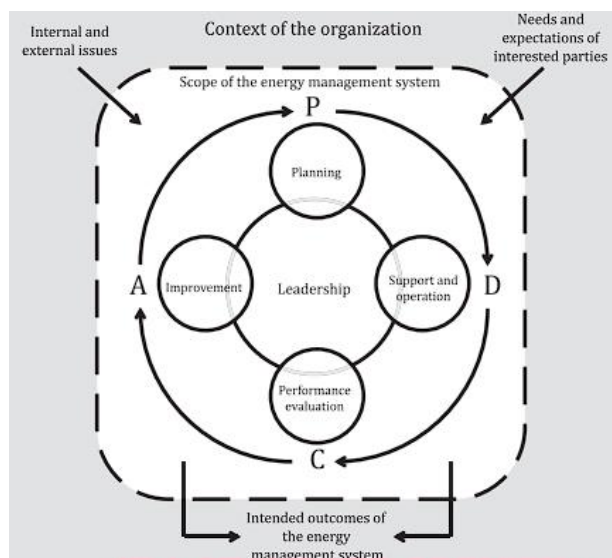
Μετά την κυκλοφορία του προτύπου 50003 πολλές επιχειρήσεις ήρθαν αντιμέτωπες με την εφαρμογή του παρά την ευελιξία του προτύπου, έτσι η ανάγκη για την λύση αυτού του ζητήματος καθοδήγησε την ανάπτυξη του ISO 50001. Για την ανάπτυξη του προτύπου συμμετείχαν ομάδες από εμπειρογνώμονες στον κλάδο της ενέργειας από 50 χώρες. Η ομάδα εργασίας χρησιμοποίησε μια προσέγγιση βασισμένη στη συναίνεση για την ανάπτυξη του προτύπου, η οποία περιελάμβανε εκτεταμένες διαβουλεύσεις με τα ενδιαφερόμενα μέρη και πολλαπλούς γύρους αναθεώρησης [92]. Το ISO 50003 βασίζεται στο ίδιο μοντέλο διαχείρισης Plan-Do-Check-Act (PDCA) με το ISO 50001. Το πρότυπο παρέχει λεπτομερή καθοδήγηση για κάθε βήμα του κύκλου PDCA και τονίζει τη σημασία της συνεχούς βελτίωσης του EnMS. Το πρότυπο παρέχει επίσης καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο ενσωμάτωσης του EnMS με άλλα συστήματα διαχείρισης, όπως το ISO 9001 (διαχείριση ποιότητας) και το ISO 14001 (περιβαλλοντική διαχείριση).

Όπως και το ISO 50001, έτσι και το ISO 50003 βασίζεται σε κάποιους κανόνες για την ενσωμάτωσή του, αυτοί μπορεί να είναι :

- Ενεργειακή ανασκόπηση: Το ISO 50003 τονίζει τη σημασία της διεξαγωγής μιας συνολικής ενεργειακής ανασκόπησης για τον εντοπισμό ευκαιριών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.
- Ενεργειακή γραμμή βάσης (EnB) : Το πρότυπο παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο δημιουργίας μιας ενεργειακής γραμμής βάσης, η οποία χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης με την πάροδο του χρόνου και τη μέτρηση της προόδου προς την επίτευξη των στόχων ενεργειακής απόδοσης.
- Δείκτες ενεργειακής απόδοσης (EnPIs) : Το πρότυπο ISO 50003 παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο επιλογής και χρήσης των EnPIs για τη μέτρηση της ενεργειακής απόδοσης και την παρακολούθηση της προόδου προς την επίτευξη των στόχων ενεργειακής απόδοσης.
- Στόχοι ενεργειακής απόδοσης (EnPTs) : Το πρότυπο παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο καθορισμού των EnPTs που είναι ευθυγραμμισμένοι με την ενεργειακή πολιτική και τους στόχους του οργανισμού.

- Συνεχής βελτίωση: Το ISO 50003 τονίζει τη σημασία της συνεχούς βελτίωσης του ΣΔΑΕ και παρέχει οδηγίες για τον τρόπο χρήσης του κύκλου PDCA για τον εντοπισμό και την εφαρμογή βελτιώσεων της ενεργειακής απόδοσης.

Τέλος, το ISO 50003 παρέχει καθοδήγηση για την εφαρμογή του προτύπου ISO 50001 για το σύστημα διαχείρισης ενέργειας. Το πρότυπο βασίζεται στο μοντέλο διαχείρισης PDCA και τονίζει τη σημασία της συνεχούς βελτίωσης του ΣΔΕ. Το ISO 50003 εφαρμόζεται σε οργανισμούς όλων των μεγεθών και τομέων και προορίζεται να χρησιμοποιηθεί από οργανισμούς, συμβούλους και ελεγκτές που εμπλέκονται στην εφαρμογή και τον έλεγχο του συστήματος διαχείρισης ενέργειας.



Πίνακας 16 : Κύκλος PDCA

4.3.3 ISO 50004

Το ISO 50004 είναι επιτελεί τον ίδιο σκοπό με το ISO 50003 και είναι στενά συνδεδεμένα, ωστόσο παρουσιάζουν μερικές διαφορές στον τρόπο που εστιάζουν για την επίλυση του προβλήματος της διαχείρισης της ενέργειας.

Καθώς το ISO 50003 εστιάζει στην μέτρηση και εξακρίβωση της ενεργειακής απόδοσης, ενώ παράλληλα παρέχει κατάλληλες οδηγίες για την δημιουργία δεικτών ενεργειακής απόδοσης (EnPIs), το ISO 50004 εστιάζει σε μια ευρύτερη καθοδήγηση για την εφαρμογή ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, συμπεριλαμβάνει τους τρόπους με τους οποίους είναι εφικτή η ανάπτυξη μιας ενεργειακής πολιτικής, την σύσταση μιας υπεύθυνης ενεργειακής ομάδας που θα διαχειρίζεται το σύστημα, καθώς και την ενσωμάτωση του με άλλα συστήματα διαχείρισης.

Το ISO 50004, παρέχει επίσης πιο λεπτομερές οδηγίες για την εφαρμογή του EnMS, εστιάζοντας περισσότερο στον τομέα της παρακολούθησης και μέτρησης, και στην διεξαγωγή εσωτερικών ελέγχων [93].

Σημαντικό προς αναφορά είναι επίσης, η ευελιξία εφαρμογής του προτύπου από τις βιομηχανίες. Καθώς το ISO 50003 προορίζεται κυρίως για χρήση από οργανισμούς που εφαρμόζουν το ISO 50001, το ISO 50004 μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οργανισμούς όλων των μεγεθών και τομέων.

4.3.4 ISO 50006

Το ISO 50006 όπως και τα υπόλοιπα πρότυπα του κλάδου του, παρέχει οδηγίες για τον τρόπο μέτρησης και επαλήθευσης της ενεργειακής απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας σε οργανισμούς.

Σκοπός του ISO 50006 είναι να παρέχει στους οργανισμούς μια συστηματική προσέγγιση για τη μέτρηση και την επαλήθευση της ενεργειακής απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας. Το πρότυπο προορίζεται να βοηθήσει τις εταιρείες να εντοπίσουν εκείνες τις λύσεις που θα τους προσφέρουν εξοικονόμηση ενέργειας, να θέσουν στόχους ενεργειακής απόδοσης και να μετρήσουν την πρόοδο προς την επίτευξη αυτών των στόχων. Το πρότυπο αυτό είναι εξίσου ευέλικτο όσο και τα υπόλοιπα.

Το ISO 50006 παρέχει καθοδήγηση για τον τρόπο κατάρτισης ενός σχεδίου μέτρησης και επαλήθευσης της ενεργειακής απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας.

Παρέχει επίσης καθοδήγηση σχετικά με τον τρόπο διασφάλισης της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των δεδομένων ενεργειακής απόδοσης. Αυτό περιλαμβάνει καθοδήγηση σχετικά με τις μεθόδους συλλογής δεδομένων, τη διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων και τη χρήση στατιστικών μεθόδων για την ανάλυση των δεδομένων.

Περαιτέρω το πρότυπο εστιάζει στην ανάπτυξη ενός σχεδίου που εμπεριέχει τον προσδιορισμό των δεικτών ενεργειακής απόδοσης, τον καθορισμό μιας βάσης για την ενεργειακή απόδοση, την ανάπτυξη ενός σχεδίου μέτρησης και της επαλήθευσης του [94]. Η περιγραφή των βημάτων για τον σχεδιασμό ενός συστήματος είναι αρκετά συγκεκριμένα και σαφή.

Στο πρώτο βήμα αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να αντληθούν πληροφορίες από τα δεδομένα της ενεργειακής απόδοσης. Θα πρέπει να καθοριστεί ένα βασικό όριο για του δείκτες της ενεργειακής απόδοσης, να γίνει ποσοτικοποίηση των ενεργειακών ροών και των στατικών παραγόντων, και τέλος να πραγματοποιηθεί η συγκέντρωση όλων αυτών των δεδομένων.

Στο δεύτερο βήμα, το σχέδιο αναδεικνύει τους τρόπους που μπορεί ο οργανισμός να προσδιορίσει του δείκτες της ενεργειακής απόδοσης. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί αρχικά με την αναγνώριση των χρηστών των δεικτών της ενεργειακής απόδοσης. Έπειτα θα πρέπει να οριστούν τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της ενεργειακής απόδοσης που προορίζονται για ποσοτικοποίηση.

Για το τρίτο βήμα βασικός είναι ο προσδιορισμός μιας περιόδου που διασφαλίζει ένα κατάλληλο σημείο αναφοράς, προκειμένου να γίνουν δοκιμές στα EnBs.

Το τέταρτο βήμα αφορά τους δείκτες ενεργειακής επίδοσης, και εστιάζει στον υπολογισμό των κατάλληλων μεταβλητών για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, καθώς και στην επικοινωνία που θα πρέπει να υπάρχει στην ομάδα που διαχειρίζεται το σύστημα για την διακρίβωση των αλλαγών στο σύστημα εάν αυτό είναι απαραίτητο. Επίσης, ορίζει την εξακρίβωση του χρονικού σημείου όπου πρέπει να γίνει κανονικοποίηση (normalization).

Τέλος, το πιο σημαντικό βήμα από όλα, είναι η διατήρηση και η προσαρμογή των δεικτών ενεργειακής απόδοσης, και η συνεχής βελτίωση σε κάθε ξεχωριστό βήμα του πλάνου.

Το ISO 50006 συνδέεται με άλλα πρότυπα ενεργειακής διαχείρισης, όπως το ISO 50001 και το ISO 50015 (Μέτρηση και επαλήθευση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων). Μαζί, τα πρότυπα αυτά παρέχουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη διαχείριση της ενεργειακής απόδοσης και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας στους οργανισμούς [95].

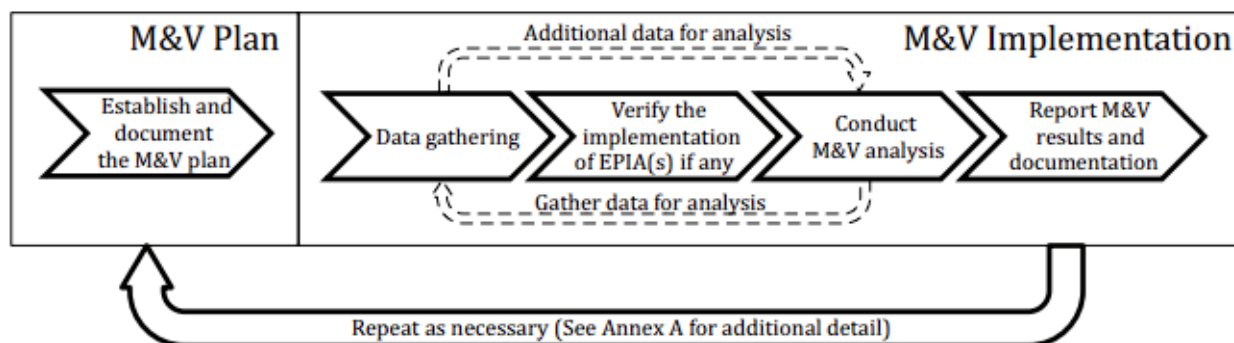
Συνολικά, το ISO 50006 είναι ένα ιδανικό πρότυπο για τους οργανισμούς που επιθυμούν να βελτιώσουν την ενεργειακή τους απόδοση. Ακολουθώντας την καθοδήγηση που παρέχεται στο πρότυπο, οι οργανισμοί μπορούν να αναπτύξουν μια συστηματική προσέγγιση για τη μέτρηση και την επαλήθευση της ενεργειακής τους απόδοσης, η οποία μπορεί να τους βοηθήσει να βελτιώσουν τη συνολική ενεργειακή τους απόδοση.

4.3.5 ISO 50015

Το ISO 50015 αφορά ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε με βασική αρχή σχεδίασης την παροχή βοήθειας στους οργανισμούς έτσι ώστε να δημιουργήσουν, να εφαρμόσουν, να διατηρήσουν και να βελτιώσουν τα συστήματα μέτρησης και επαλήθευσης ενέργειας (M&V) [96]. Το πρότυπο βασίζεται σε ένα ολοκληρωμένο πλάνο M&V, το οποίο παρέχει την διαδικασία ανάπτυξης των στόχων της διαδικασίας.

Το πρότυπο εφαρμόζεται σε κάθε οργανισμό, και έχει σχεδιαστεί ώστε να είναι αρκετά ευέλικτο για να μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων που χρησιμοποιούν ενέργεια, συμπεριλαμβανομένων των κτιρίων, των βιομηχανικών διεργασιών και των μεταφορών. Επίσης, εφαρμόζεται τόσο σε νέα όσο και σε υφιστάμενα συστήματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση και την επαλήθευση της εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτει από μέτρα ενεργειακής απόδοσης, καθώς και για την αξιολόγηση της απόδοσης των αντίστοιχων συστημάτων.

Το πρότυπο ορίζει το σχέδιο που χρησιμοποιεί, ως τη διαδικασία χρήσης μετρήσεων και αναλύσεων για τον προσδιορισμό της πραγματικής εξοικονόμησης ενέργειας που επιτυγχάνεται από ένα μέτρο ενεργειακής απόδοσης. Επίσης, παρέχει καθοδήγηση για την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων και τεχνικών για το συγκεκριμένο σχέδιο, συμπεριλαμβανομένων των πρωτοκόλλων μέτρησης, των μεθόδων υπολογισμού και της στατιστικής ανάλυσης. Υπογραμμίζει τη σημασία της χρήσης κατάλληλου εξοπλισμού μέτρησης και διαδικασιών διασφάλισης της ποιότητας των δεδομένων για τη διασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που εξάγονται. Εκτός από την παροχή καθοδήγησης σχετικά με το σχεδιασμό και την εφαρμογή του πλάνου, το πρότυπο περιλαμβάνει απαιτήσεις για το προσωπικό, συμπεριλαμβανομένης της εκπαίδευσης, της κατάρτισης και της εμπειρίας του. Παρέχει επίσης καθοδήγηση σχετικά με την αξιολόγηση και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, εμπιρεύοντας τον καθορισμό δεικτών απόδοσης και της ανάπτυξης εκθέσεων που βοηθούν στην κατανόηση αλλά και στην καθημερινή συγκέντρωση των πληροφοριών που προέκυψαν κατά την διαδικασία του πλάνου. Το πρότυπο αυτό έχει σχεδιαστεί για χρήση σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα πρότυπα διαχείρισης ενέργειας, και λαμβάνει υποστηρικτική θέση δίνοντας την ευκαιρία στους οργανισμούς μέσω του σχεδίου M&V που είναι σύμφωνο με τις απαιτήσεις των άλλων προτύπων, να επιτύχουν τους στόχους τους για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης [97].



Πίνακας 17 : Βασικά βήματα για την ανάπτυξη της διαδικασίας του M&V.

4.4 Εξοικονόμηση ενέργειας στις σύγχρονες βιομηχανίες.

Η εξοικονόμηση ενέργειας αποτελεί ένα ολοένα και πιο κρίσιμο ζήτημα στις σύγχρονες βιομηχανίες, με την αυξανόμενη έμφαση σε βιώσιμες και περιβαλλοντικά συνειδητές πρακτικές και την ανάγκη μείωσης του ενεργειακού κόστους που συνδέεται με τις διαδικασίες παραγωγής. Ενώ τα ψηφιακά δίδυμα έχουν συζητηθεί ως μια πιθανή λύση για την εξοικονόμηση ενέργειας, υπάρχουν και άλλες σημαντικές τεχνικές και τεχνολογίες στις οποίες στρέφονται οι βιομηχανίες για την αποτελεσματική διαχείριση

της ενέργειας. Στις επόμενες ενότητες, θα παρουσιαστούν ορισμένες από αυτές τις προσεγγίσεις και τις συγκεκριμένες εφαρμογές τους σε βιομηχανίες παγκοσμίως, μαζί με μια επεξήγηση του τρόπου λειτουργίας τους. Συγκρίνοντας αυτές τις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας με την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τα αντίστοιχα οφέλη και πλεονεκτήματά τους. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να συνεργαστούν με αυτές τις τεχνικές, ενισχύοντας τη διαδικασία ελέγχου, παρακολούθησης και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των βιομηχανικών λειτουργιών.

4.4.1 Χρήση καυσίμου LPG.

Το καύσιμο LPG προκύπτει από την ονομασία Liquefied Petroleum Gas, και είναι μια μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Αποτελεί ένα είδος καυσίμου το οποίο αποτελείται από αέρια προπανίου (C_3H_8), ισοβουτανίου, προπυλενίου ή/και βουτανίου (C_4H_{10}). Κάθε ένα από τα συστατικά αυτά έχουν διαφορετικές ιδιότητες και συγκεντρώσεις υγραερίου σε υγρή ή αέρια μορφή ανάλογα την θερμοκρασία και την πίεση αντίστοιχα. Πρόκειται για ένα καύσιμο υδρογονανθράκων (τρία ή τέσσερα άτομα άνθρακα), που παράγεται κατά τη διύλιση του αργού πετρελαίου ή του φυσικού αερίου [98].

Το υγραέριο αποθηκεύεται υπό πίεση σε δεξαμενές ως υγρό και μετατρέπεται σε αέριο όταν απελευθερώνεται από τη δεξαμενή. Πρόκειται για ένα ευέλικτο καύσιμο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποικίλες εφαρμογές, δεδομένου ότι παρουσιάζει ποικίλες ιδιότητες που χρησιμεύουν σε πολλές διεργασίες [99].

Μερικές ιδιότητες του LPG που αποτελείται κυρίως από προπάνιο και βουτάνιο [100] είναι :

- Θερμοκρασία φλόγας : $1970\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Θερμοκρασία σημείου βρασμού υγραερίου : $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Θερμοκρασία τήξης : $-188\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Μισό βάρος από αυτό του νερού.
- Εύκολη υγροποίηση με πίεση.
- Αποθήκευση μεγάλης ποσότητας σε μικρό χώρο καθώς καταλαμβάνει το 1/250 του αερίου όγκου του.
- Εξαιτίας του προπανίου έχει χαμηλό σημείο βρασμού με αποτέλεσμα υψηλότερη πίεση αποθήκευσης.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης του LPG είναι το υψηλό ενεργειακό του περιεχόμενο, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να παρέχει περισσότερη θερμότητα ανά μονάδα όγκου σε σύγκριση με άλλα καύσιμα όπως το φυσικό αέριο ή το ντίζελ [101].

Το LPG αποτελεί ένα καύσιμο το οποίο έχει υψηλή θερμογόνο δύναμη, και έτσι επιτρέπει την δημιουργία θερμότητας και επομένως ενέργειας σε χαμηλότερο κόστος σε αντίθεση με άλλα καύσιμα. Άξιο σημείωσης είναι επίσης η ασφάλεια που παρέχει στο περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα καύσιμα, καθώς λόγω της υψηλής θερμοκρασίας ανάφλεξης είναι αρκετά δύσκολο να αναφλεχθεί από εξωτερικές πηγές θερμότητας. Επιπλέον, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο, παράγει αρκετά καθαρότερη και συνεπή καύση, γεγονός που το καθιστά αρκετά αξιόπιστο από άλλες μορφές ενέργειας. Συγκριτικά με το πετρέλαιο το LPG απελευθερώνει μόνο το 81 % του διοξειδίου του άνθρακα του πετρελαίου, με αποτέλεσμα να είναι μια αρκετά καλή επιλογή για την μείωση εκπομπών επικίνδυνων ρύπων, περιορίζοντας την κλιματική αλλαγή καθώς δεν αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου. Περαιτέρω, με την χρήση του LPG, βελτιώνεται σημαντικά η ποιότητα του αέρα σε σχέση με τα υπόλοιπα παραδοσιακά καύσιμα. Όπως έχει προαναφερθεί, σημαντικός είναι ο παράγοντας της αποθήκευσης του καυσίμου και σε αυτόν τον τομέα το LPG είναι αρκετά ευέλικτο. Εκθέτοντάς το σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, σε μια μέτρια πίεση, το καύσιμο υγροποιείται, έτσι η αποθήκευση και αντίστοιχα η μεταφορά του είναι αρκετά εύκολη. Σε πολλές χώρες το υγραέριο, έχει καθιερωθεί ως ένα καύσιμο έως και πέντε φορές πιο αποδοτικό σε θέματα κόστους και ενέργειας από άλλα καύσιμα [102]. Πιο συγκεκριμένα, στην Αμερική, χαρακτηρίζεται αποδεδειγμένα ότι έχει υψηλότερη απόδοση από το ντίζελ ή το φυσικό αέριο για την παραγωγή ενέργειας. Το LPG χρησιμοποιείται συχνά στις χαλυβουργίες ως καύσιμο σε κλιβάνους και σε μηχανές κοπής με την χρήση φλόγας για την συνεχή χύτευση. Επίσης, χρησιμεύει και ως καύσιμο αερίου για συγκόλληση ή κοπή, καθώς και για ενανθράκωση του χάλυβα. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας σύγκρισης του καυσίμου LPG με υπόλοιπα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

Τύπος καυσίμου	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
LPG	Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο - Αποδοτικό - Καθαρή καύση - Φορητό	Απαιτήσεις αποθήκευσης και χειρισμού - Υψηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού

Φυσικό αέριο	Καθαρή καύση - Άφθονο - Χαμηλές εκπομπές - Αποδοτικό	Κόστος μετακίνησης - Απαιτήσεις υποδομής αγωγών - Εκρηκτικό και εύφλεκτο
Diesel	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα - Χαμηλός κίνδυνος διαρροής	Υψηλότερες εκπομπές - επιβλαβείς αναθυμιάσεις - Συμβολή στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή
Gasoline	Εύκολη ανάφλεξη και χρήση - Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα	Υψηλότερες εκπομπές - Ευμετάβλητο - Συμβολή στην ατμοσφαιρική ρύπανση

Το υγραέριο ωστόσο παρουσιάζει και αρκετές ιδιαιτερότητες γεγονός που το καθιστά ορισμένες φορές μη κατάλληλο προς χρήση. Η αέρια μορφή του υγραερίου είναι περίπου δύο φορές πυκνότερη από τον αέρα, με αποτέλεσμα να είναι πιθανό να συσσωρευτεί σε χαμηλότερα σημεία, όπως κελάρια, δεξαμενές και αποχετεύσεις. Η έκθεση σε υγρό υγραέριο μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά ψυχρά εγκαύματα στο δέρμα, καθώς εξατμίζεται γρήγορα, προκαλώντας πτώση της θερμοκρασίας που μπορεί να προκαλέσει βλάβη στον εξοπλισμό. Προς αποφυγή κινδύνων πυρκαγιάς και έκρηξης, είναι σημαντική η αποθήκευση και ο ορθός χειρισμός του καυσίμου, καθώς μπορεί να σχηματίσει εύφλεκτο μείγμα με τον αέρα σε συγκεντρώσεις που κυμαίνονται από 2% έως 10% [103]. Τυχόν διαρροές μπορούν να αναφλεγούν από απόσταση και ενδεχομένως να ταξιδέψουν πίσω στην πηγή. Όταν οι ατμοί υγραερίου αναμειγνύονται με τον αέρα σε υψηλές συγκεντρώσεις, μπορεί να προκαλέσουν αναισθησία και ασφυξία στους οργανισμούς κοντά του, καθώς αραιώνουν το διαθέσιμο οξυγόνο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ακόμη και τα άδεια δοχεία υγραερίου μπορεί να εξακολουθούν να περιέχουν επικίνδυνους ατμούς, επομένως θα πρέπει να αντιμετωπίζονται σαν να είναι γεμάτα.

Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα χρήσης του υγραερίου ως καύσιμο για τις βιομηχανίες, είναι η λειτουργία των κλάρκ (forklifts) στις αποθήκες ή στα κέντρα διανομής με την χρήση LPG ως πηγή καυσίμου. Τα ανυψωτικά μηχανήματα είναι απαραίτητα για τη μετακίνηση βαρέων εμπορευμάτων και υλικών στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις, και αυτά που λειτουργούν με υγραέριο είναι μια δημοφιλής επιλογή λόγω της υψηλής αποδοτικότητας και των χαμηλών εκπομπών τους. Σε σύγκριση με τα πετρελαιοκίνητα ή βενζινοκίνητα ανυψωτικά μηχανήματα, τα περονοφόρα με υγραέριο έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Το υγραέριο παράγει λιγότερες εκπομπές από το ντίζελ ή τη βενζίνη, γεγονός που το καθιστά μια πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή. Το υγραέριο καίγεται επίσης πιο καθαρά, πράγμα που σημαίνει ότι τα περονοφόρα οχήματα απαιτούν λιγότερη συντήρηση και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αυτό μπορεί να

συμβάλει στην αύξηση της παραγωγικότητας και στη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας.

Για την λειτουργία των περονοφόρων οχημάτων με υγραέριο απαιτείται ένα σύστημα καυσίμου στο οποίο το υγραέριο αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή, και στην συνέχεια το καύσιμο παραδίδεται στον κινητήρα μέσω μιας γραμμής καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, το υγραέριο αναμιγνύεται με αέρα στο καρμπυρατέρ του κινητήρα και στη συνέχεια το μείγμα συμπιέζεται και αναφλέγεται από ένα μπουζί, δίνοντας στον κινητήρα την ευκαιρία να παράξει ισχύ στους τροχούς το οχήματος.

4.4.2 Συστήματα : Waste to Energy

Τα συστήματα μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια (WTE) στις βιομηχανίες είναι εγκαταστάσεις που μετατρέπουν διάφορα είδη αποβλήτων σε ενέργεια, συνήθως με τη μορφή θερμότητας, ατμού ή ηλεκτρισμού. Τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα για την επεξεργασία διαφόρων αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένων των στερεών αποβλήτων, των επικίνδυνων αποβλήτων και των βιομηχανικών υποπροϊόντων, με σκοπό την ανάκτηση του ενεργειακού περιεχομένου αυτών των αποβλήτων.

Τα απόβλητα συνήθως καίγονται σε θάλαμο καύσης, και η παραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού, ο οποίος με τη σειρά του κινεί μια στροβιλογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Εναλλακτικά, η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για βιομηχανικές διεργασίες ή για τη θέρμανση κτιρίων.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες, μερικοί από αυτούς είναι :

- Αποτέφρωση: όπου τα απόβλητα καίγονται σε υψηλές θερμοκρασίες για την παραγωγή ατμού και ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αεριοποίηση: Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη θέρμανση των αποβλήτων απουσία οξυγόνου για τη δημιουργία ενός συνθετικού αερίου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή άλλων μορφών ενέργειας.
- Πυρόλυση: Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη θέρμανση αποβλήτων απουσία οξυγόνου για την παραγωγή ενός υγρού καυσίμου που ονομάζεται πετρέλαιο πυρόλυσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αναερόβια χώνευση: Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει τη διάσπαση των οργανικών αποβλήτων απουσία οξυγόνου για την παραγωγή βιοαερίου, το

οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας.

- Αεριοποίηση με πλάσμα: Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί ένα τόξο πλάσματος για τη μετατροπή των αποβλήτων σε αέριο σύνθεσης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή άλλων μορφών ενέργειας.
- Ανάκτηση αερίου από χώρους υγειονομικής ταφής: Πρόκειται για τη σύλληψη και χρήση του αερίου μεθανίου που παράγεται από την αποσύνθεση των αποβλήτων στους χώρους υγειονομικής ταφής για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας.

Αυτά είναι μερικά μόνο παραδείγματα των τύπων συστημάτων μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια που χρησιμοποιούνται στις βιομηχανίες. Η επιλογή της τεχνολογίας εξαρτάται από τον τύπο των αποβλήτων που υποβάλλονται σε επεξεργασία, την απαιτούμενη ποσότητα ενέργειας και άλλους παράγοντες που αφορούν τη συγκεκριμένη βιομηχανία.

Μια συγκεκριμένη περίπτωση συστήματος WTE είναι ο θάλαμος μαζικής καύσης Brescia, ο οποίος εδρεύει στην εγκατάσταση SEMASS στη Μασαχουσέτη, και αναπτύχθηκε από την Energy Answers Corp. Το σύστημα χρησιμοποιεί τεχνολογίες μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια που χρησιμοποιούν την καύση για την ανάκτηση της ενέργειας [104].

Αρχικά, γίνεται διαλογή και επεξεργασία των αποβλήτων για την απομάκρυνση τυχόν υλικών που δεν προορίζονται για καύση, όπως μέταλλα, γυαλί και πλαστικά. Αφού προετοιμαστούν τα απόβλητα, τροφοδοτούνται στο θάλαμο καύσης.

Ο θάλαμος καύσης είναι σχεδιασμένος να καίει τα απόβλητα σε θερμοκρασίες μεταξύ 850°C και 1100°C. Αυτή η υψηλή θερμοκρασία συμβάλλει στη διάσπαση των αποβλήτων στα συστατικά τους μέρη και παράγει ένα θερμό αέριο.

Έπειτα, το καυτό αέριο διοχετεύεται μέσω ενός συστήματος ανάκτησης θερμότητας, το οποίο εξάγει τη θερμότητα και τη μετατρέπει σε ατμό.

Ο ατμός που παράγεται από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας χρησιμοποιείται στη συνέχεια για την κίνηση στροβίλων, οι οποίοι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τους στροβίλους διοχετεύεται στη συνέχεια στο ηλεκτρικό δίκτυο για την παροχή τροφοδοσίας όπου είναι απαραίτητο.

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία καύσης, η εναπομείνασα τέφρα και άλλα παραπροϊόντα απομακρύνονται από τον θάλαμο καύσης και μεταφέρονται σε χώρο υγειονομικής ταφής. Η τέφρα που παράγεται από τη διαδικασία καύσης είναι συνήθως μη επικίνδυνη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε δομικά υλικά.

Τα συστήματα μετατροπής αποβλήτων σε ενέργεια μπορούν να προσφέρουν πολλά οφέλη για τις βιομηχανίες, όπως η μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που πρέπει να ταφεί, η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και η παραγωγή μιας αξιόπιστης πηγής ενέργειας. Ωστόσο, τα συστήματα αυτά μπορούν επίσης να γείρουν ανησυχίες σχετικά με τη ρύπανση του αέρα και την πιθανή απελευθέρωση

τοξικών ουσιών. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να σχεδιάζονται και να λειτουργούν προσεκτικά αυτά τα συστήματα ώστε να ελαχιστοποιούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

Κεφάλαιο 5ο – Γενική αρχιτεκτονική ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου.

5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια διατυπώθηκαν διάφορες έννοιες των ψηφιακών διδύμων και τις πιθανές εφαρμογές τους σε συστήματα. Περαιτέρω, παρουσιάστηκαν ζητήματα και τρόποι αντιμετώπισης που αφορούν την διαχείριση και την εξοικονόμηση ενέργειας σε βιομηχανίες στην σύγχρονη εποχή. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει εμβάθυνση στις ιδιαιτερότητες μιας γενικής αρχιτεκτονικής για ένα ψηφιακό δίδυμο που ανταποκρίνεται σε ενεργειακά θέματα.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των βασικών συστατικών στοιχείων ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου, συμπεριλαμβανομένης της απόκτησης δεδομένων, της μοντελοποίησης, της προσομοίωσης, της οπτικοποίησης κ.α, καλύπτοντας επίσης και τον επιχειρησιακό τομέα εστιάζοντας στην εξοικονόμηση του ενεργειακού κόστους . Θα συζητηθούν διάφορες τεχνικές και εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε καθένα από αυτά τα συστατικά και τον τρόπο με τον οποίο τα επίπεδα που απαρτίζουν την αρχιτεκτονική συνεργάζονται και επικοινωνούν μεταξύ τους, για τη ανάπτυξη του ψηφιακού διδύμου.

Εν κατακλείδι, το κεφάλαιο αυτό θα αποτελέσει τη βάση για την κατανόηση της αρχιτεκτονικής ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου και των πιθανών εφαρμογών του σε συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας. Η παρουσίαση, μιας μελέτης περίπτωσης που καταδεικνύει την εφαρμογή ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου σε ένα πραγματικό σενάριο, θα βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση των εννοιών που θα περιγραφούν μέσω των πρακτικών ζητημάτων της εφαρμογής.

5.2 Γενικευμένη Αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου - GDTA

Τα ψηφιακά δίδυμα όπως έχει προαναφερθεί μπορούν να ενσωματωθούν σε διάφορα σενάρια και συστήματα, και η αρχιτεκτονική τους ποικίλει ανάλογα με την λειτουργία τους. Η κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικές απαιτήσεις και προκλήσεις, και τα ψηφιακά δίδυμα επιτελούν πολλές διαφορετικές λειτουργίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές, η ομαδοποίηση και ο ορισμός - σχεδιασμός της αρχιτεκτονικής του να γίνει σύνθετος και περίπλοκος.

Για αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί όροι, και κανόνες που συμμορφώνονται με τις τεχνολογίες που φέρει το Industry 4.0, ορίζοντας τα βασικά στοιχεία των αρχικών,

ενδιάμεσων και τελικών επιπέδων της αρχιτεκτονικής ενός ψηφιακού διδύμου, καθώς και τους τρόπους επικοινωνίας μεταξύ αυτών. Έτσι, η σχεδίαση του συστήματος είναι αρκετά πιο εύκολη με την χρήση των διαφόρων εννοιών και κανόνων, που ορίζουν μια κατευθυντήρια γραμμή προς την ολοκλήρωση της ανάπτυξης ενός διαγράμματος, που αντικατοπτρίζει μέσω στρωμάτων (Layers) την αρχιτεκτονική του ψηφιακού διδύμου. Ακόμη, με αυτήν την μεθοδολογία, κατά την ολοκλήρωση των βασικών στοιχείων των στρωμάτων, η αρχιτεκτονική μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω, προσθέτοντας παραπάνω τεχνολογίες κάνοντας το ψηφιακό δίδυμο πιο εύχρηστο. Πρώτα όμως θα πρέπει να αναλυθούν οι βασικές έννοιες που ορίζουν την βάση για τον σχεδιασμό της γενικευμένης αρχιτεκτονικής του ψηφιακού διδύμου (Generic Digital Twin Architecture).

5.2.1 Reference Architectural Model for Industry 4.0 - RAMI 4.0

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση των ψηφιακών τεχνολογιών στις διαδικασίες παραγωγής, έτσι λοιπόν το RAMI 4.0 αποτελεί ένα μοντέλο αναφοράς που προσφέρει ένα τυποποιημένο πλαίσιο αρχιτεκτονικής, για την υλοποίηση λύσεων σε εφαρμογές που απευθύνονται στο Industry 4.0.

Το πλαίσιο RAMI 4.0 αναπτύχθηκε από τον ZVEI (German Electrical and Electronic Manufacturers' Association) και αναγνωρίζεται ευρέως ως μοντέλο αναφοράς για τη Βιομηχανία 4.0 [105].

Το μοντέλο βασίζεται σε μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική, με το κάθε στρώμα να αναπαριστά έναν συγκεκριμένο κλάδο του συστήματος, και μέσα σε κάθε στρώμα, υπάρχουν υποστρώματα που ορίζονται λεπτομερώς περιγράφοντας τις λειτουργίες του κάθε στρώματος. Τα στρώματα χωρίζονται συνοπτικά σε πέντε κατηγορίες :

1. Φυσικό στρώμα - Physical Layer: Περιλαμβάνει όλα τα φυσικά αντικείμενα του πραγματικού περιβάλλοντος που αξιοποιούνται για την λειτουργία του συστήματος. Αυτά μπορεί να είναι ένα σύνολο εξαρτημάτων, αισθητήρων, ενεργοποιητών, μηχανών και γενικώς τον εξοπλισμό που συνθέτει το σύστημα με σκοπό την ολοκλήρωση μια φυσικής εργασίας.
2. Στρώμα επικοινωνίας - Communication Layer : Η βασική λειτουργία του στρώματος είναι η επικοινωνία του φυσικού στρώματος με το στρώμα πληροφοριών. Περιλαμβάνει τις τεχνολογίες και τα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση της πληροφορίας.

3. Στρώμα πληροφοριών - Information Layer : Αναλαμβάνει την συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από το φυσικό σύστημα. Χρησιμοποιεί βάσεις δεδομένων, λογισμικά ανάλυσης και άλλα εργαλεία με σκοπό την παροχή των τελικών δεδομένων στο λειτουργικό στρώμα.
4. Λειτουργικό στρώμα - Functional Layer : Αποσκοπεί στην υλοποίηση των επιθυμητών λειτουργιών και των διαδικασιών που απαιτούνται από το σύστημα προκειμένου να εκτελέσει μια διαδικασία που βασίζεται σε τεχνολογίες του Industry 4.0. Στο στρώμα αυτό αξιοποιούνται οι εφαρμογές του λογισμικού, αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης για αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων και άλλες λειτουργίες. Επίσης το στρώμα περιλαμβάνει τις διεπαφές ανθρώπου - μηχανής (HMI) και διεπαφές επαυξημένης πραγματικότητας (AR).
5. Επιχειρηματικό στρώμα - Business Layer : Περιλαμβάνει την επιχείρηση, τις επιχειρηματικές αξίες και διαδικασίες, καθώς και τα δίκτυα προστιθέμενης αξίας.

Αναλύοντας περαιτέρω τα επίπεδα, το επιχειρηματικό στρώμα βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο του πλαισίου. Στο μεσαίο επίπεδο ορίζεται ως Επίπεδο Ολοκλήρωσης (Integration Layer), και εμπεριέχει τα στρώματα επικοινωνίας και πληροφοριών. Το τεχνικό επίπεδο βρίσκεται στο χαμηλότερο σημείο του πλαισίου και ορίζει το φυσικό στρώμα.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του RAMI 4.0 είναι η έμφαση που δίνει στη διαλειτουργικότητα και την τυποποίηση. Το μοντέλο περιλαμβάνει ένα σύνολο προτύπων επικοινωνίας, όπως το OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), το οποίο επιτρέπει σε διαφορετικές συσκευές και συστήματα να επικοινωνούν μεταξύ τους ανεξάρτητα από τον κατασκευαστή ή την τεχνολογία τους. Αυτή η τυποποίηση επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και αποδοτικότητα στις διαδικασίες παραγωγής.

Μια επίσης σημαντική πτυχή του RAMI 4.0 είναι το AAS - Administration Shell. Το AAS είναι ένα τυποποιημένο μοντέλο δεδομένων που αναπαριστά τα φυσικά στοιχεία ενός συστήματος του Industry 4.0, όπως μηχανές, αισθητήρες και ενεργοποιητές καθώς και τις λειτουργίες που παρέχουν αυτά τα στοιχεία. Το AAS επιτρέπει την άμεση επικοινωνία και ολοκλήρωση μεταξύ των διαφόρων περιουσιακών στοιχείων σε ένα σύστημα.

Το RAMI 4.0 περιλαμβάνει επίσης ένα μοντέλο κύκλου ζωής που ορίζει τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή συστήματος, από τον σχεδιασμό και την παραγωγή έως τη συντήρηση και τη διάθεση. Αυτό το μοντέλο κύκλου ζωής επιτρέπει στις εταιρείες να βελτιστοποιούν τη χρήση των πόρων, να μειώνουν τα απόβλητα και να βελτιώνουν τη βιωσιμότητα.

Συνολικά, το RAMI 4.0 παρέχει ένα πλαίσιο για την υλοποίηση της Βιομηχανίας 4.0, καθορίζοντας τα επίπεδα, τα στοιχεία και τα πρότυπα που απαιτούνται για την επικοινωνία και την αλληλεπίδραση των κυβερνο-φυσικών συστημάτων μεταξύ τους σε ένα συνδεδεμένο πλαίσιο.

5.2.2 Επισκόπηση αρχιτεκτονικών των ψηφιακών διδύμων.

Στο Industry 4.0 τα ψηφιακά δίδυμα λαμβάνουν κομβική θέση σε διάφορους τομείς και η σχεδιάσή τους όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι συχνά πολύπλοκη. Έτσι λοιπόν, έχει σχεδιαστεί μια γενική αρχιτεκτονική που σε συνεργασία με το RAMI 4.0, παρέχει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για το σχεδιασμό και την υλοποίηση ψηφιακών διδύμων σε διάφορους κλάδους. Η αρχιτεκτονική βασίζεται σε μια πολυεπίπεδη δομή, που περιλαμβάνει την απόκτηση και επεξεργασία δεδομένων, την προσομοίωση και μοντελοποίηση, την οπτικοποίηση και την ανάλυση, καθώς και τον έλεγχο.

Η γενικευμένη αρχιτεκτονική του ψηφιακού διδύμου (GDTA), μπορεί να θεωρηθεί ως μια συγκεκριμένη υλοποίηση του στρώματος πληροφοριών στο RAMI 4.0. Παρέχει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων που μπορούν να ενσωματωθούν και να συνεργαστούν με τα άλλα στρώματα του RAMI 4.0. Αυτό σημαίνει ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των βιομηχανικών διεργασιών σε πραγματικό χρόνο και για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητάς τους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η γενική αρχιτεκτονική του ψηφιακού διδύμου μπορεί να προσαρμοστεί και να εξατομικευτεί για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης και εφαρμογές.

Μια γενικευμένη αρχιτεκτονική ενός DT, προσφέρει μια τυποποιημένη προσέγγιση για τον ψηφιακό μετασχηματισμό σε διάφορες βιομηχανίες, καθιστώντας αρκετά εύκολο τον ορισμό και τον εντοπισμό των αναγκών για το σύστημα του ψηφιακού διδύμου.

Η δημιουργία μιας γενικής τυποποιημένης αρχιτεκτονικής συμβάλλει στη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους που σχετίζονται με την κατασκευή και την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων, καθώς και στην αύξηση της αξιοπιστίας και της επεκτασιμότητάς τους.

Σε ένα γενικό πλαίσιο η εφαρμογή ενός GDTA παρέχει μια κοινή γλώσσα και ένα κοινό πλαίσιο για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ψηφιακών διδύμων, με αποτέλεσμα να βοηθήσουν τις εταιρείες να επιτύχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα, ευελιξία και ανταγωνιστικότητα στην ψηφιακή εποχή.

Έχουν αναπτυχθεί διάφορα είδη αρχιτεκτονικής ψηφιακών διδύμων κατά την πάροδο των χρόνων και κατά την δημιουργία νέων αναγκών στον ψηφιακό μετασχηματισμό. Οι διαφορετικοί τύποι των ψηφιακών διδύμων διαφέρουν ως προς το πεδίο εφαρμογής τους, την πολυπλοκότητα και τον σκοπό λειτουργίας τους. Τα ενεργειακά δίδυμα, βασίζονται ως προς την σχεδίαση τους, κατά ένα μεγάλο μέρος στις αρχιτεκτονικές 5D και 5C που θα αναλυθούν εκτενώς. Παρά όλα αυτά, σημαντική είναι η ολοκληρωμένη

επισκόπηση των διαφορετικών αρχιτεκτονικών των DT, καθώς με την κατανόηση των πιο βασικών τύπων σχεδιασμού, οι εταιρείες μπορούν με σιγουριά να επιλέξουν τον κατάλληλο τύπο ψηφιακού διδύμου για τις συγκεκριμένες ανάγκες τους, ξεκλειδώνοντας έτσι το πλήρες δυναμικό του ψηφιακού μετασχηματισμού.

Κάθε τύπος ψηφιακού διδύμου έχει μοναδικά χαρακτηριστικά, εφαρμογές και οφέλη και απαιτεί διαφορετικό σύνολο δεδομένων εισόδου, τεχνικών μοντελοποίησης και εργαλείων ανάλυσης.

Μερικοί βασικοί τύποι αρχιτεκτονικής των ψηφιακών διδύμων είναι :

1. 2D - Digital Twin : Η αρχιτεκτονική 2D ενός Digital Twin (δισδιάστατο ψηφιακό δίδυμο) είναι μια απλουστευμένη μορφή ψηφιακού διδύμου που συνήθως περιλαμβάνει το φυσικό στρώμα και την ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων. Τα δεδομένα στον συγκεκριμένο τύπο ψηφιακού διδύμου αναπαρίστανται σε μορφή δύο διαστάσεων, όπως γραφήματα και διαγράμματα. Η εφαρμογή του θεωρείται κατάλληλη όταν υπάρχει μικρό οικονομικό περιθώριο, και η εφαρμογή σχετίζεται με συστήματα που παράγουν μικρό όγκο δεδομένων ή ο αριθμός μεταβλητών προς παρακολούθηση είναι μικρός. Δεν συνιστάται η χρήση του σε σύνθετα συστήματα που απαιτούν την χρήση προηγμένων τεχνολογιών ανίχνευσης και μοντελοποίησης.
2. 3D - Digital Twin : Πρόκειται για ένα ψηφιακό δίδυμο που μοντελοποιεί και προσομοιώνει τη φυσική γεωμετρία και συμπεριφορά ενός προϊόντος, ενός εξαρτήματος ή ενός συστήματος. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργικότητας του φυσικού αντικειμένου, την πρόβλεψη και την πρόληψη βλαβών και τη βελτίωση των δραστηριοτήτων συντήρησης και επισκευής. Συνήθως χρησιμοποιείται για τον κύκλο ζωής ενός εξαρτήματος ή προϊόντος και η αρχιτεκτονική του αποτελείται από τρία βασικά στρώματα (φυσικό, ψηφιακό, στρώμα επικοινωνίας). Το 3D ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορους κλάδους, για παράδειγμα, ένα 3D-DT ενός κινητήρα αεροπλάνου μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, να προβλέψει τις ανάγκες συντήρησης και να βελτιστοποιήσει την απόδοσή του.
3. 4D - Digital Twin : Ένα 4D-DT είναι ένα ψηφιακό δίδυμο που προσθέτει τη διάσταση του χρόνου στο 3D μοντέλο, μοντελοποιώντας και προσομοιώνοντας τη συμπεριφορά του φυσικού αντικειμένου με την πάροδο του χρόνου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του φυσικού αντικειμένου, συγκρίνοντάς την με τις αποδόσεις που είχε σε κάποιο άλλο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα, ένα 4D ψηφιακό δίδυμο ενός κατασκευαστικού έργου μπορεί να προσομοιώσει την πρόοδό του με την πάροδο του χρόνου, να προβλέψει την ημερομηνία ολοκλήρωσής του και να βελτιστοποιήσει την κατανομή των πόρων του.

Συνοψίζοντας, οι αρχιτεκτονικές ψηφιακών διδύμων μπορούν να ποικίλουν σε πολυπλοκότητα και έκταση ανάλογα με το σύστημα ή τη διαδικασία που σχεδιάζονται να αναπαραστήσουν.

Εκτός από αυτούς τους τρεις τύπους ψηφιακών διδύμων, υπάρχουν επίσης οι τύποι 5D και 5C DT, όπου αποτελούν το βασικό πεδίο έναρξης σχεδιασμού ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου. Αυτές οι αρχιτεκτονικές αντιπροσωπεύουν μια περαιτέρω εξέλιξη της έννοιας του ψηφιακού διδύμου και περιλαμβάνουν πρόσθετες συνιστώσες στην μοντελοποίηση, στον έλεγχο και στην βελτιστοποίηση του συστήματος που απευθύνονται.

Οι διάφορες αρχιτεκτονικές των ψηφιακών διδύμων μπορούν να ποικίλουν σε πολυπλοκότητα και έκταση ανάλογα με το σύστημα ή τη διαδικασία που σχεδιάζονται να αναπαραστήσουν. Οι τρεις τύποι ψηφιακών διδύμων που παρουσιάστηκαν παραπάνω διαφέρουν ως προς το βαθμό μοντελοποίησης και προσομοίωσης του φυσικού συστήματος.

Ωστόσο, καθώς η έννοια των ψηφιακών διδύμων εξελίχθηκε, εμφανίστηκαν νέοι τύποι ψηφιακών διδύμων, όπως οι 5D-DT και 5C για τα κυβερνοφυσικά συστήματα. Αυτοί οι τύποι ψηφιακών διδύμων έχουν γίνει βασικό σημείο εκκίνησης για το σχεδιασμό ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου, ο οποίος αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία στον τομέα της μηχανικής. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες και τα πεδία εφαρμογής, των τύπων των ψηφιακών διδύμων 5C και 5D.

1. 5D – Digital Twin : Η αρχιτεκτονική 5D ενός ψηφιακού διδύμου, αποτελεί μια προσέγγιση για τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης ψηφιακής αναπαράστασης ενός φυσικού συστήματος. Βασίζεται στην ενσωμάτωση πέντε διαστάσεων: Γεωμετρία, Τοπολογία, Χρόνος, Συμπεριφορά και Αλληλεπίδραση [106]. Κάθε μία από αυτές τις διαστάσεις διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη δημιουργία ενός πλήρους και ακριβούς μοντέλου ψηφιακού διδύμου για πολλαπλές χρήσεις σε διάφορες εφαρμογές, που μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας.
 - a. Γεωμετρική διάσταση : Πρόκειται για το φυσικό σχήμα και τις διαστάσεις του συστήματος που είναι επιθυμητή η μοντελοποίηση του. Περιλαμβάνει την συνολική αρχιτεκτονική του φυσικού συστήματος, όπως την διάταξη, το σχήμα και το μέγεθος των επιμέρους εξαρτημάτων του. Η συγκεκριμένη διάσταση μπορεί να οριστεί και ως το θεμέλιο του ψηφιακού διδύμου, καθώς οι επιδόσεις των επόμενων διαστάσεων βασίζονται στην γεωμετρική διάσταση, προκειμένου να προσομοιώνουν με ακρίβεια την συμπεριφορά του συστήματος. Για την απεικόνιση και την δημιουργία της γεωμετρικής διάστασης, χρησιμοποιούνται τεχνικές εικονικής αναπαράστασης (CAD, 3D Scanning).

- b. Διάσταση Τοπολογίας : Η διάσταση της τοπολογίας είναι υπεύθυνη για την συνδεσιμότητα των στοιχείων που απαρτίζουν το σύστημα. Στην διάσταση αυτή δραστηριοποιούνται ηλεκτρικές, μηχανικές και υδραυλικές συνδέσεις του συστήματος, καθώς και δίκτυα επικοινωνίας. Η τοπολογία του συστήματος παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την συνολική δομή του συστήματος και πως αυτό συμπεριφέρεται. Η αναπαράστασή της γίνεται με την χρήση γραφημάτων που δημιουργούν ένα μοντέλο δικτύου του συστήματος. Η θεωρία γραφημάτων βασίζεται σε ένα μαθηματικό πλαίσιο το οποίο μοντελοποιεί και αναλύει πολύπλοκα δίκτυα. Μπορεί να αναπαραστήσει την τοπολογία ενός φυσικού συστήματος στην μορφή γραφήματος όπου οι κόμβοι αναπαριστούν τα στοιχεία του ή τα εξαρτήματα και οι ακμές αναπαριστούν τις συνδέσεις ή τον τρόπο που αλληλεπιδρά το ένα με το άλλο.
- c. Χρονική διάσταση : Πρόκειται για την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος με την πάροδο του χρόνου. Επιτρέπει στο σύστημα να μεταβάλλει τις παραμέτρους του, ανταποκρίνοντας σε αντιστοιχία με τις διαφορετικές συνθήκες που επικρατούν. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.
- d. Διάσταση συμπεριφοράς : Δηλώνει την επίδοση της απόκρισης του συστήματος σε ερεθίσματα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Περιλαμβάνει, τους τρόπους με τους οποίους το σύστημα αντιδρά σε αλλαγές της θερμοκρασίας, της πίεσης και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων. Η προσομοίωση της απόκρισης του συστήματος σε διάφορα ερεθίσματα είναι σημαντική για την προγνωστική συντήρηση, την πρόβλεψη βλαβών και την ανάλυση της απόδοσης του συστήματος. Η διάσταση αυτή συνήθως προσομοιώνεται σε μοντέλα physical - based. Μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος είναι η CFD - Computational Fluid Dynamics. Η τεχνολογία αυτή μοντελοποιεί την συμπεριφορά ρευστών, αερίων και στερεών με την χρήση μαθηματικών μοντέλων. Ένα παράδειγμα χρήσης είναι η μοντελοποίηση της δυναμικής των ρευστών σε έναν κινητήρα
- e. Διάσταση αλληλεπίδρασης : Η διάσταση της αλληλεπίδρασης αφορά τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και άλλα συστήματα, και χρησιμοποιεί ιδιαίτερα την τεχνολογία του Internet of Things. Η διάσταση αυτή περιλαμβάνει την απόκριση του συστήματος στις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος, καθώς και τις αλληλεπιδράσεις του με άλλα στοιχεία ή συστήματα. Είναι κρίσιμη επειδή επιτρέπει την προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος

σε ένα ευρύτερο πλαίσιο, καθιστώντας δυνατή την πλήρη αξιολόγηση της απόδοσής του, ενώ παράλληλα βοηθά στον εντοπισμό ευκαιριών βελτίωσης.

2. 5C – Cyber - Physical Systems : Η αρχιτεκτονική 5C έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση, την προσομοίωση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση των CPS. Πιο συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική 5C περιλαμβάνει πέντε στοιχεία: Συνδεσιμότητα, μετατροπή, κυβερνοχώρος, γνώση και έλεγχος [107]. Αυτές οι συνιστώσες παρέχουν μια ολιστική προσέγγιση για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση των CPS. Κάθε συστατικό παίζει κρίσιμο ρόλο στην αρχιτεκτονική 5C και είναι αλληλοεξαρτώμενο.
 - a. Συνδεσιμότητα – Connectivity : Η συνδεσιμότητα αποσκοπεί στην διασφάλιση της δημιουργίας και διατήρησης συνδέσεων μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Η συνιστώσα αυτή καθιστά εφικτή την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ φυσικών και ψηφιακών συστημάτων. Περιλαμβάνει αισθητήρες, ενεργοποιητές και άλλες συσκευές που συλλέγουν δεδομένα από τον φυσικό κόσμο και τα μεταφέρουν στο ψηφιακό δίδυμο. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το φυσικό σύστημα χρησιμοποιούνται μετέπειτα για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος.
 - b. Μετατροπή – Conversion : Η μετατροπή περιλαμβάνει την επεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων σε πληροφορίες που μπορεί να διαχειριστεί ο ελεγκτής του ψηφιακού συστήματος προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση και λήψη αποφάσεων. Αυτό το στοιχείο περιλαμβάνει την προεπεξεργασία δεδομένων, τον καθαρισμό δεδομένων και τον μετασχηματισμό δεδομένων. Τα μετατρεπόμενα δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για μοντελοποίηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση.
 - c. Κυβερνοχώρος – Cyber : Το επίπεδο του κυβερνοχώρου είναι υπεύθυνο για τη διασφάλιση της ασφάλειας και του απορρήτου των δεδομένων που συλλέγονται από τον φυσικό κόσμο. Περιλαμβάνει μηχανισμούς για την εξασφάλιση της μετάδοσης και της αποθήκευσης δεδομένων. Η συνιστώσα του κυβερνοχώρου παρέχει επίσης προστασία από επιθέσεις λογισμικού και δικτύου.
 - d. Γνώση – Cognition : Περιλαμβάνει κυρίως την οπτικοποίηση των δεδομένων που λαμβάνει το σύστημα από τους αισθητήρες και παρέχει στατιστικά στοιχεία για τους χρήστες προκειμένου να λάβουν μια απόφαση. Ακόμη, το στρώμα αυτό περιλαμβάνει την χρήση της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης, με στόχο την

εκμάθηση του συστήματος από τα δεδομένα που λαμβάνει για την πρόταση βελτιωμένων αποφάσεων (Decision Support System - DSS).

- e. Έλεγχος – Control : Η διαδικασία του ελέγχου είναι υπεύθυνη για τη διασφάλιση της επιθυμητής συμπεριφοράς του κυβερνοφυσικού συστήματος. Εμπεριέχει μηχανισμούς ελέγχου ανατροφοδότησης που επιτρέπουν στο ψηφιακό δίδυμο να προσαρμόζει τη συμπεριφορά του με βάση την ανατροφοδότηση που λαμβάνει από τον φυσικό κόσμο [108]. Η συνιστώσα ελέγχου περιλαμβάνει επίσης αλγορίθμους βελτιστοποίησης που επιτρέπουν στον ψηφιακό δίδυμο να βελτιστοποιεί τη συμπεριφορά του με βάση τους προκαθορισμένους στόχους που έχει ορίσει ο χρήστης.

Αυτά τα πρόσθετα και προηγμένα στοιχεία στη μοντελοποίηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση σε διάφορα συστήματα, που φέρουν οι αρχιτεκτονικές 5D και 5C έχουν ανοίξει νέους δρόμους για την ενεργειακή απόδοση, τη βελτιστοποίηση του κόστους και τη βιωσιμότητα. Ως εκ τούτου, έχουν γίνει ένα βασικό εργαλείο για την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων και των διεργασιών τους.

5.3 Παρουσίαση μοντέλου ενεργειακού ψηφιακού διδύμου.

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν τα διάφορα στρώματα που δημιουργούν μια αρχιτεκτονική ενός ψηφιακού διδύμου για μια γενική εφαρμογή η οποία θα μπορούσε να εκτελεστεί σε ένα πλήθος τομέων που αξιοποιούν κάποιο φυσικό σύστημα και επιθυμούν να το βελτιστοποιήσουν ως προς τα χαρακτηριστικά του. Με την κατανόηση της λειτουργίας των κάθε στρωμάτων και τον τρόπο αλληλεπίδρασης που έχουν μεταξύ τους, μπορεί να σχεδιαστεί ένα ψηφιακό δίδυμο το οποίο θα εστιάζει σε μια λειτουργία ενός συστήματος, προκειμένου να γίνει η επίτευξη ενός επιθυμητού στόχου που έχει οριστεί από την επιχείρηση. Η διαχείριση και η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας ενός συστήματος, είναι εφαρμογές κρίσιμης σημασίας για τις βιομηχανίες, και τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αποτελέσουν μια αποτελεσματική λύση για την εκτέλεση αυτών των εφαρμογών. Το ενεργειακό ψηφιακό δίδυμο (EDT) που θα σχεδιαστεί στην συνέχεια αφορά κυρίως συστήματα βιομηχανικών εγκαταστάσεων και θα παρέχει πληρότητα προς όλες τις παραπάνω εφαρμογές που ειπώθηκαν. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται σε ένα μεγάλο μέρος με αυτή του 5D και του 5C. Η δομή του βασίζεται στις αρχές σχεδίασης της αρχιτεκτονικής RAMI 4.0 που αφορά κυρίως τεχνολογίες του Industry 4.0 [109].

Παρακάτω παρατίθενται τα στρώματα που δημιουργούν το βασικό μοντέλο του ενεργειακού ψηφιακού διδύμου, όπου σε κάθε στρώμα ορίζεται ο τρόπος λειτουργίας του και οι βασικές διεργασίες που πραγματοποιούνται μέσω διαφόρων τεχνολογιών.

5.3.1 Στρώμα περιουσιακών στοιχείων - Asset Layer.

Το στρώμα περιουσιακών στοιχείων περιλαμβάνει όλες τις φυσικές οντότητες που απασχολεί η επιχείρηση για την εκτέλεση μια φυσικής διεργασίας, όπως συστήματα ελέγχου, γραμμές παραγωγής, μηχανήματα και εξαρτήματα. Ακόμη, στο επίπεδο αυτό ενσωματώνεται και το ιστορικό συντήρησης και επισκευής των φυσικών συστημάτων. Τα δεδομένα του συγκεκριμένου επιπέδου διακρίνονται σε :

- Δεδομένα συντήρησης : Πρόκειται για δεδομένα που φέρουν πληροφορίες σχετικά με το ιστορικό επισκευής ή συντήρησης των περιουσιακών στοιχείων της επιχείρησης. Παρουσιάζουν την τελευταία φορά που ένα βιομηχανικό σύστημα επισκευάστηκε, ποιός τύπος συντήρησης εκτελέστηκε και σε ποιό μέρος του συστήματος.
- Πληροφορίες περιουσιακών στοιχείων : Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τις προδιαγραφές των συστημάτων που δραστηριοποιούνται στην επιχείρηση, όπως μάρκα, μοντέλο, σειριακό αριθμό και κατάσταση λειτουργίας.

Το συγκεκριμένο στρώμα δίνει την δυνατότητα στο ψηφιακό δίδυμο με την χρήση των παραπάνω δεδομένων, να βελτιστοποιήσει την χρήση της ενέργειας και να προβλέψει τις ανάγκες για συντήρηση. Παρατηρώντας την λειτουργία των μηχανημάτων, σε περίπτωση εντοπισμού ενός μηχανήματος με αυξημένη κατανάλωση από ότι το συνηθισμένο, μπορεί να υποδείξει τον σειριακό αριθμό του μηχανήματος και να ελέγξει τα δεδομένα συντήρησης για να εξακριβώσει εάν το σύστημα πρέπει να συντηρηθεί. Σε περίπτωση που το σύστημα χρειάζεται επισκευή το ψηφιακό δίδυμο προγραμματίζει την συντήρηση εκ των προτέρων, αποφεύγοντας έτσι την σπατάλη ενέργειας, και παρατείνοντας παράλληλα τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

5.3.2 Στρώμα ενσωμάτωσης - Integration Layer.

Το στρώμα αυτό περιλαμβάνει τα δεδομένα τα οποία δηλώνουν τον τρόπο με τον οποίο το ψηφιακό δίδυμο ενσωματώνεται με συστήματα, όπως οι προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC) και συστήματα συλλογής δεδομένων (SCADA). Το συγκεκριμένο επίπεδο είναι υπεύθυνο για την εξασφάλιση της ανταλλαγής δεδομένων,

και για τον συντονισμό μεταξύ του ψηφιακού διδύμου και των συστημάτων παραγωγής.

Για την λειτουργία του στρώματος απαιτείται ένα μεσαίο λογισμικό ή αλλιώς Middleware, το οποίο θα γεφυρώνει τις λειτουργίες του ψηφιακού διδύμου με τις λειτουργίες του συστήματος ή των συσκευών. Περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα πρωτόκολλα για την ανταλλαγή δεδομένων καθώς και τις διεπαφές επικοινωνίας.

Τα δεδομένα που διαχειρίζεται το στρώμα ενσωμάτωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δεδομένα χρόνου εκτέλεσης (Run - time Data) και σε δεδομένα μηχανικής (Engineering Data).

Τα δεδομένα χρόνου εκτέλεσης παράγονται από αισθητήρες και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση των συστημάτων που περιέχει το στρώμα περιουσιακών στοιχείων. Συνήθως, τα δεδομένα χρόνου εκτέλεσης είναι δεδομένα χρονοσειρών που είναι πολύ δυναμικά, απαιτώντας εξειδικευμένη υποδομή για τη διαχείριση ειδικών αναγκών εφαρμογών, όπως η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο ή η ανάλυση μεγάλων δεδομένων.

Αντίθετα, τα Δεδομένα Μηχανικής είναι συνήθως στατικά, πράγμα που σημαίνει ότι δεν αλλάζουν συχνά με την πάροδο του χρόνου. Παραδείγματα αυτών των δεδομένων περιλαμβάνουν την τοπολογία εγκαταστάσεων ή πληροφορίες σχετικά με συγκεκριμένα εξαρτήματα εντός μιας εγκατάστασης. Αυτός ο τύπος πληροφοριών παρουσιάζεται συχνά σε αναλογική μορφή, όπως σχέδια σωληνώσεων, και πρέπει να ψηφιοποιηθεί. Ακόμη και αν οι πληροφορίες βρίσκονται ήδη σε μορφή αναγνώσιμη από μηχανήματα, πρέπει να μετασχηματιστούν και να ενσωματωθούν στο ψηφιακό δίδυμο ως πληροφορίες πλαισίου.

Το στρώμα ενσωμάτωσης είναι απαραίτητο, καθώς διασυνδέει το ψηφιακό δίδυμο με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας μέσω ενός ενδιάμεσου λογισμικού που είναι σχεδιασμένο να ελέγχει και να παρουσιάζει στοιχεία κατανάλωσης ενέργειας ενός συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο το ψηφιακό δίδυμο λαμβάνει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία του συστήματος ως προς την ενέργεια που καταναλώνει, με τον σκοπό μεταγενέστερα σε άλλο στρώμα να πραγματοποιηθεί έλεγχος πάνω στα Real Time δεδομένα και να γίνουν οι αντίστοιχες συγκρίσεις, προκειμένου να διεκπεραιωθεί εάν το σύστημα έχει χώρο προς βελτιστοποίηση.

5.3.3 Στρώμα επικοινωνίας - Communication Layer.

Το στρώμα επικοινωνίας περιλαμβάνει τα βιομηχανικά πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται από το ψηφιακό δίδυμο για την ανταλλαγή δεδομένων με τα διάφορα συστήματα της εγκατάστασης.

Το επίπεδο επικοινωνίας ενός ψηφιακού δίδυμου μπορεί να ενσωματώσει διάφορα πρωτόκολλα βιομηχανικής επικοινωνίας ή βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων (IIoT) ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.

Το στρώμα επικοινωνίας επιτρέπει την απόκτηση δεδομένων από το φυσικό σύστημα. Αυτό περιλαμβάνει τόσο την ανταλλαγή δεδομένων πραγματικού χρόνου από αισθητήρες όσο και ιστορικά δεδομένα που μπορεί να είναι αποθηκευμένα σε βάσεις δεδομένων. Το στρώμα επικοινωνίας πρέπει να μπορεί να χειρίζεται μια μεγάλη ποικιλία μορφών και πρωτοκόλλων δεδομένων, ώστε να διασφαλίζεται ότι όλα τα σχετικά δεδομένα μπορούν να συλλεχθούν και να μεταδοθούν στο ψηφιακό δίδυμο.

Στη συνέχεια, το στρώμα επικοινωνίας πρέπει να υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του φυσικού συστήματος και του ψηφιακού δίδυμου. Αυτό επιτρέπει στον ψηφιακό δίδυμο όχι μόνο να λαμβάνει δεδομένα από το φυσικό σύστημα αλλά και να ανατροφοδοτεί πληροφορίες πίσω στο φυσικό σύστημα. Για παράδειγμα, εάν το ψηφιακό δίδυμο εντοπίσει ένα πιθανό πρόβλημα στο φυσικό σύστημα, μπορεί να στείλει μια εντολή για τη ρύθμιση ορισμένων παραμέτρων για την αποφυγή περαιτέρω ζημιών.

Το επίπεδο επικοινωνίας διαδραματίζει επίσης σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των δεδομένων που κυκλοφορούν στο επικοινωνιακό δίκτυο του συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει την εφαρμογή πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και ελέγχων πρόσβασης για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή χειραγώγησης των δεδομένων.

Ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που μπορεί να διαχειριστεί την μεταφορά ενεργειακών δεδομένων από και προς βιομηχανικά συστήματα είναι το πρωτόκολλο Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων που έχει σχεδιαστεί για να είναι αποδοτικό και με χαμηλό κόστος, καθιστώντας το κατάλληλο για βιομηχανικές εφαρμογές. Επιτρέπει την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ συσκευών και συστημάτων και υποστηρίζει τόσο τα μοντέλα ανταλλαγής μηνυμάτων publish-subscribe όσο και request-response. Το MQTT είναι επίσης συμβατό με μια ποικιλία διαφορετικών γλωσσών προγραμματισμού και λειτουργικών συστημάτων, καθιστώντας το μια ευέλικτη επιλογή για βιομηχανικά συστήματα.

5.3.4 Στρώμα πληροφοριών - Information Layer.

Το επίπεδο πληροφοριών είναι ένα σημαντικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής του ψηφιακού δίδυμου, το οποίο ασχολείται με την οργάνωση, τη διαχείριση και την αποθήκευση δεδομένων. Το στρώμα αυτό περιλαμβάνει υποεπίπεδα που διαχειρίζονται τα δεδομένα που απαιτούνται για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος, καθώς και τα δεδομένα που παράγονται από το ίδιο κατά τη λειτουργία του.

Το στρώμα πληροφοριών περιλαμβάνει συνήθως διάφορα επιμέρους στρώματα, όπως η απόκτηση, η αποθήκευση, η επεξεργασία και η ανάλυση δεδομένων.

Το υποεπίπεδο απόκτησης δεδομένων είναι υπεύθυνο για τη συλλογή δεδομένων από διάφορες πηγές, συμπεριλαμβανομένων αισθητήρων, ενεργοποιητών και άλλων συσκευών που είναι συνδεδεμένες με το φυσικό σύστημα. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο ή σε τακτά χρονικά διαστήματα και μπορούν να περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με διάφορες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής και η κατανάλωση ενέργειας.

Το υποεπίπεδο αποθήκευσης δεδομένων αναλαμβάνει την οργάνωση και την αποθήκευση των δεδομένων που συλλέγονται με δομημένο τρόπο, ώστε να είναι εύκολη η πρόσβαση σε αυτά και η ανάλυσή τους από το ψηφιακό δίδυμο. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είναι οι βάσεις και οι αποθήκες δεδομένων.

Το υποεπίπεδο επεξεργασίας δεδομένων εκτελεί την επεξεργασία και τον μετασχηματισμό των συλλεχθέντων δεδομένων σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τον ψηφιακό δίδυμο. Αυτό το υποεπίπεδο μπορεί να περιλαμβάνει εργασίες όπως ο καθαρισμός δεδομένων, η κανονικοποίηση δεδομένων και η συγκέντρωση δεδομένων.

Το υποεπίπεδο ανάλυσης δεδομένων περιλαμβάνει λειτουργίες ανάλυσης των επεξεργασμένων δεδομένων για τον εντοπισμό μοτίβων, τάσεων και ανωμαλιών στη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος. Σε αυτό το επίπεδο χρησιμοποιούνται αναλυτικές τεχνικές, όπως η στατιστική ανάλυση, η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη.

Βασικό στοιχείο στο στρώμα πληροφοριών είναι η υπηρεσία έξυπνων δεδομένων, η οποία παρέχει πληροφορίες σχετικά με τους πόρους του συστήματος χρησιμοποιώντας την βάση κοινής γνώσης. Τα υποεπίπεδα απόκτησης και αποθήκευσης δεδομένων συχνά αναφέρονται σε συνδυασμό ως Βάσεις κοινής γνώσης ή αλλιώς Shared Knowledge base. Η βάση κοινής γνώσης περιλαμβάνει δεδομένα μηχανικής και χρόνου εκτέλεσης στα οποία παρέχει πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα προκειμένου να γίνουν μετέπειτα στο υποεπίπεδο ανάλυσης οι κατάλληλες συγκρίσεις των δεδομένων για την λήψη κάποιου συμπεράσματος. Μια υπηρεσία αναζήτησης πληροφοριών παρέχει πρόσβαση στις πληροφορίες στο εσωτερικό της κοινής γνώσης, ενώ μια υπηρεσία εισαγωγής πληροφοριών χρησιμοποιείται για την προσθήκη ή την τροποποίηση πληροφοριών από τα ανώτερα στρώματα της αρχιτεκτονικής του ψηφιακού δίδυμου.

5.3.5 Στρώμα λειτουργικότητας - Functional Layer.

Στο λειτουργικό επίπεδο υλοποιείται η πραγματική χρήση του ψηφιακού δίδυμου. Αυτό σημαίνει ότι το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιεί τις πληροφορίες και τα δεδομένα

από τα προηγούμενα στρώματα για να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες και να προσφέρει τις υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας στους τελικούς χρήστες. Οι υπηρεσίες που μπορεί να παρέχει το ενεργειακό ψηφιακό δίδυμο κυμαίνονται από μια απλή παρακολούθηση και έλεγχο της ενέργειας μέχρι και τον προγνωστική συντήρηση και βελτιστοποίηση, είτε αυτό απευθύνεται άμεσα προς τα μηχανήματα είτε προς τους χρήστες για την λήψη μιας απόφασης ως προς την διαχείριση του συστήματος. Το λειτουργικό επίπεδο αποτελείται συνήθως από ένα σύνολο στοιχείων λογισμικού που συνεργάζονται για την υλοποίηση της απαιτούμενης λειτουργικότητας. Τα βασικά στοιχεία που ολοκληρώνουν την συνολική λειτουργία του EDT είναι οι υπηρεσίες : προσομοίωσης, παρακολούθησης, διάγνωσης, πρόβλεψης, ελέγχου και αναδιαμόρφωσης. Τα συστατικά αυτά μπορούν να υλοποιηθούν με τη χρήση διαφορετικών γλωσσών

προγραμματισμού και άλλων τεχνολογιών, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις και την πολυπλοκότητα της εφαρμογής του συστήματος που μοντελοποιείται. Παρακάτω, αναλύονται οι διάφορες υπηρεσίες που απαρτίζουν το πλαίσιο του στρώματος λειτουργικότητας του ψηφιακού διδύμου που είναι προσανατολισμένο στον τομέα της ενέργειας.

1. Υπηρεσία προσομοίωσης : Οι προσομοίωση του συστήματος αποτελεί μια βασική υπηρεσία του λειτουργικού επιπέδου του 5D ψηφιακού διδύμου, και καλύπτει την διαδικασία μοντελοποίησης του συστήματος σε μια εικονική οντότητα, η οποία προσομοιώνει την συμπεριφορά του φυσικού συστήματος. Τα μοντέλα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των ενεργειακών συστημάτων υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, καθώς και για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης με βάση τρέχοντα και ιστορικά δεδομένα. Η βάση κοινής γνώσης που βρίσκεται στο στρώμα πληροφοριών περιέχει όλες τις πληροφορίες πλαισίου των μοντέλων προσομοίωσης. Η υπηρεσία προσομοίωσης, σε συνδυασμό με τη βάση κοινής γνώσης, δημιουργεί μια συγκεκριμένη προβολή της εικονικής οντότητας, δίνοντας της την δυνατότητα να εξελίσσεται στην πάροδο του χρόνου με βάση τις πραγματικές αλλαγές που υφίστανται το σύστημα. Η υπηρεσία της προσομοίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως οι μπαταρίες, για τη βελτιστοποίηση της απόδοσής τους και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους υπό διαφορετικές συνθήκες φορτίου. Ένα ακόμη παράδειγμα είναι η μοντελοποίηση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας μια βιομηχανικής εγκατάστασης, με στόχο την πρόβλεψη του τρόπου ροής της ενέργειας. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης της απόδοσης του δικτύου προκειμένου να διασφαλίζεται η σταθερότητα και η αξιοπιστία.
2. Υπηρεσία παρακολούθησης : Οι υπηρεσίες παρακολούθησης είναι στοιχειώδεις υπηρεσίες που συλλέγουν δεδομένα από τη φυσική οντότητα μέσω αισθητήρων και άλλων πηγών με στόχο να παρατηρούν την τρέχουσα κατάστασή της. Στον τομέα της ενέργειας, οι υπηρεσίες παρακολούθησης

μπορούν να διαδραματίσουν κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της βέλτιστης λειτουργίας και στον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων στο σύστημα. Η παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης ενός κτιρίου, μιας εγκατάστασης ή μιας διαδικασίας μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό ανεπαρκειών και πιθανών περιοχών για βελτίωση. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας και τη μείωση του κόστους.

3. Υπηρεσία διάγνωσης : Οι διαγνωστικές υπηρεσίες υποστηρίζουν την παρακολούθηση της κατάστασης ή την ανάλυση της αιτίας των βλαβών μέσω διαφόρων τεχνικών ανάλυσης δεδομένων. Χρησιμοποιούν τις υποκείμενες υπηρεσίες παρακολούθησης σε συνδυασμό με τις υπηρεσίες προσομοίωσης για να αποκτήσουν μεγαλύτερη εικόνα της τρέχουσας κατάστασης της φυσικής οντότητας. Για παράδειγμα, στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, οι διαγνωστικές υπηρεσίες αναλύουν δεδομένα όπως η τάση, το ρεύμα και η ροή ισχύος προκειμένου να εντοπίσουν μη φυσιολογικές συμπεριφορές στο δίκτυο, όπως υπερφόρτωση ή πτώση τάσης. Εντοπίζοντας την αιτία του προβλήματος, οι διαγνωστικές υπηρεσίες μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη διορθωτικών ενεργειών για την αποφυγή πιθανών διακοπών ή ζημιών στον εξοπλισμό.
4. Υπηρεσία πρόβλεψης : Για την λειτουργία της υπηρεσίας αυτή χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και λειτουργίες τεχνητής νοημοσύνης, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στο ψηφιακό δίδυμο να προβλέψει μελλοντικές συμπεριφορές του φυσικού συστήματος ενώ παράλληλα το καθιστά ικανό για την λήψη αποφάσεων σχετικά με ένα ζήτημα. Στο πλαίσιο ενός ενεργειακού ψηφιακού δίδυμου, οι υπηρεσίες πρόβλεψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποικίλες εφαρμογές, όπως η πρόβλεψη της κατανάλωσης και παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές καθώς και για την προγνωστική συντήρηση. Όσο πιο πολύπλοκο είναι το σύστημα τόσο περισσότερους παραμέτρους έχει για την διαχείρισή του, που σημαίνει μεγαλύτερος όγκος αποθήκευσης δεδομένων. Έτσι απαιτείται ένα ισχυρό πλαίσιο ολοκλήρωσης δεδομένων και ένα σύστημα διαχείρισης δεδομένων, το οποίο μπορεί να διαχειριστεί μεγάλους όγκους δεδομένων από διάφορες πηγές και να διασφαλίσει την ακεραιότητα των δεδομένων, προκειμένου να μπορούν να πραγματοποιηθούν ορθές προβλέψεις.
5. Υπηρεσία ελέγχου : Η υπηρεσία ελέγχου μπορεί να παρέχεται μέσω της διεπαφής ανθρώπου-μηχανής ή μέσω άμεσης πρόσβασης στον έλεγχο του φυσικού συστήματος. Όταν υπάρχει άμεσος έλεγχος, μπορεί να γίνει αλλαγή της κατάστασης του συστήματος σε ένα πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και με υψηλή απόκριση. Η υπηρεσία ελέγχου συνδυάζει πληροφορίες από τις υπηρεσίες διάγνωσης και πρόβλεψης για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων της λειτουργίας του συστήματος. Περαιτέρω, αποτελεί ένα είδος υπηρεσίας το οποίο ενδέχεται να αλλάζει τις παραμέτρους του κατά την πάροδο του χρόνου,

λόγω αναδιαμόρφωσης των συστημάτων ή με την δημιουργία νέων επιχειρησιακών στόχων. Παράδειγμα χρήσης της υπηρεσίας, είναι η προσαρμογή της ροής και της διανομής ισχύος σε ένα σύστημα που εκτελεί μια διεργασία, με βάση την προβλεπόμενη ζήτηση ενέργειας.

6. Υπηρεσία αναδιαμόρφωσης : Οι υπηρεσίες αναδιαμόρφωσης τροποποιούν τη συμπεριφορά του φυσικού συστήματος αλλάζοντας τις παραμέτρους του και είναι υπεύθυνες για τη διαχείριση των στατικών αλλαγών στις θεμελιώδεις ιδιότητες της φυσικής οντότητας που μοντελοποιείται. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει αλλαγές στην υποδομή ή τα στοιχεία του ενεργειακού συστήματος, όπως η προσθήκη ή η αφαίρεση μιας γεννήτριας ή μιας μονάδας αποθήκευσης. Η υπηρεσία αναδιαμόρφωσης διασφαλίζει επίσης ότι οι αλλαγές που πραγματοποιούνται στο φυσικό σύστημα αντικατοπτρίζονται στην κοινή βάση γνώσης. Τα συμβάντα αναδιαμόρφωσης μπορούν να προκληθούν από αλλαγές στην επιχειρησιακή λογική, όπως η ανάγκη προσαρμογής σε νέους κανονισμούς ή επιχειρηματικούς στόχους.

5.3.6 Επιχειρηματικό στρώμα - Business Layer.

Το επιχειρησιακό επίπεδο σε μια αρχιτεκτονική ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου αναφέρεται στο επίπεδο που είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό και την υλοποίηση της επιχειρησιακής λογικής του συστήματος, καθώς επίσης καθορίζει τους σκοπούς και τους στόχους του ψηφιακού διδύμου. Στο πλαίσιο ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου, το επιχειρηματικό επίπεδο μπορεί να περιλαμβάνει λειτουργίες όπως η διαχείριση ενέργειας και η λήψη αποφάσεων. Για παράδειγμα, το επιχειρηματικό στρώμα μπορεί να καθορίσει τους στόχους και τους σκοπούς του ψηφιακού διδύμου, όπως η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας ή η βελτίωση της αποδοτικότητας, και να καθορίσει τις στρατηγικές για την επίτευξη αυτών των στόχων. Περαιτέρω, μπορεί να περιλαμβάνει διαδικασίες λήψης αποφάσεων, όπως ο καθορισμός του πότε πρέπει να γίνει συντήρηση του εξοπλισμού, με βάση τα δεδομένα από τις υπηρεσίες παρακολούθησης και διάγνωσης. Ένα άλλο παράδειγμα του επιχειρηματικού επιπέδου που αφορά το εξωτερικό περιβάλλον είναι η αλληλεπίδρασή του με την αγορά ενέργειας. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιήσει υπηρεσίες πρόβλεψης για να προσδιορίσει τις μελλοντικές τιμές και να χρησιμοποιήσει αυτές τις πληροφορίες για να βελτιστοποιήσει τις στρατηγικές που αφορούν το εμπόριο ενέργειας. Το επιχειρηματικό επίπεδο θα ορίζει τους κανόνες και τις πολιτικές για αυτές τις δραστηριότητες, καθώς και τον τρόπο με τον οποίο το DT αλληλεπιδρά με τους ενδιαφερόμενους φορείς της αγοράς ενέργειας, όπως η πρόβλεψη μείωσης ή αύξησης της τιμής και της ζητούμενης ποσότητας καυσίμων.

5.4 Μελλοντικές επεκτάσεις και προκλήσεις χρήσης του μοντέλου.

Με το βλέμμα στο μέλλον, το ενεργειακό ψηφιακό δίδυμο έχει μεγάλες δυνατότητες χρήσης σε αναδυόμενες βιομηχανίες όπως οι έξυπνες πόλεις, η εξερεύνηση του διαστήματος και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Η αρχιτεκτονική του παραπάνω μοντέλου τονίζει την βασική δομή που θα πρέπει να έχει ένα ενεργειακό ψηφιακό δίδυμο, προκειμένου να εκτελέσει λειτουργίες ελέγχου και βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης σε βιομηχανικά συστήματα. Χρησιμοποιώντας την βασική δομή ως μια κατευθυντήρια γραμμή, μπορεί να γίνει ανάπτυξη του ψηφιακού διδύμου και να παραμετροποιηθεί προς μια συγκεκριμένη εφαρμογή και χρήση.

Στην βιομηχανία κατασκευής, η χρήση ενέργειας μπορεί να αντιπροσωπεύει σημαντικό μέρος του συνολικού λειτουργικού κόστους. Χρησιμοποιώντας το ψηφιακό δίδυμο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της χρήσης ενέργειας στις γραμμές παραγωγής, οι επιχειρήσεις μπορούν να εντοπίσουν περιοχές για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας.

Το μοντέλο απευθύνεται ακόμη και στον κλάδο των μεταφορών, όπου μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής χρήσης των οχημάτων. Χρησιμοποιώντας το ψηφιακό δίδυμο για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας στα οχήματα, οι επιχειρήσεις μπορούν να εντοπίσουν περιοχές για βελτίωση της αποδοτικότητας των καυσίμων και να μειώσουν το κόστος των καυσίμων τους.

Η βιομηχανία της ενέργειας μπορεί επίσης να επωφεληθεί σημαντικά από την ενσωμάτωση του μοντέλου σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας και σε άλλα συστήματα που είναι ενεργοβόρα ως προς την λειτουργία τους.

Σε όλα τα παραπάνω παραδείγματα, οι επιχειρήσεις πρέπει να πραγματοποιήσουν μελέτη του περιβάλλοντος που θα δραστηριοποιείται το ψηφιακό δίδυμο, όπως την δομή και τις τεχνολογίες του συστήματος προς μοντελοποίηση, την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού για την διαχείριση των ενεργοποιητών και των αισθητήρων, την ορθή επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας και την χρήση ιδανικών λογισμικών που θα βοηθήσουν στην επικοινωνία της εταιρείας με το ψηφιακό δίδυμο.

Παρά το γεγονός της ευχρηστίας και των πολυάριθμων οφελών του ψηφιακού διδύμου, μπορεί η χρήση και η ενσωμάτωσή του να μην είναι εύκολη σε πολλές περιστάσεις, δημιουργώντας έτσι προκλήσεις που καλούνται οι επιχειρήσεις να ξεπεράσουν. Οι προκλήσεις που μπορεί μια επιχείρηση να συναντήσει κατά την διαδικασία ενσωμάτωσης ενός ψηφιακού διδύμου στα συστήματά της σχετίζονται με το κόστος,

την διαχείριση των δεδομένων, την δυνατότητα επεκτασιμότητας, την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και το επίπεδο τεχνογνωσίας που μπορεί να απαιτείται.

Η υλοποίηση ενός ψηφιακού δίδυμου απαιτεί μια σειρά δεξιοτήτων, συμπεριλαμβανομένης της επιστήμης των δεδομένων, της μηχανικής μάθησης και πολλών άλλων. Οι επιχειρήσεις πρέπει να έχουν πρόσβαση σε προσωπικό με αυτές τις δεξιότητες και να επενδύουν σε προγράμματα κατάρτισης και ανάπτυξης για να αναβαθμίσουν το υφιστάμενο εργατικό δυναμικό τους εξοπλίζοντάς το με τις κατάλληλες γνώσεις για τη διαχείριση και τη συντήρηση του ψηφιακού δίδυμου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το ψηφιακό δίδυμο απαιτεί την ενσωμάτωση δεδομένων από διάφορες πηγές. Η ενσωμάτωση και η διαχείριση αυτών των δεδομένων μπορεί να αποτελέσει πρόκληση, καθώς απαιτεί τεχνογνωσία στην αρχιτεκτονική και την ασφάλεια δεδομένων. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα είναι ακριβή, έγκαιρα και συναφή με τους επιχειρηματικούς στόχους. Κρίσιμης σημασίας είναι επίσης η αποθήκευση των δεδομένων με ασφάλεια και ότι η πρόσβαση σε αυτά γίνεται μόνο από εξουσιοδοτημένο προσωπικό.

Τέλος, η υλοποίηση ενός ενεργειακού ψηφιακού δίδυμου μπορεί να είναι δαπανηρή, απαιτώντας σημαντικές επενδύσεις σε υλικό, λογισμικό και προσωπικό. Επιπλέον, ενδέχεται να υπάρχουν συνεχιζόμενες δαπάνες που σχετίζονται με τη συντήρηση, τις αναβαθμίσεις και την εκπαίδευση. Οι επιχειρήσεις πρέπει να αξιολογήσουν προσεκτικά το κόστος και τα οφέλη της εφαρμογής του ψηφιακού δίδυμου και να διασφαλίσουν ότι ευθυγραμμίζεται με τους στρατηγικούς τους στόχους.

5.5 Επιχειρηματική αξία ενεργειακού ψηφιακού διδύμου.

Ένα από τα βασικά οφέλη του ενεργειακού ψηφιακού δίδυμου είναι η ικανότητά του να εντοπίζει περιοχές για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και να μειώνει το ενεργειακό κόστος. Χρησιμοποιώντας τις υπηρεσίες του για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της χρήσης ενέργειας, οι επιχειρήσεις μπορούν να εντοπίζουν περιοχές όπου υπάρχει σπατάλη ενέργειας και να λαμβάνουν άμεσα τα κατάλληλα μέτρα αντιμετώπισης του προβλήματος. Βελτιστοποιώντας τη χρήση ενέργειας, οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν το ενεργειακό τους κόστος και να αυξήσουν την κερδοφορία τους.

Ένα άλλο επιχειρηματικό πλεονέκτημα του ενεργειακού ψηφιακού διδύμου είναι η ικανότητά του να αυξάνει την παραγωγικότητα. Χρησιμοποιώντας τις διάφορες τεχνολογίες του ψηφιακού διδύμου οι επιχειρήσεις μπορούν να εξακριβώσουν ποιές διαδικασίες παραγωγής μπορούν να εξορθολογιστούν ή να αυτοματοποιηθούν και να λάβουν μέτρα για τη βελτίωση της αποδοτικότητάς τους. Με την συνεχή εξέλιξη και βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, οι επιχειρήσεις μπορούν να αυξήσουν την παραγωγικότητα και την παραγωγή τους και να βελτιώσουν την ανταγωνιστικότητά τους στην αγορά.

Ακόμη ένας σημαντικός τομέας των βιομηχανικών επιχειρήσεων είναι η ασφάλεια των λειτουργιών και των συστημάτων τους. Με την συνεχή παρακολούθηση των συστημάτων μέσω της υπηρεσίας του ψηφιακού διδύμου, υπάρχει εύκολος εντοπισμός για πιθανούς κινδύνους όπως δυσλειτουργίες του εξοπλισμού ή υπερτάσεις ρεύματος. Βελτιώνοντας την ασφάλεια, οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο ατυχημάτων και τραυματισμών και να προστατεύσουν τους εργαζομένους καθώς και τα συστήματά τους.

Τέλος, το ενεργειακό ψηφιακό δίδυμο μπορεί να προσφέρει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στις επιχειρήσεις που υιοθετούν αυτή την τεχνολογία. Βελτιστοποιώντας τη χρήση ενέργειας, αυξάνοντας την παραγωγικότητα, βελτιώνοντας την ασφάλεια και ενισχύοντας τη βιωσιμότητα, οι επιχειρήσεις μπορούν να διαφοροποιηθούν από τους ανταγωνιστές τους και να δημιουργήσουν αξία για τους πελάτες τους. Επιπλέον, με την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών όπως το ενεργειακό ψηφιακό δίδυμο, οι επιχειρήσεις μπορούν να τοποθετηθούν ως ηγέτες στον κλάδο τους και να προσελκύσουν σημαντικές επενδύσεις.

Τελικά Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνήθηκε ο τρόπος λειτουργίας και η χρήση των ψηφιακών διδύμων σε βιομηχανικά συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας και μέσω της εξέτασης του Industry 4.0, των κυβερνο-φυσικών συστημάτων, της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, της διαχείρισης ενέργειας στις βιομηχανίες και της δημιουργίας μιας γενικής αρχιτεκτονικής ενός ενεργειακού ψηφιακού διδύμου, εντοπίστηκαν βασικά ευρήματα που είναι σημαντικά για τις σύγχρονες βιομηχανίες που επιθυμούν να ενσωματώσουν την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων στα συστήματά τους.

Τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν μια πολύ σημαντική τεχνολογία για το Industry 4.0 και τις μελλοντικές πτυχές του, καθώς η ενσωμάτωσή τους στις βιομηχανίες ενισχύει βελτιστοποιεί το συνολικό πλαίσιο των διεργασιών που εκτελούνται. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία στις βιομηχανίες όλων των κλάδων να αναπτύξουν και να βελτιστοποιήσουν περαιτέρω τις λειτουργίες τους, αυξάνοντας σημαντικά την ανταγωνιστικότητά τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλες οι βιομηχανίες να επιδιώκουν την ανάπτυξη χρήσιμων και πρωτοπόρων προϊόντων μιας ευρείας γκάμας για την κάλυψη των αναγκών που απαιτούν οι παραγωγικές διαδικασίες. Ακόμη, η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων προσφέρει ανάπτυξη σε όλες τις υπόλοιπες τεχνολογίες του Industry 4.0, καθώς είναι

σε θέση να της χρησιμοποιεί και παράλληλα να τις συνδυάζει για την επίτευξη της καλύτερης λειτουργίας μιας επιχείρησης.

Μέσω διαφόρων ερευνών αποδείχθηκε ότι τα ψηφιακά δίδυμα έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν σημαντικά την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα των βιομηχανικών συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα ευρήματά υποδηλώνουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία των προβλέψεων χρήσης ενέργειας, να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας και να εντοπίσουν πιθανές περιοχές βελτίωσης στα ενεργειακά συστήματα.

Ωστόσο, η έρευνά μας υπογραμμίζει επίσης την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση και ανάπτυξη της εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων σε βιομηχανικά συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας. Ειδικότερα, σημαντικό είναι οι μελλοντικές έρευνες να επικεντρωθούν στην ενσωμάτωση των ψηφιακών διδύμων στα υπάρχοντα βιομηχανικά συστήματα, στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών που αφορούν την αρχιτεκτονική τους και στον εντοπισμό των πιθανών εμποδίων στην εφαρμογή.

Εν κατακλείδι, με την τρέχον ενεργειακή κρίση, οι επιχειρήσεις προσπαθούν συνεχώς να εντοπίσουν μια λύση για την διαχείριση της ενέργειας. Αποδείχθηκε ότι τα ψηφιακά δίδυμα με την ορθή ενσωμάτωσή τους στα βιομηχανικά συστήματα μπορούν να διαχειριστούν με μεγάλη αποτελεσματικότητα το πρόβλημα της ενέργειας που επικρατεί. Με την εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων σε βιομηχανικά συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας, οι οργανισμοί μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή τους απόδοση, να μειώσουν το αποτύπωμα τους στο περιβάλλον και τελικά να συμβάλουν σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Βιβλιογραφία

[1] iED - Team. (2019). The 4 Industrial Revolutions, Institute of Entrepreneurship Development.

[2] U.S. HISTORY SCENE. (Ryan Engelman) The Second Industrial Revolution, 1870-1914. <https://ushistoryscene.com/article/second-industrial-revolution/>

[3] André Danzin., Rahat Nabi Khan., David A. Blackburn., Jean Sequeira., Bruno Rebaglia., Sergio Sartori., Elisabeth Filemon., Norihisa Doi., Koichi Furukawa., Kazuhiro Fuchi., Christo Boutzev., Roger B.Smith., Chingiz Aitmatov., Liu Fengqiao., & Blagovest Sendov. (1987). The Third industrial revolution. UNESCO Digital Library. pp. 115-138

[4] Schume, P. (2020, April 17). Improve product quality and yield with intelligent, secure, and adaptable manufacturing operations. IBM. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-manufacturing-ready/>

[5] The Food and Drug Administration. (2018). Radio Frequency Identification (RFID). <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/electromagnetic-compatibility->

[emc/radio-frequency-identification-](#)

[rfid#:~:text=Radio%20Frequency%20Identification%20\(RFID\)%20refers,back%20from%20the%20RFID%20tag.](#)

[6] Merchant, N. IoT Technologies Explained: History, Examples, Risks & Future. VISION OF HUMANITY. <https://www.visionofhumanity.org/what-is-the-internet-of-things/#:~:text=The%20term%20'Internet%20of%20Things,them%20through%20a%20supply%20chain.>

[7] Brian Posey., Linda Rosencrance., & Sharon Shea. (2022). Industrial internet of things (IIoT). TechTarget. <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/Industrial-Internet-of-Things-IIoT>

[8] nexusintegra. (n.d). Why is Big Data the core of the 4.0 industry?. <https://nexusintegra.io/big-data-industry-4-0/>

[9] Thanasis Kotsiopoulos., Panagiotis Sarigiannidis., Dimosthenis Ioannidhs., & Dimitrios Tzovaras. (2021). Machine Learning and Deep Learning in smart manufacturing: The Smart Grid paradigm. Computer Science Review, 40,(1). <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100341>

[10] Keyan Cao., Yefan Liu., Gongjie Meng., & Qimeng Sun. (2020). An overview on Edge Computing Research. Article in IEEE Access. DOI : 10.1109/ACCESS.2020.2991734

[11] Banks, J. (1999). INTRODUCTION TO SIMULATION. pp.7-8

[12] William de Paula Ferrera., Fabiano Armellini., & Luis Antonio De Santa-Eulalia. (2020) Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. Computers & Industrial Engineering, 149,(1). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106868>

[13] SIEMENS. (n.d). Manufacturing Simulation. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/manufacturing-simulation/27068>

[14] Baheti, R., & Gill, H. (2011). Cyber-physical Systems. The impact of control technology.

[15] RMIT UNIVERSITY. (n.d). What are cyber-physical systems?. <https://www.rmit.edu.au/news/c4de/what-are-cyber-physical-systems>

[16] Edward A. Lee. (2015). The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A Focus on Models. doi: [10.3390/s150304837](https://doi.org/10.3390/s150304837)

[17] Wayne Wolf. (2009). Cyber-Physical Systems. Embedded Computing. Article in IEEE Computer Society.

- [18] Jehn-Ruey Jiang. (2018). An improved cyber-physical systems architecture for industry 4.0 smart factories. *Advances in Mechanical Engineering*, 10,(6) 1-15. p.1
<https://doi.org/10.1177/1687814018784192>
- [19] Variohm. (n.d). Types of Sensors. <https://www.variohm.com/news-media/technical-blog-archive/types-of-sensors>
- [20] J, Shieh., J.E Huber., N.A Fleck., & M.F Ashby. (2001). The selection of sensors. *Progress in Materials Science* 46, 461-504. pp. 464-479.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(00\)00011-6](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(00)00011-6)
- [21] Janocha, H. (2004). Introduction. In: Janocha, H. (eds) *Actuators*. Springer, Berlin, Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-05587-8_1
- [22] Louis N. Cattafesta III., & Mark Sheplak. (2011). Actuators for Active Flow Control. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 43,(1), 247-272. pp. 249-252.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122109-160634>
- [23] iqsdirectory. Electric Actuators. Editorial by Industrial Quick Search.
<https://www.iqsdirectory.com/articles/linear-actuator/electric-actuators.html>
- [24] MAVERICK. HYDRAULIC ACTUATORS 101.
<https://www.maverickmachine.ca/news/hydraulic-actuators-101/>
- [25] Davis, S. (2018, September). pneumatic actuators. In *Actuators* (Vol. 7, No. 3, p. 62). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/act7030062>
- [26] Hazem I. Ali., Samsul Bahari B Mohd Noor., S. M. Bashi., & M. H. Marhaban. (2009). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. A Review of Pneumatic Actuators (Modeling and Control). 3,(2), 440-454.
- [27] Xiangyu Gao., Jikun Yang., Jingen Wu., Xudong Xin., Zhanmiao Li., Xiaoting Yuan., Xinyi Shen., & Shuxiang Dong. (2019, November). Piezoelectric Actuators and Motors: Materials, Designs, and Applications. *Advanced Material Technologies*. 5,(1)
<https://doi.org/10.1002/admt.201900716>
- [28] Li Sui., Xin Xiong., & Gengechen Shi. (2012). Piezoelectric Actuator Design and Application on Active Vibration Control. *Physics Procedia*, 25,(1), 1388-1396.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.251>
- [29] Peter Druschel., Rebecca Isaacs., Thomas Gross., & Marc Shapiro. (2006, April). *Fostering Systems Research in Europe*.

- [30] Cheilas, K., Vakaloudis, A., & Politis, A. (2015). Computer Networks - Laboratory Exercises [Laboratory Guide]. Kallipos, Open Academic Editions. <https://hdl.handle.net/11419/1763>
- [31] NI. (2022, September). Controller Area Network (CAN) Overview. <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/06/controller-area-network--can--overview.html#:~:text=Instruments%20CAN%20Tools-.What%20is%20CAN%3F,communicate%20with%20a%20CAN%20network.>
- [32] Corrigan, S. (2016). Introduction to the Controller Area Network (CAN). rev (B). TEXAS INSTRUMENTS. <https://www.ti.com/lit/an/sloa101b/sloa101b.pdf>
- [33] CISCO. (n.d.). What Is a LAN?. <https://www.cisco.com/c/en/us/products/switches/what-is-a-lan-local-area-network.html>
- [34] Satish K. Shah., Sonal J Rane., & Dharmistha D Vishwakarma. (2012). Performance Evaluation of Wired and Wireless Local Area Networks. International Journal of Engineering Research and Development. 1,(11), PP. 43-48.
- [35] Lutkevich, B. (2021, October). Transmission Control Protocol (TCP). TechTarget.
- [36] Marshall, B., & Homer, T. (2021, August 17). How WiFi Works. howstuffworks. <https://computer.howstuffworks.com/wireless-network.htm#:~:text=Here's%20what%20happens%3A,a%20physical%2C%20wired%20ethernet%20connection.>
- [37] Lohnes, K. (2017, October 25). How Does Wi-Fi Work?. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/story/how-does-wi-fi-work>
- [38] Stanislav Safaric., & Kresimir Malaric. (2006). ZigBee wireless standard. Faculty of Electrical Engineering and Computing. PP. 259-262.
- [39] SILICON LABS. AN1233: Zigbee Security. Rev. 0.3. <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/an1233-zigbee-security.pdf>
- [40] A. Gladisch., S. Rietschel., T. Mundt., J. Bauer., J. Goltz., & S. Wiedenmann. (2018). Securely Connecting IoT Devices with LoRaWAN. Second World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability, pp. 220-229. doi: 10.1109/WorldS4.2018.8611576.
- [41] LoRa Alliance. (n.d.). What is LoRaWAN Specification. <https://loralliance.org/about-lorawan/>

- [42] Andisheh Feizi., & Chui Yin Wong. (2013). Usability of User Interface Styles for Learning Graphical Software Applications. International Journal of Human Computer Interaction (IJHCI), 4,(1), pp. 34-53.
- [43] Golnaraghi, Farid., & Benjamin C. Kuo. (2017). Automatic Control Systems. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781259643835>
- [44] Encyclopedia Britannica. (n.d.). Feedback controls.
<https://www.britannica.com/technology/automation/Consumer-products>
- [45] FEEDBACK CONTROL SYSTEMS. pp.1-36.
<https://www.ewh.ieee.org/sb/iiee/new/tutorials/feedback.pdf>
- [46] MathWorks. (n.d.). Linearization for Model Analysis and Control Design.
<https://www.mathworks.com/discovery/linearization.html#:~:text=Linearization%20involves%20creating%20a%20linear,all%20model%20states%20are%20constant.>
- [47] Vipin Jain. (2021, June 27). Types of Controllers | Proportional Integral and Derivative Controllers. <https://www.electrical4u.com/types-of-controllers-proportional-integral-derivative-controllers/>
- [48] Electrical4U. (2020, October 23). Types of Control Systems | Linear and Non Linear Control System. <https://www.electrical4u.com/types-of-systems-linear-and-non-linear-system/>
- [49] Stengel, R. F., & Ray, L. R. (1991). Technical notes and correspondence: Stochastic robustness of linear time-invariant control systems. NASA. Langley Research Center, Joint University Program for Air Transportation Research, 1990-1991.
- [50] Electronics Projects. (n.d.). Time Variant and Time Invariant System | Difference and Information. https://electronicsprojects.in/signals_and_systems/time-variant-and-time-invariant-system-difference-and-information/#:~:text=Time%2Dinvariant%20systems%20can%20be%20analyzed%20in%20the%20time,using%20techniques%20such%20as%20convolution.&text=Time%2Dvariant%20systems%20may%20require%20more%20advanced%20techniques%20such%20as,such%20as%20the%20Fourier%20transform.
- [51] Teja, R. (2021, April 23). Open Loop System. Electronics Hub. <https://www.electronicshub.org/open-loop-system/#:~:text=Open%20Loop%20System%20Applications&text=Some%20of%20the%20popular%20systems,Time%20based%20Bread%20Toaster>

- [52] Electrical4U. (2020, December 27). Control Systems: What Are They? (Open-Loop & Closed-Loop Control System Examples). <https://www.electrical4u.com/control-system-closed-loop-open-loop-control-system/#:~:text=Disadvantages%20of%20Closed%20Loop%20Control%20System,-Disadvantages%20of%20a&text=Required%20more%20maintenance.,a%20stable%20closed%20loop%20system>.
- [53] Administrator. (2015, July 17). Closed Loop System. Electronics Hub. <https://www.electronicshub.org/closed-loop-system/#:~:text=of%20other%20system.-,The%20control%20system%20which%20uses%20its%20feedback%20signal%20to%20generate,output%20by%20using%20feedback%20loop>.
- [54] ElectricalEngineering.xyz. (n.d.). Top 10 Examples of Closed Loop Control Systems [Practical Applications]. Article in ElectricalEngineering.xyz. https://www.electricalengineering.xyz/article/top-10-examples-of-closed-loop-control-systems-practical-applications/#Sunseeker_solar_system
- [55] Schatz, D., Bashroush, R., & Wall, J. (2017). Towards a more representative definition of cyber security. *Journal of Digital Forensics, Security and Law*, 12(2), 8.
- [56] Schwab, W., & Poujol, M. (2018). The state of industrial cybersecurity 2018. *Trend Study Kaspersky Reports*, 33.
- [57] Livingston, J. (2021, April 8). What ICS security? . Article in Verve. <https://verveindustrial.com/resources/blog/what-is-ics-security/#:~:text=ICS%20security%20is%20defined%20as,Vulnerability%20management>
- [58] Khalid, H., Hashim, S. J., Ahmad, S., Hashim, F., & Chaudary, M. A. (2020). Cybersecurity in Industry 4.0 context: Background, issues, and future directions. *The nine pillars of technologies for industry*, 4, 263-307.
- [59] HKR Trainings. (n.d.). cyber security technologies. [https://hkrtrainings.com/cyber-security-technologies/#:~:text=Cloud%20computing-,Web%20security,Prevention%20\(DLP\)%20%26%20Data%20encryption](https://hkrtrainings.com/cyber-security-technologies/#:~:text=Cloud%20computing-,Web%20security,Prevention%20(DLP)%20%26%20Data%20encryption)
- [60] IBM. What is a digital twin?. <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin#:~:text=A%20digital%20twin%20is%20a,Benefits>
- [61] Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>

- [62] Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11, 939-948.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- [63] Grieves, M. W. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1-2), 71-84.
- [64] dvidflrmnd. (2017, August 1). MindSphere Release July 2017. Blog in Siemens.
<https://blogs.sw.siemens.com/mindsphere/mindsphere-release-july-2017/>
- [65] aebv. (2021, May 17). Simulations & Virtual Reality, Digital Twins and Augmented Reality Supporting Automation and Production Solutions (pt 2).
<https://www.aebv.com/news/simulations-virtual-reality-digital-twins-and-augmented-reality-supporting-automation-and-production-solutions-pt-2/>
- [66] Hernandez-Boussard T., Macklin P., Greenspan EJ., Gryshuk AL., Stahlberg E., Syeda-Mahmood T., & Shmulevich I. Digital twins for predictive oncology will be a paradigm shift for precision cancer care. (2021). doi: 10.1038/s41591-021-01558-5.
- [67] P. Withers (2009), Mars Exploration Rover Entry Profiles, NASA Planetary Data System, <https://doi.org/10.17189/1518941>
- [68] Lind, M., Becha, H., Watson, R. T., Kouwenhoven, N., Zuesongdham, P., & Baldauf, U. (2020). Digital twins for the maritime sector. *Smart Maritime Network*, 10.
- [69] Ship-technology. (2017, November 13). Digital twins in shipping : the open-source approach. <https://www.ship-technology.com/features/digital-twins-shipping-open-source-approach/>
- [70] Maersk. (2023, 31 January). Digital Twin: The virtual replica of our physical world. <https://www.maersk.com/insights/digitalisation/digital-twin>
- [71] European Commission. (n.d.). Energy efficiency - targets, directive and rules. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en
- [72] He, R., Chen, G., Dong, C., Sun, S., & Shen, X. (2019). Data-driven digital twin technology for optimized control in process systems. *ISA transactions*, 95, 221-234.
- [73] Gargalo, C. L., de Las Heras, S. C., Jones, M. N., Udugama, I., Mansouri, S. S., Krühne, U., & Gernaey, K. V. (2021). Towards the development of digital twins for the bio-manufacturing industry. *Digital Twins: Tools and Concepts for Smart Biomanufacturing*, 1-34.
- [74] Vachálek, J., Bartalský, L., Rovný, O., Šišmišová, D., Morhác, M., & Lokšík, M. (2017, June). The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0

concept. In *2017 21st international conference on process control (PC)* (pp. 258-262). IEEE.

[75] Siemens. (n.d.). A wind of change through digitalization. <https://new.siemens.com/global/en/markets/wind/equipment/digitalization.html>

[76] Lopes, M. R., Costigliola, A., Pinto, R., Vieira, S., & Sousa, J. M. (2020). Pharmaceutical quality control laboratory digital twin—A novel governance model for resource planning and scheduling. *International Journal of Production Research*, 58(21), 6553-6567.

[77] Automotive News. (2023, March 5). How digital twins give automakers ‘superpowers’ on the factory floor. <https://www.autonews.com/technology/bmw-mercedes-gm-see-digital-twins-key-optimize-production>

[78] AIRBUS. (n.d.). Digital Design, Manufacturing & Services. <https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/digital-design-manufacturing-services>

[79] Lawton G. (2021, July 28). Siemens, Dow partner on process manufacturing digital twins testbed. VentureBeat. <https://venturebeat.com/business/siemens-dow-partner-on-process-manufacturing-digital-twin-testbed/>

[80] Llopis-Albert, C., Rubio, F., & Valero, F. (2021). Impact of digital transformation on the automotive industry. *Technological forecasting and social change*, 162, 120343.

[81] Pimenta, F., Pacheco, J., Branco, C. M., Teixeira, C. M., & Magalhães, F. (2020, September). Development of a digital twin of an onshore wind turbine using monitoring data. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1618, No. 2, p. 022065). IOP Publishing.

[82]

[82] European Commission. (n.d.). Energy efficiency - targets, directive and rules. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en

[83] Arthur C. (2021, Nov 9). What is an energy management system? <https://www.unido.org/stories/what-energy-management-system>

[84] Chooruang, K., & Meekul, K. (2018, November). Design of an IoT energy monitoring system. In *2018 16th International Conference on ICT and Knowledge Engineering (ICT&KE)* (pp. 1-4). IEEE.

[85] Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., & Rasmussen, C. N. (2015). Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied energy*, 137, 545-553.

- [86] Divya, K. C., & Østergaard, J. (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric power systems research*, 79(4), 511-520.
- [87] Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M., & Alam, M. M. (2015). Pumped hydro energy storage system: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 586-598.
- [88] Amiryar, M. E., & Pullen, K. R. (2017). A review of flywheel energy storage system technologies and their applications. *Applied Sciences*, 7(3), 286.
- [89] Marimon, F., & Casadesús, M. (2017). Reasons to adopt ISO 50001 energy management system. *Sustainability*, 9(10), 1740.
- [90] Edwin Piñero. ISO 50001: Setting the Standard for Industrial Energy Management. *Green Manufacturer Magazine*, 4(3), 21-24.
<https://greenmfgnews.com/magazine/summer09/iso.pdf>
- [91] Usman, I. (2019). Developing green operations to minimize energy consumption by pdca cycle of iso 50001. A case study with delphi method approach. *Journal of Security and Sustainability Issues*, 9(May), 451-459.
- [92] ISO. (2014). ISO 50003:2014 Energy management systems — Requirements for bodies providing audit and certification of energy management systems.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50003:ed-2:v1:en>
- [93] ISO. (2020). ISO 50004:2020 Energy management systems — Guidance for the implementation, maintenance and improvement of an ISO 50001 energy management system. <https://www.iso.org/standard/74863.html>
- [94] International Organization for Standardization. (2014). ISO 50006:2014 Energy management systems — Measuring energy performance using energy baselines and energy performance indicators — General principles and guidance.
<https://www.iso.org/standard/51869.html#:~:text=ISO%2050006%3A2014%20provides%20guidance,process%20of%20measuring%20energy%20performance>.
- [95] Fichera, A., Volpe, R., & Cutore, E. (2020). Energy performance measurement, monitoring and control for buildings of public organizations: Standardized practices compliant with the ISO 50001 and ISO 50006. *Developments in the Built Environment*, 4, 100024.

[waste to energy para] Villar, A., Arribas, J. J., & Parrondo, J. (2012). Waste-to-energy technologies in continuous process industries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 14, 29-39.

[96] ISO. (2020). ISO 50015:2014. Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance, 1

<https://www.iso.org/standard/60043.html>

[97] INTERNATIONAL STANDARD ORGANISATION. (2014, December 15). Energy management systems — Measurement and verification of energy performance of organizations — General principles and guidance, 1 <http://parsetraining.com/wp-content/uploads/2018/11/ISO-50015-2014.pdf>

[98] Setiyo, M., Soeparman, S., Hamidi, N., & Wahyudi, S. (2017). Characteristic of LPG compositions in the fuel line during discharging process. *International Journal of Technology*, 8(1), 112-121.

[99] Satyendra. (2015, May 17). Liquefied Petroleum Gas- its Characteristics and Safety Requirements. <https://www.ispatguru.com/liquefied-petroleum-gas-its-characteristics-and-safety-requirements/>

[100] ELGAS. (2020, September). A quick guide on LPG. <https://www.elgas.com.au/blog/453-the-science-a-properties-of-lpg/>

[101] northernenergy. (2014, June 6). Advantages of using LPG over other fuels. <https://www.northernenergy.co.uk/news/advantages-of-using-lpg-over-other-fuels/#:~:text=It%20has%20a%20higher%20heating,than%20other%20forms%20of%20energy.>

[102] PUNEGAS. (n.d.). GAS FUEL CONVERSION. <https://punegas.com/solution/fuel-conversion-to-gas/>

[103] flogas. (n.d.). LPG - Properties and Hazards. <https://www.flogas.co.uk/lpg-properties-hazards>

[104] Themelis, N. J. (2003). An overview of the global waste-to-energy industry. *Waste Management World*, 40-48.

[105] Hankel, M., & Rexroth, B. (2015). The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0). *Zvei*, 2(2), 4-9.

[106] Fan, Y., Yang, J., Chen, J., Hu, P., Wang, X., Xu, J., & Zhou, B. (2021). A digital-twin visualized architecture for Flexible Manufacturing System. *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 176-201.

- [107] Lee, J., Ardakani, H. D., Yang, S., & Bagheri, B. (2015). Industrial big data analytics and cyber-physical systems for future maintenance & service innovation. *Procedia cirp*, 38, 3-7.
- [108] Jiang, J. R. (2018). An improved cyber-physical systems architecture for Industry 4.0 smart factories. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6), 1687814018784192.
- [109] Steindl, G., Stagl, M., Kasper, L., Kastner, W., & Hofmann, R. (2020). Generic Digital Twin Architecture for Industrial Energy Systems. *Applied Sciences*, 10(24), 8903. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/app10248903>