

ΓΕΡΟΝΙΚΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)  
& οι Εφαρμογές τους στη  
Βιομηχανική Παραγωγή**

Τομέας: Προγραμματισμός και Έλεγχος Παραγωγής

Εποπτεία: ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ ΗΛΙΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Επίβλεψη: ΓΚΑΓΙΑΛΗΣ ΣΩΤΗΡΙΟΣ, ΔΡ., Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π



Αθήνα 2022

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Γερονικολόπουλος Χρήστος

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κ. Τατσιόπουλο Ηλία για τη δυνατότητα που μου παρείχε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και για την γενικότερη εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου. Η αφοσίωση στο αντικείμενο του αποτέλεσε και αποτελεί για μένα πηγή έμπνευσης και κίνητρο να συνεχίσω να προσπαθώ για το καλύτερο.

Ιδιαίτερη αναφορά οφείλω να κάνω επίσης στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Γκαγιαλή Σωτήριο, μέλος Ε.ΔΙ.Π./Ε.Μ.Π. για τη συνεισφορά του και την καθοδήγησή του με πολύτιμες συμβουλές, που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της παρούσας εργασίας.

*Γερονικολόπουλος Χρήστος*

*Αθήνα, Οκτώβριος 2022*

## Περίληψη

**Σκοπός:** Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται διαδικτυακή αναζήτηση και παράθεση πληροφοριών αναφορικά με την Industry 4.0, τις τεχνολογίες της και ειδικά την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων γενικά και ειδικά στον τομέα της βιομηχανίας. Η εργασία εστιάζει στην αξιοποίηση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων στην προσομοίωση μηχανών, περιουσιακών στοιχείων και γραμμών παραγωγής, αλλά και στις περιπτώσεις των εταιριών Fujitsu, General Electric, Siemens, SAP, Autodesk και Ansys, οι οποίες έχουν προβεί στην κατασκευή προηγμένων λογισμικών, που εδράζονται σε τεχνολογίες της Industry 4.0, μια εκ των οποίων είναι τα ψηφιακά δίδυμα.

**Σχεδιασμός / μεθοδολογία / προσέγγιση:** Η παρούσα εργασία υιοθέτησε ως προσέγγιση την διαδικτυακή αναζήτηση ελληνικής και ξενόγλωσσης βιβλιογραφίας και την παρουσίαση σχετικών πληροφοριών.

**Ευρήματα:** Τα ψηφιακά δίδυμα, τα οποία αποτελούν μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες της Industry 4.0, διέπονται από τις βασικές αρχές της, που είναι ο ψηφιακός μετασχηματισμός, η αυτοματοποίηση και οι δυνατότητες αξιοποίησης των μεγάλης διάστασης δεδομένων, την ίδια στιγμή όμως μεταβάλλουν τον τρόπο λειτουργίας μιας βιομηχανικής επιχείρησης. Πιο συγκεκριμένα, τα ψηφιακά δίδυμα εισάγουν ένα εξ ολοκλήρου νέο μοντέλο στην παραγωγική διαδικασία, αλλά και στην προσομοίωση μηχανημάτων και περιουσιακών στοιχείων, στοχεύοντας όχι μόνο στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας της επιχείρησης, στη μείωση του κόστους και στην πρόβλεψη τυχουσών αστοχιών, αλλά και σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία.

**Πρωτοτυπία / αξία:** Η παρούσα εργασία προσέγγισε το υπό μελέτη θέμα τόσο γενικά, αναλύοντας σχετικές έρευνες, όσο και ειδικά, μελετώντας τα λογισμικά, που αναπτύσσουν έξι εταιρίες του κλάδου, βοηθώντας μελλοντικούς μελετητές να ενημερωθούν σε σημαντικό βαθμό για την τεχνολογία και τη σημαντικότητα της χρήσης των ψηφιακών διδύμων.

**Λέξεις - κλειδιά:** Ψηφιακά δίδυμα, βιομηχανία, ψηφιακός μετασχηματισμός, προσθετική βιομηχανία.

## **Abstract**

**Purpose:** In this thesis, a detailed online research and study of the available and recent literature regarding Industry 4.0, its technologies and especially the technology of digital twins in general and especially in the field of Industry is carried out. The study specializes in the use of digital twin technology in the simulation of machines, assets and production lines, and in the cases of Fujitsu, General Electric, Siemens, SAP, Autodesk and Ansys, which have undertaken the development of advanced software based on Industry 4.0 technologies, one of which is digital twins.

**Design / methodology / approach:** The present thesis adopted as approach the online research of greek and foreign language literature and the presentation of relevant information.

**Findings:** Digital twins, which are one of the most important technologies of Industry 4.0, are governed by its basic principles, which are digital transformation, automation and the possibilities of exploiting the big dimension of data, but at the same time they are changing the working way of an industrial business. More specifically, digital twins introduce an entirely new model to the production process, but also to the simulation of machines and assets, aiming not only to improve the efficiency and effectiveness of the business, to reduce costs and to predict accidental failures, but also to a more sustainable society.

**Originality / value:** This thesis approached the subject under study both in general, analyzing related research, and specifically, studying the software developed by six companies in the sector, helping future researchers to inform themselves in an important level for the technology and the importance of using digital twins.

**Keywords:** Digital Twin, Manufacturing, Industry 4.0, Additive Manufacturing.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες .....	iii
Περίληψη.....	iv
Abstract .....	v
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>viii</b>
<b>ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ .....</b>	<b>ix</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
Αναγκαιότητα μελέτης του θέματος.....	1
Σκοπός και στόχοι της εργασίας .....	2
Μεθοδολογία της εργασίας.....	3
Μεθοδολογία επιλογής μελετών.....	3
Κατηγοριοποίηση αρθρογραφίας.....	4
Δομή .....	7
<b>1 INDUSTRY 4.0 ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....</b>	<b>8</b>
1.1 Εισαγωγή.....	8
1.2 Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0 .....	8
1.3 Δυνατότητες και προκλήσεις της Industry 4.0 – Ετοιμότητα των επιχειρήσεων και βιωσιμότητα .....	11
1.4 Οι τεχνολογίες που οδηγούν την Industry 4.0 στην βιομηχανία .....	15
1.4.1 Διαδίκτυο των πραγμάτων .....	16
1.4.2 Υπολογιστικό νέφος.....	18
1.4.3 Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου ή υπολογιστική παρυφής .....	21
1.4.4 Τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική και βαθιά μάθηση κατά την ευφυή ανάλυση μεγάλων δεδομένων .....	22
1.4.5 Κυβερνοασφάλεια.....	25
1.4.6 Ψηφιακό δίδυμο.....	27
1.5 Χαρακτηριστικά ενός έξυπνου εργοστασίου .....	29
1.6 Κριτική σύνοψη κεφαλαίου.....	31
<b>2 ΤΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....</b>	<b>35</b>
2.1 Εισαγωγή .....	35

2.2	Εννοιολογική προσέγγιση, αξία και λειτουργία των ψηφιακών διδύμων – Διαφοροποίηση από τις IoT συσκευές .....	35
2.3	Εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων σε διάφορους τομείς .....	39
2.3.1	Έξυπνες πόλεις .....	40
2.3.2	Υγεία .....	42
2.3.3	Επιστήμη των υλικών.....	44
2.3.4	Ενέργεια .....	45
2.3.5	Λιανικό ηλεκτρονικό εμπόριο .....	46
2.4	Ψηφιακά δίδυμα στη βιομηχανία και στα βιομηχανικά προϊόντα.....	47
2.5	Ψηφιακά δίδυμα στην προσομοίωση μηχανημάτων και στην μοντελοποίηση περιουσιακών στοιχείων .....	53
2.6	Ψηφιακά δίδυμα στην προσομοίωση γραμμών παραγωγής.....	56
2.7	Οφέλη των ψηφιακών διδύμων .....	64
2.8	Προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων .....	65
2.9	Κριτική σύνοψη κεφαλαίου.....	67
<b>3</b>	<b>ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΟΙ ΕΤΑΙΡΙΕΣ FUJITSU, GENERAL ELECTRIC, SIEMENS, SAP, AUTODESK &amp; ANSYS.....</b>	<b>71</b>
3.1	Εισαγωγή .....	71
3.2	Fujitsu.....	72
3.3	General Electric .....	76
3.4	SIEMENS.....	79
3.5	SAP .....	81
3.6	Autodesk.....	83
3.7	Ansys.....	85
3.8	Κριτική σύνοψη κεφαλαίου.....	87
<b>4</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>90</b>
4.1	Συμπεράσματα .....	90
4.2	Συνεισφορά εργασίας.....	94
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>98</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>109</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 0.1: Μεθοδολογία επιλογής μελετών. ....	4
Σχήμα 1.1: Χρονοδιάγραμμα των βιομηχανικών επαναστάσεων. ....	9
Σχήμα 1.2: Τεχνολογίες που οδηγούν στην Industry 4.0. ....	16
Σχήμα 1.3: Η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και η βαθιά μάθηση. ....	23
Σχήμα 1.4: Ροή πληροφορίας σε ένα ψηφιακό δίδυμο. ....	28
Σχήμα 2.1: Αριθμός δημοσιεύσεων με τον όρο « <i>digital twin</i> » στον τίτλο, στις βάσεις δεδομένων IEEE Xplore και ScienceDirect. ....	36
Σχήμα 2.2: Διάγραμμα τομέων εφαρμογής ψηφιακών δίδυμων. ....	39
Σχήμα 2.3: Ψηφιακό δίδυμο στη βιομηχανική παραγωγή. ....	49
Σχήμα 2.4: Ψηφιακά δίδυμα και προσομοίωση μηχανημάτων / περιουσιακών στοιχείων. ....	54
Σχήμα 2.5: Ψηφιακά δίδυμα και προσομοίωση γραμμών παραγωγής. ....	57
Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική της Dracena. ....	72
Σχήμα 3.2: Υλοποίηση ενημερώσεων υπηρεσίας χωρίς διακοπή λειτουργίας. ....	75
Σχήμα 3.3: Ansys Twin Builder. ....	86



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

AI	Artificial Intelligence
APM	Asset Performance Management
DL	Deep Learning
Dracena	Dynamically-Reconfigurable Asynchronous Consistent EveNt processing Architecture
FDA	Food and Drug Administration
GE	General Electric
IT	Information Technology
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
ML	Machine Learning
PLM	Product Lifecycle Management
RL	Reinforcement Learning
VSM	Value Stream Method

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## Αναγκαιότητα μελέτης του θέματος

Στο χώρο της βιομηχανίας, οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν παρέχουν τη δυνατότητα στην σύγχρονη επιχείρηση να αξιοποιήσει πλήρως τους πόρους της (Tu et al., 2022; Zhang et al., 2020). Ανά τα έτη έχουν πραγματοποιηθεί ραγδαίες και μείζονος σημασίας αλλαγές στον τομέα της βιομηχανίας: ειδικότερα, ο συγκεκριμένος τομέας έχει μεταβεί από τη χρήση της ατμοηλεκτρικής ενέργειας (Industry 1.0) στη μαζική παραγωγή, με τη χρήση του ηλεκτρισμού (Industry 2.0), στην αυτοματοποίηση στο χώρο του εργοστασίου (Industry 3.0) και, στις μέρες μας, στον ψηφιακό μετασχηματισμό (Industry 4.0). Η Industry 4.0 διέπεται όχι μόνο από τον ψηφιακό μετασχηματισμό στο χώρο της βιομηχανίας, αλλά και από τις προηγμένες τεχνολογίες, οι οποίες καθιστούν εφικτή τη συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση δεδομένων μεγάλης διάστασης και την προαγωγή διαδικασιών, όπως είναι οι αλυσίδες παραγωγής και διανομής των προϊόντων, καθώς και την προαγωγή συντήρησης, επίβλεψης και λειτουργίας των μηχανημάτων τους και εν γένει των περιουσιακών τους στοιχείων (Ghobakhloo, 2019; Klingenberg et al., 2022; Sony & Naik, 2019), συμβάλλοντας σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία, μειώνοντας το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των βιομηχανικών επιχειρήσεων (Bai et al., 2020; Dalenogare et al., 2018).

Η υιοθέτηση των τεχνολογιών, που οδηγούν την Industry 4.0 στον βιομηχανικό τομέα, οδηγεί φυσιολογικά στην έλευση του έξυπνου εργοστασίου, όπου βελτιστοποιείται η αξιοποίηση των πόρων του εργοστασίου και συλλέγονται δεδομένα διαμέσου κατάλληλων αισθητήρων, τα οποία αναλύονται με προηγμένες μεθόδους και αλγορίθμους, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα και, εν συνεχεία, να ληφθούν οι καλύτερες δυνατές αποφάσεις σε κάθε θέμα που καλείται να διαχειριστεί η επιχείρηση. Διαμέσου των νέων αυτών προηγμένων τεχνολογιών, το έξυπνο εργοστάσιο καταφεύγει σε καινοτόμες και βιώσιμες λύσεις, οι οποίες αυξάνουν την ανταγωνιστικότητά του στον βιομηχανικό τομέα εν μέσω μιας ψηφιακής και αυξημένων απαιτήσεων πραγματικότητας (Osterrieder et al., 2019; Radziwon et al., 2014).

Σημειώνεται ότι μία από τις τεχνολογίες, οι οποίες αναπτύχθηκαν λόγω της Industry 4.0, είναι τα ψηφιακά δίδυμα, που εφαρμόστηκαν και συνεχίζουν να εφαρμόζονται από μια πληθώρα τομέων, ένας εκ των οποίων είναι και ο βιομηχανικός τομέας (Fuller et al., 2020). Πιο αναλυτικά,

διαμέσου της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας, προσφέρεται η δυνατότητα της μοντελοποίησης περίπλοκων συστημάτων και διαδικασιών (Grieves, 2014), αλλά και η ανάλυση μεγάλης διάστασης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (Holdowsky et al., 2015). Την πλειονότητα των περιπτώσεων, τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούν λογισμικό ανοικτού κώδικα και χρησιμοποιούνται στην μοντελοποίηση μηχανών και γενικά περιουσιακών στοιχείων της επιχείρησης, αλλά και στη προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας και της αλυσίδας ανεφοδιασμού (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019; Cai et al., 2017; Intizar Ali et al., 2021; Kholopon et al., 2019). Τέλος, ολόένα και περισσότερες εταιρίες, όπως είναι η Siemens, η Fujitsu και η General Electric, χρησιμοποιούν ψηφιακά δίδυμα κατά την επιχειρηματική τους λειτουργία (Matsumoto et al., 2020; Yamaoka et al., 2019).

Η αναγκαιότητα μελέτης του θέματος εδράζεται στο γεγονός ότι έχει αυξηθεί σημαντικά η επιστημονική έρευνα, η οποία διεξάγεται για τα ζητήματα, που αναφέρθηκαν ανωτέρω και ιδιαίτερα για την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, κάτι το οποίο τεκμηριώνεται και παρακάτω (βλ. ενότητα 2.1, Σχήμα 2.1). Η παρούσα εργασία συνεισφέρει στη δημιουργία μιας καλύτερης κατανόησης του υπό μελέτη θέματος, μέσα από τη μελέτη πρόσφατων επιστημονικών άρθρων, και συμπύσσει τα βασικά ευρήματα αυτών, ώστε ο αναγνώστης να τα κατανοήσει.

## **Σκοπός και στόχοι της εργασίας**

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τίθεται ως σκοπός η ενδεδειγμένη μελέτη της λίαν πρόσφατης και σχετικής ξενόγλωσσης αρθρογραφίας αναφορικά με την Industry 4.0, τις τεχνολογίες της και ειδικά την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων γενικά και ειδικά στον τομέα της βιομηχανίας. Ο σκοπός της εργασίας συνίσταται από επιμέρους στόχους, οι οποίοι επιτυγχάνονται μέσα από την ανάλυση της εργασίας και είναι συνοπτικά οι παρακάτω:

- Ιστορική αναδρομή και διερεύνηση της σημασίας και αξίας της Industry 4.0 προκειμένου να χαρακτηριστεί ως «επανάσταση».
- Διερεύνηση των τεχνολογιών, που οδηγούν την Industry 4.0.
- Διερεύνηση των χαρακτηριστικών ενός έξυπνου εργοστασίου.
- Διερεύνηση της ετοιμότητας των επιχειρήσεων να υιοθετήσουν τις νέες τεχνολογίες, οι οποίες απαρτίζουν την Industry 4.0.

- Διερεύνηση της έννοιας των ψηφιακών διδύμων, των ωφελειών και των προκλήσεων τους.
- Διερεύνηση των τομέων, στους οποίους εφαρμόζονται τα ψηφιακά δίδυμα.
- Διερεύνηση της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας και συγκεκριμένα στην προσομοίωση μηχανημάτων, περιουσιακών στοιχείων και γραμμών παραγωγής.
- Διερεύνηση των λογισμικών, τα οποία χρησιμοποιούν οι εταιρίες Fujitsu, General Electric, Siemens, SAP, Autodesk και Ansys.

## **Μεθοδολογία της εργασίας**

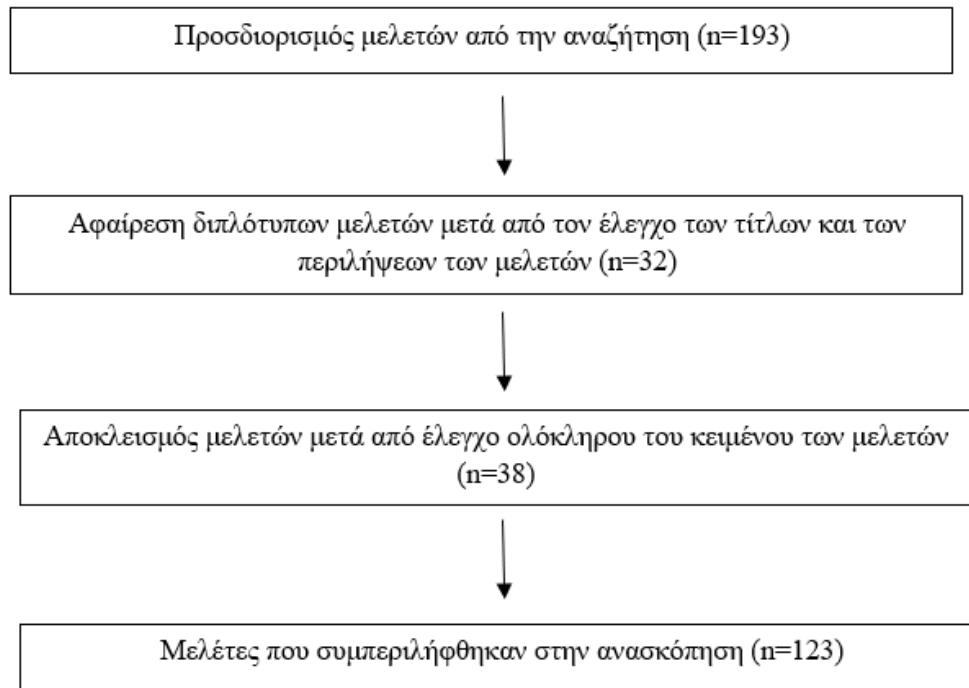
Ακολούθως περιγράφεται η μεθοδολογία επιλογής των μελετών και η κατηγοριοποίηση της αρθρογραφίας, που αξιοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

### **Μεθοδολογία επιλογής μελετών**

Αναφορικά με τη μέθοδο υλοποίησης της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση, ξεχωριστά για κάθε ενότητα των κεφαλαίων αυτής, επιστημονικών άρθρων με επιλεγμένες αγγλικές λέξεις – κλειδιά. Από τα συλλεχθέντα επιστημονικά άρθρα, προτιμήθηκαν τα πιο πρόσφατα άρθρα και συγκεκριμένα τέθηκε φίλτρο στην αναζήτηση επιστημονικών άρθρων στις βάσεις δεδομένων, ώστε τα άρθρα να είναι από το 2013 και μετά. Πιο αναλυτικά, η αρχική αναζήτηση οδήγησε στην εύρεση 193 μελετών από την Google Scholar και το Scopus. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε η αφαίρεση των διπλότυπων μελετών και αξιολογήθηκαν οι τίτλοι και οι περιλήψεις τους ως προς τη συνάφεια με το θέμα της παρούσας εργασίας, οπότε και παρέμειναν 161 άρθρα. Τα 161 επιστημονικά άρθρα μελετήθηκαν σε όλο τους το κείμενο, αποκλείστηκαν 38 εξ αυτών και παρέμειναν 123 επιστημονικές μελέτες, οι οποίες και αξιοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Οι 123 μελέτες, οι οποίες αναλύθηκαν, πληρούσαν τα κριτήρια επιλογής, τα οποία τέθηκαν, δηλαδή η χρονολογία δημοσίευσης να είναι στο εύρος 2013-2022 και η συνάφεια με τις επιμέρους πτυχές της εργασίας (σημασία / αξία της Industry 4.0, τεχνολογίες που οδηγούν την Industry 4.0, χαρακτηριστικά ενός έξυπνου εργοστασίου, ετοιμότητα επιχειρήσεων ως προς την υιοθέτηση τεχνολογιών που απαρτίζουν την Industry 4.0, έννοια – ωφέλειες – προκλήσεις – εφαρμογές ψηφιακών διδύμων, ψηφιακά δίδυμα και προσομοίωση μηχανημάτων, περιουσιακών στοιχείων και γραμμών παραγωγής, λογισμικά που χρησιμοποιούν οι εταιρίες Fujitsu, General

Electric, Siemens, SAP, Autodesk και Ansys). Στο κάτωθι διάγραμμα ροής αναπαρίσταται η μεθοδολογία, η οποία εφαρμόστηκε και περιγράφηκε ανωτέρω.

**Σχήμα 0.1:** Μεθοδολογία επιλογής μελετών.



### **Κατηγοριοποίηση αρθρογραφίας**

Έχοντας συγκεντρώσει τις 123 μελέτες, οι οποίες συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία, αφού πρώτα εφαρμόστηκε η μεθοδολογία επιλογής τους, όπως αυτή περιγράφηκε ανωτέρω, στη συνέχεια έγινε η κατηγοριοποίηση της επιλεγθείσας αυτής βιβλιογραφίας. Αρχικά, από τις 123 μελέτες, εντοπίστηκαν 7 πηγές, οι οποίες δεν αφορούσαν σε επιστημονικά άρθρα και, επομένως, δεν συμπεριλήφθηκαν στην κατηγοριοποίηση, η οποία έγινε. Πιο αναλυτικά, η κατηγοριοποίηση των επιστημονικών άρθρων, όπως μπορεί να φανεί και στο Παράρτημα, τα οποία ήταν τελικώς 116 στον αριθμό, έγινε με άξονες:

- το έτος δημοσίευσής τους,
- το ευρύτερο αντικείμενο και θέμα τους και, όπου αυτό ήταν δυνατό,
- τον ειδικότερο κλάδο εφαρμογής τους.

Πιο συγκεκριμένα, ο κλάδος εφαρμογής είχε σαν σκοπό να εξειδικεύσει όσες έρευνες αφορούσαν τα ψηφιακά δίδυμα, συγκεκριμενοποιώντας τον κλάδο στον οποίο αυτά εφαρμόστηκαν. Στις περιπτώσεις όπου μια επιστημονική έρευνα αφορούσε το αντικείμενο των ψηφιακών διδύμων, αλλά δεν αναφέρεται κάποιος επιμέρους κλάδος εφαρμογής, τότε η έρευνα αυτή αφορούσε τα ψηφιακά δίδυμα πιο γενικά και με αυτόν τον τρόπο αξιοποιήθηκε η συγκεκριμένη έρευνα στην παρούσα μελέτη.

Σημειώνεται ότι εντοπίστηκαν συνολικά 11 αντικείμενα, ή με άλλα λόγια 11 θέματα, τα οποία είναι τα εξής (με τυχαία σειρά):

- 1) Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0
- 2) Ετοιμότητα των επιχειρήσεων
- 3) Έξυπνο εργοστάσιο
- 4) AI/ML
- 5) Προκλήσεις της Industry 4.0
- 6) Πλεονεκτήματα της Industry 4.0
- 7) Διαδίκτυο των πραγμάτων
- 8) Υπολογιστικό νέφος
- 9) Κυβερνοασφάλεια
- 10) Υπολογιστική παρυφή
- 11) Ψηφιακό δίδυμο

Το αντικείμενο του ψηφιακού διδύμου εξειδικεύτηκε σε έξι επιμέρους κλάδους, οι οποίοι είναι οι παρακάτω (με τυχαία σειρά):

- 1) Βιομηχανία
- 2) Έξυπνες πόλεις
- 3) Υγεία
- 4) Επιστήμη των υλικών
- 5) Ενέργεια

## 6) Λιανικό και ηλεκτρονικό εμπόριο

Πιο αναλυτικά, για το αντικείμενο «*Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0*», αξιοποιήθηκαν εννέα επιστημονικές έρευνες, με έτη δημοσίευσης από το 2015 μέχρι και το 2022, για το αντικείμενο «*Ετοιμότητα των επιχειρήσεων*» αξιοποιήθηκαν τέσσερις επιστημονικές έρευνες, με έτη δημοσίευσης από το 2019 έως το 2020, για το αντικείμενο «*Εξυπνο εργοστάσιο*» αξιοποιήθηκαν 9 επιστημονικές έρευνες με έτη δημοσίευσης από το 2014 μέχρι και το 2022 και για το αντικείμενο «*AI/ML*» αξιοποιήθηκαν δώδεκα επιστημονικές έρευνες με έτη δημοσίευσης από το 2014 μέχρι και το 2022. Μάλιστα, τρεις από τις προαναφερθείσες δώδεκα επιστημονικές έρευνες εστίαζαν στον τομέα της Βιομηχανίας. Ακολούθως, για το αντικείμενο «*Προκλήσεις της Industry 4.0*», αξιοποιήθηκαν οκτώ σχετικές επιστημονικές έρευνες, μία εκ των οποίων αφορούσε τον τομέα της Βιομηχανίας, με έτη δημοσίευσης από το 2013 μέχρι και το 2022. Για το αντικείμενο «*Πλεονεκτήματα της Industry 4.0*», συγκεντρώθηκε μια επιστημονική έρευνα με έτος δημοσίευσης το 2020, ενώ για το αντικείμενο «*Διαδίκτυο των πραγμάτων*» συγκεντρώθηκαν επτά επιστημονικές έρευνες με έτη δημοσίευσης από το 2018 μέχρι και το έτος 2021, και για το αντικείμενο «*Υπολογιστικό νέφος*» συγκεντρώθηκαν τέσσερις επιστημονικές έρευνες με έτη δημοσίευσης από το 2017 μέχρι και το 2021. Επιπροσθέτως, για το αντικείμενο «*Κυβερνοασφάλεια*», συγκεντρώθηκαν δέκα επιστημονικές έρευνες με έτος δημοσίευσης να κυμαίνεται από το έτος 2018 μέχρι και το έτος 2021, ενώ για το αντικείμενο «*Υπολογιστική παρυφή*» συγκεντρώθηκαν πέντε επιστημονικές έρευνες, οι οποίες δημοσιεύτηκαν από το έτος 2018 μέχρι και το έτος 2022 και, τέλος, για το αντικείμενο «*Ψηφιακό δίδυμο*», συγκεντρώθηκαν εξήντα τέσσερις επιστημονικές έρευνες, με το έτος δημοσίευσης να κυμαίνεται από το έτος 2014 μέχρι και το έτος 2022. Πιο αναλυτικά, από τις εξήντα τέσσερις επιστημονικές έρευνες, οι οποίες αφορούσαν στα ψηφιακά δίδυμα, οι τριάντα δύο από αυτές αφορούσαν τον τομέα της Βιομηχανίας, ενώ οι πέντε από αυτές αφορούσαν τις έξυπνες πόλεις και οι τρεις από αυτές αφορούσαν τον τομέα της Υγείας, μια εξ αυτών αφορούσε την επιστήμη των υλικών, δύο από αυτές αφορούσαν τον τομέα της ενέργειας και μια από αυτές, τέλος, αφορούσε τον τομέα του λιανικού ηλεκτρονικού εμπορίου.

## Δομή

Η παρούσα εργασία συνίσταται από ένα εισαγωγικό κεφάλαιο, τρία κύρια κεφάλαια και το κεφάλαιο των συμπερασμάτων. Στο εισαγωγικό κεφάλαιο τονίζεται η αναγκαιότητα του υπό εξέταση θέματος, εισάγονται ο σκοπός και οι στόχοι της εργασίας, η μεθοδολογία και παρουσιάζεται συνοπτικά η δομή της.

Στο πρώτο κεφάλαιο, εισάγεται η έννοια της Industry 4.0 και εξετάζεται η σημασία της στον τομέα της βιομηχανίας. Συγκεκριμένα, γίνεται μια ιστορική αναδρομή για την Industry 4.0, αναλύονται οι δυνατότητες και οι προκλήσεις τις οποίες καλείται να υπερκεράσει, αλλά και ο βαθμός της ετοιμότητας των επιχειρήσεων στο να την δεχτούν και να την υιοθετήσουν κατά την επιχειρηματική τους λειτουργία, ενώ επίσης θίγεται το ζήτημα της βιωσιμότητας. Εντός του ίδιου κεφαλαίου, αναλύονται οι τεχνολογίες, που οδηγούν την Industry 4.0, και παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά ενός έξυπνου εργοστασίου.

Ακολούθως, στο επόμενο κεφάλαιο, η μελέτη εστιάζει στα ψηφιακά δίδυμα· προσδιορίζονται εννοιολογικά, γίνεται μνεία των κυριότερων εφαρμογών τους και αναλύονται τα οφέλη τους γενικά και στον τομέα της βιομηχανίας, αλλά και οι προκλήσεις οι οποίες είναι συνυφασμένες με τη χρήση τους. Επίσης, μελετώνται τα ψηφιακά δίδυμα στον τομέα της βιομηχανίας και συγκεκριμένα στην προσομοίωση μηχανημάτων, περιουσιακών στοιχείων και γραμμών παραγωγής.

Έπειτα, στο τρίτο κεφάλαιο, μελετώνται τα λογισμικά, τα οποία έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται από έξι εταιρίες· την Fujitsu, την General Electric, την Siemens, την SAP, την Autodesk και την Ansys, και τα οποία εδράζονται σε τεχνολογίες της Industry 4.0, μια εκ των οποίων είναι και η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων. Τέλος, στο κεφάλαιο των συμπερασμάτων, γίνεται συνθετική και κριτική συζήτηση των ευρημάτων και μνημονεύεται η συνεισφορά της εργασίας.



# 1 INDUSTRY 4.0 ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

## 1.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο εισάγεται η έννοια της Industry 4.0 και μελετάται η σημασία της στον τομέα της βιομηχανίας. Υλοποιείται ιστορική αναδρομή της Industry 4.0, αναλύονται οι δυνατότητες και οι προκλήσεις, που αυτή καλείται να υπερκεράσει, καθώς και ο βαθμός ετοιμότητας των επιχειρήσεων στην αποδοχή και υιοθέτησή της κατά την επιχειρηματική τους λειτουργία, θίγοντας παράλληλα το ζήτημα της βιωσιμότητας. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τεχνολογίες, που οδηγούν την Industry 4.0, και αναδεικνύονται τα κύρια χαρακτηριστικά ενός έξυπνου εργοστασίου.

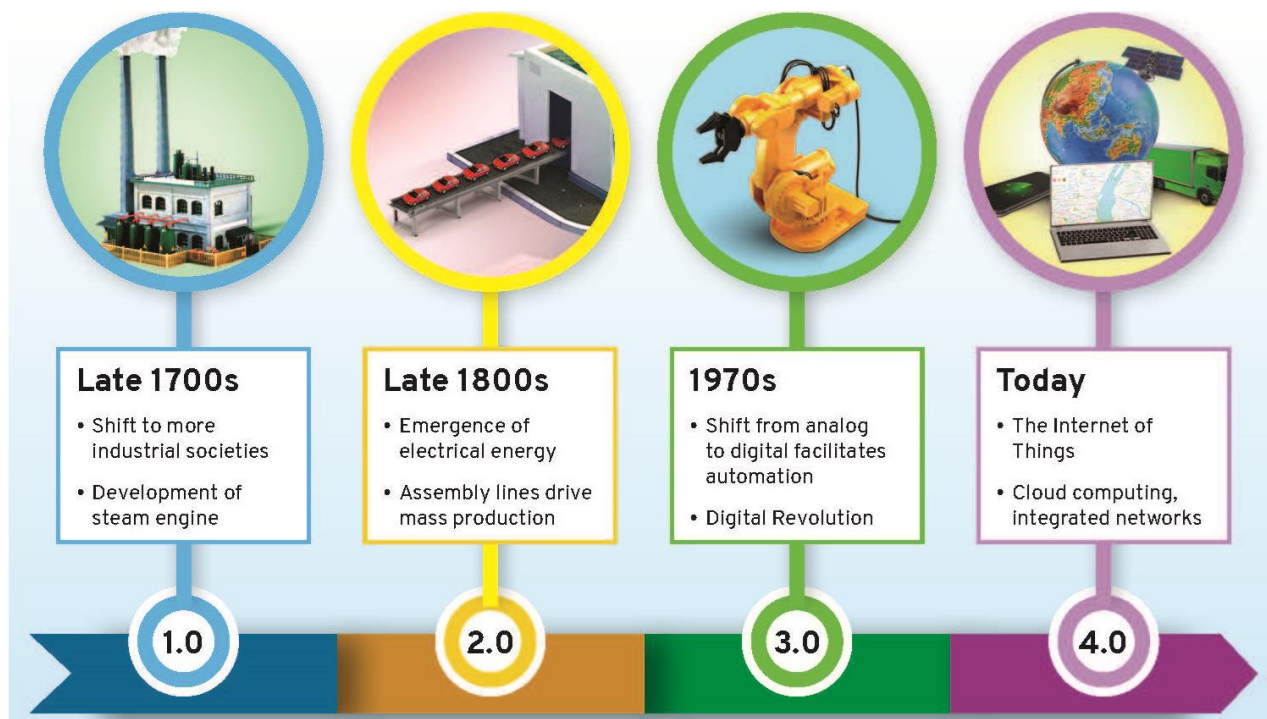
## 1.2 Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0

Οι διάφορες βιομηχανικές επαναστάσεις, οι οποίες έλαβαν χώρα συγκεκριμένες χρονικές περιόδους της παγκόσμιας Ιστορίας, επέφεραν αλλαγές στα πρότυπα και στις μεθόδους, που χρησιμοποιούνταν στην παραγωγή και επηρέασαν άρδην την βιομηχανία. Σημειώνεται όμως ότι δεν επηρεάστηκε μόνο η βιομηχανία από τις βιομηχανικές επαναστάσεις, που συνέβησαν, αλλά επηρεάστηκε, και μάλιστα κατά πολύ σημαντικό βαθμό, και ο τρόπος ζωής των ανθρώπων, που διαβιούσαν κατά τις χρονικές εκείνες περιόδους (Klingenberg et al., 2022). Προτού αναλυθεί το περιεχόμενο, οι τεχνολογίες και οι εφαρμογές της Industry 4.0, κρίνεται μείζονος σημασίας να πραγματοποιηθεί μια σύντομη σχετικά ιστορική αναδρομή αναφορικά με την έννοια της βιομηχανικής επανάστασης και να διαμορφωθεί κατ' αυτόν τον τρόπο ένα ιστορικό πλαίσιο, μέσα στο οποίο δύναται να τοποθετηθεί τόσο χρονολογικά όσο και ουσιαστικά η Industry 4.0.

Ένα ερώτημα, το οποίο ανακύπτει εύλογα, είναι το πώς δύναται να οριστεί μια χρονική περίοδος ως βιομηχανική επανάσταση. Αλλαγές στον τομέα της βιομηχανίας γίνονται αρκετά συχνά, αλλά δεν χαρακτηρίζονται ως βιομηχανικές επαναστάσεις. Οπότε, υπάρχει αναμφισβήτητα κάτι, το οποίο δύναται να χαρακτηρίσει ορισμένες αλλαγές και συγκεκριμένα τη χρονική περίοδο εντός της οποίας αυτές συμβαίνουν ως βιομηχανική επανάσταση. Η απάντηση έγκειται στο ότι το κύριο χαρακτηριστικό, το οποίο προσδίδει σε μια χρονική περίοδο την έννοια της βιομηχανικής επανάστασης, αφορά στα αποτελέσματα τα οποία αυτή επιφέρει τόσο στον τομέα της οικονομίας

όσο και στον γενικότερο τομέα της κοινωνίας. Εξού και ο όρος της επανάστασης παραπέμπει σε μια ξαφνική και μεγάλη αλλαγή, ενώ η έκφραση «βιομηχανική επανάσταση» σημαίνει στην ουσία μια περίοδο, κατά τη διάρκεια της οποίας η ανάπτυξη των μηχανημάτων οδηγεί σε σημαντικές αλλαγές στη γεωργία, τη βιομηχανία, τις μεταφορές και τις κοινωνικές συνθήκες. Ένα χαρακτηριστικό, που παρατηρείται, είναι ότι διαφαίνεται μια κατάσταση πριν και μια κατάσταση μετά από την συγκεκριμένη περίοδο. Σχετικά με την περιγραφή των διαφόρων βιομηχανικών επαναστάσεων, ένας συνήθης τρόπος περιγραφής τους είναι βάσει των τεχνολογιών τους (Klingenberg et al., 2022).

**Σχήμα 1.1:** Χρονοδιάγραμμα των βιομηχανικών επαναστάσεων.



Οριοθετώντας χρονολογικά την πρώτη βιομηχανική επανάσταση (Industry 1.0), αυτή έλαβε χώρα ανάμεσα στα έτη 1760 και 1840, αν και πολλακίς αναφέρεται ο όρος και από την αρχή του 18<sup>ου</sup> αιώνα. Έκτοτε, ένας σημαντικός αριθμός ερευνητών, από διάφορα επιστημονικά πεδία και συγκεκριμένα, ιστορικοί, οικονομολόγοι, αλλά και μελετητές, έχουν χρησιμοποιήσει τον προαναφερθέντα όρο, έτσι ώστε να μπορέσουν να ορίσουν χρονικές περιόδους, όπου έλαβαν χώρα τεχνολογικές αλλαγές, οι οποίες επέφεραν μεγάλο αντίκτυπο στην ευρύτερη κοινωνία. Η πρώτη βιομηχανική επανάσταση, δηλαδή η Industry 1.0, αφορούσε στη χρήση της ατμοηλεκτρικής

ενέργειας, η οποία άνοιξε το δρόμο σε αρκετές εφαρμογές, οι οποίες εφαρμόστηκαν επιτυχώς σε ένα ευρύ φάσμα από τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας (Klingenberg et al., 2022).

Εν συνεχεία, η δεύτερη βιομηχανική επανάσταση, δηλαδή η Industry 2.0, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα και συνδέθηκε με τον ηλεκτρισμό και τη μαζική παραγωγή. Η προαναφερθείσα τεχνολογική εφαρμογή είχε θετικές επιπτώσεις σε ένα ευρύ σύνολο από βιομηχανίες, όπως ήταν οι σιδηροδρομικές κατασκευές και η παραγωγή χημικών και διαφόρων καταναλωτικών αγαθών. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταμόρφωσε τις μεθόδους της παραγωγικής διαδικασίας, αλλά και ολόκληρη την αγορά και αυτό διότι λειτούργησε ως το εφαλτήριο για ένα ευρύ φάσμα από επιπρόσθετες καινοτομίες. Την ίδια στιγμή, η έννοια της μαζικής παραγωγής εφαρμόστηκε και σε άλλους τομείς, προάγοντας την παραγωγικότητα και ελαττώνοντας τις τιμές των προϊόντων, κάτι το οποίο άλλαξε τον τρόπο ζωής των ανθρώπων και ανέπτυξε την οικονομία, αφού αύξησε την αγοραστική δύναμη των καταναλωτών (Klingenberg et al., 2022).

Κατά τη δεκαετία του 1970, οι τεχνολογίες πληροφορικής (Information Technology, IT) και η ηλεκτρονική υπήρξαν υπεύθυνες για την έλευση της τρίτης βιομηχανικής επανάστασης (Industry 3.0). Βασικό χαρακτηριστικό των τεχνολογιών, που έγιναν διαθέσιμες στα πλαίσια της Industry 3.0, ήταν η εισαγωγή της αυτοματοποίησης στο χώρο του εργοστασίου. Η τεχνολογική αυτή αλλαγή άλλαξε άρδην τον τρόπο λειτουργίας των εργοστασίων, καθώς μια σειρά από δραστηριότητες και εργασίες, οι οποίες, μέχρι εκείνη τη στιγμή, πραγματοποιούνταν με χειρωνακτικό τρόπο, ξεκίνησαν να γίνονται αυτοματοποιημένα, κάτι το οποίο έχει αυταπόδεικτα οφέλη σε χρόνο, κόπο και χρήμα. Η τεχνολογική πρόοδος, που κατέστη με αυτόν τον τρόπο εφικτή, επέφερε με τη σειρά της οικονομική ανάπτυξη (Klingenberg et al., 2022).

Μολονότι βρισκόμαστε ακόμη εν μέσω της τρίτης βιομηχανικής επανάστασης, ένα νέο σύνολο τεχνολογιών αναδύεται πλέον (Ghobakhloo, 2019). Συγκεκριμένα, ο όρος Industry 4.0 προέρχεται από το γερμανικό "*Industrie 4.0*", που επινοήθηκε το 2011 στη Γερμανία ως πρωτοβουλία της γερμανικής ομοσπονδιακής κυβέρνησης για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας της γερμανικής μεταποιητικής βιομηχανίας (Stentoft et al., 2020), ενώ πρώτη φορά εισήχθη ως διαδικασία, χωρίς να λάβει συγκεκριμένη ονομασία, κατά το 1988 (Büchi et al., 2020). Σημειώνεται ότι η Industry 4.0 ή με άλλα λόγια η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, η οποία συνδέεται άρρηκτα με την έννοια και το περιεχόμενο του ψηφιακού μετασχηματισμού

(digital transformation) σημειώνει εκθετική ανάπτυξη στις μέρες μας. Αυτή η ψηφιακή επανάσταση, όπως θα αναλυθεί επισταμένως στην παρούσα εργασία, τόσο γενικά όσο και ειδικά στο πεδίο της βιομηχανίας, τείνει να αλλάξει άρδην τον τρόπο με τον οποίο τα άτομα ζουν αλλά και εργάζονται, ενώ ανοίγει το δρόμο και σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία (Ghobakhloo, 2019). Ως όρος γεννήθηκε προκειμένου να περιγράψει την ψηφιοποίηση (digitalisation) της βιομηχανίας και, μετέπειτα επεκτάθηκε, ως όρος, ώστε να προσδιορίσει και να περιγράψει έναν ευρύτερο ψηφιακό μετασχηματισμό και συνάμα μια τεράστια αλλαγή στην κοινωνία (Klingenberg et al., 2022). Σύμφωνα με τους Sony και Naik (2019), η Industry 4.0 αφορά στην σημερινή τάση των σύγχρονων επιχειρήσεων και οργανισμών προς την αυτοματοποίηση (automation) και την ανταλλαγή δεδομένων (data exchange) και αφορά σε αλλαγές, που συμβαίνουν σε όλες τις δραστηριότητες και τις διεργασίες μιας επιχείρησης, τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό της.

### **1.3 Δυνατότητες και προκλήσεις της Industry 4.0 – Ετοιμότητα των επιχειρήσεων και βιωσιμότητα**

Αναφορικά με τις εξελίξεις της Industry 4.0, αυτές δεν εκλαμβάνονται ως ανατρεπτικές, καθώς προέκυψαν διαμέσου μιας εξελικτικής διαδικασίας. Εντούτοις, λόγω της τεχνολογικής συμπληρωματικότητας (technological complementarities), αυτές οι εξελίξεις δύνανται να αποτελέσουν μια επανάσταση και, άρα, να αιτιολογήσουν τον όρο που τους έχει δοθεί (Klingenberg et al., 2022). Βέβαια, σύμφωνα με τον Bassi (2017), υπάρχουν συζητήσεις ή και διενέξεις στον ακαδημαϊκό χώρο, αναφορικά με το αν οι συγκεκριμένες τεχνολογικές αλλαγές δύνανται να περιέλθουν κάτω από τον όρο της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η ιδέα ξεκίνησε αρχικά στη Γερμανία και ακολούθησε η αποδοχή της από τις υπόλοιπες χώρες (Sony & Naik, 2019).

Ορισμένα από τα στοιχεία της Industry 4.0 υπήρξαν ήδη πριν από τριάντα έτη. Ωστόσο, στις μέρες μας, με την πληθώρα της πληροφορίας, που είναι διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή, αλλά και με την ωριμότητα διαχείρισης και αξιοποίησής της, που έχει πλέον επέλθει, σε συνδυασμό με την τεχνολογία και του χαμηλότερου λογισμικού κόστους, τα στοιχεία αυτά, που απαρτίζουν την Industry 4.0, κατόρθωσαν να γίνουν βιώσιμα (Klingenberg et al., 2022). Εξάλλου, η Industry 4.0 προκλήθηκε από το διαδίκτυο (Mabkhot et al., 2018; Scheer, 2015) και από το διαδίκτυο προήλθε

η αύξησης της διαθέσιμης πληροφορίας και τα δεδομένα μεγάλης διάστασης (big data) (Bashar, 2019), τα οποία είναι δομημένα ή μη δομημένα ακατέργαστα δεδομένα, που οποία είναι αποθηκευμένα σε πολλές διαφορετικές μορφές (Mabkhot et al., 2018). Όμως, όπως αναφέρει ο Scheer (2015), η διαθεσιμότητα της τεχνολογίας από μόνη της δεν συνεπάγεται ότι η χρήση της μπορεί να δικαιολογηθεί εμπορικά, ή να έχει τα αναμενόμενα επιθυμητά αποτελέσματα σε διάφορους τομείς.

Μερικά έτη, αργότερα, η μελέτη η οποία διεξήχθη από τους Bai και συν. (2020) κατέστησε σαφές ότι οι αρχές, οι οποίες διέπουν τις τεχνολογίες της Industry 4.0 καθώς και οι στόχοι, οι οποίοι τίθενται στα πλαίσια αυτής, δεν περιορίζονται στις συμβατικές οργανωτικές, επιχειρηματικές και οικονομικές επιδόσεις, τουναντίον αναμένεται να συμβάλλουν σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία. Πιο αναλυτικά, οι νέες τεχνολογίες, οι οποίες καταστάθηκαν διαθέσιμες, διαμέσου της Industry 4.0, επέδειξαν την οδό για αυξημένα επίπεδα αποτελεσματικότητας στην παραγωγή, ενώ επίσης έκαναν σαφές ότι κατέχουν την δυνατότητα να επηρεάσουν, και μάλιστα σε πολύ σημαντικό τρόπο, την κοινωνική και περιβαλλοντική βιώσιμη ανάπτυξη, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Οι εταιρίες οφείλουν, σύμφωνα με τους ερευνητές, πλέον, να λαμβάνουν υπόψη τις δυνατότητες, οι οποίες τους δίνονται μέσα από τα εργαλεία της Industry 4.0, προκειμένου οι τελευταίες να συνεισφέρουν στην βιωσιμότητα. Πέρα από βιωσιμότητα, οι τεχνολογίες της Industry 4.0 δύνανται να προσφέρουν σε μια επιχείρηση, η οποία επιλέγει να τις υιοθετήσει τεράστια καινοτομία και αύξηση της ανταγωνιστικότητάς της (Bai et al., 2020). Επίσης, η Industry 4.0 υποστηρίζει την εθνική ανάπτυξη διαμέσου της ανάπτυξης του τομέα της βιομηχανίας εν γένει (Bai et al., 2020).

Εξάλλου, τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής είναι επιρρεπή σε αρνητικές οικολογικές επιπτώσεις, με αποτέλεσμα την υπερκατανάλωση πόρων, την υπερθέρμανση του πλανήτη, την ολοένα και υψηλότερη ρύπανση του περιβάλλοντος, με συνέπεια την σταδιακή γενική υποβάθμισή του. Πέρα από τα ανωτέρω ζητήματα, τα οποία είναι κατά κύριο λόγο περιβαλλοντικής φύσεως, τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής έχουν και κοινωνικό αντίκτυπο και συγκεκριμένα καλούν την ανθρωπότητα να αντιμετωπίσει προκλήσεις και ζητήματα, τα οποία συνδέονται με την φτώχεια, την ανισότητα, την ευημερία σε τοπικό, αλλά και συλλογικό επίπεδο, αγγίζοντας και ζητήματα ειρήνης και δικαιοσύνης (Bai et al., 2020).

Αυτό το νέο βιομηχανικό στάδιο επηρεάζει τους κανόνες ανταγωνισμού, τη δομή της βιομηχανίας και τις απαιτήσεις των πελατών, ενώ την ίδια στιγμή προκαλεί αλλαγές στους κανόνες του ανταγωνισμού. Το τελευταίο συμβαίνει διότι καθίσταται αναγκαίο για τα επιχειρηματικά μοντέλα των επιχειρήσεων να περιέλθουν σε μια διαδικασία αναδιαμόρφωσης, η οποία στην ουσία θα γίνει διαμέσου της υιοθέτησης των εννοιών του διαδικτύου των πραγμάτων, τεχνολογικού επιτεύγματος, το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, αλλά και διαμέσου της ψηφιοποίησης των επιχειρήσεων. Από την πλευρά της αγοράς, οι ψηφιακές τεχνολογίες, οι οποίες συνιστούν την Industry 4.0, προφέρουν στις επιχειρήσεις πλέον την δυνατότητα να προτείνουν και να υλοποιήσουν καινοτόμες ψηφιακές λύσεις στους πελάτες τους, όπως διαδικτυακές υπηρεσίες ενσωματωμένες σε προϊόντα (Dalenogare et al., 2018).

Ωστόσο, πρέπει να καταστεί κατανοητό σε αυτό το σημείο ότι η υιοθέτηση στην πράξη προηγμένων τεχνολογιών δύναται να αποβεί μεγαλύτερη πρόκληση για χώρες, οι οποίες βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι οικονομίες των συγκεκριμένων χωρών έχουν ανά τα έτη εστιάσει πιο πολύ στην εξόρυξη και την εμπορική εκμετάλλευση των πρώτων υλών, οι επιχειρήσεις σε αυτές τις χώρες, την πλειονότητα των περιπτώσεων, βρίσκονται πίσω όσον αφορά στον ρυθμό της υιοθέτησης τεχνολογιών στην παραγωγή και γενικότερα στην βιομηχανία τους, συγκριτικά πάντα με αντίστοιχες επιχειρήσεις, οι οποίες εδρεύουν και δραστηριοποιούνται στις ανεπτυγμένες χώρες (Kumar & Siddharthan, 2013). Μολονότι οι τιμές των εν λόγω τεχνολογιών μειώνονται σε σταθερό ρυθμό, άλλα κόστη τα οποία σχετίζονται με την αντικατάσταση εξοπλισμού, την ανάπτυξη υποδομών, την εκπαίδευση, αλλά και την επανεκπαίδευση προσωπικού, θα αποτελέσουν μέρος του συνολικού κόστους της επένδυσης. Το τελευταίο σημαίνει ότι η εφαρμογή της Industry 4.0 στην πράξη, απαιτεί επενδύσεις, όχι μόνο σε εταιρικό, αλλά και σε κυβερνητικό επίπεδο, κάτι το οποίο κάνει σαφές το γεγονός ότι ο ρυθμός διάχυσης, δηλαδή μετάδοσης της Industry 4.0, εξαρτάται εν μέρει και από τους οικονομικούς θεσμούς (Brynjolfsson & McAfee, 2014; Kagermann et al., 2013).

Στον μικρόκοσμο μιας επιχείρησης, πρέπει να καταστεί σαφές ότι, προκειμένου αυτή να κατορθώσει να ανταποκριθεί στις διαρκώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των πελατών εντός ενός άκρως ανταγωνιστικού περιβάλλοντος, είναι αναγκαίο γι' αυτήν να δύναται να επιδείξει ευελιξία, αποτελεσματικότητα, αλλά και ικανότητα συνεχούς μείωσης του λειτουργικού της κόστους. Όσον αφορά στην νέα πραγματικότητα, που διαμορφώνεται με την Industry 4.0, σημειώνεται ότι οι μακροχρόνιες σχέσεις, οι οποίες θα αλλάξουν σε μια επιχείρηση είναι εκείνες που υπάρχουν

μεταξύ αυτής και της φύσης. Με βάση όσα ειπώθηκαν ανωτέρω σχετικά με την συμβολή της Industry 4.0 στην βιώσιμη ανάπτυξη, μια επιχείρηση λοιπόν καλείται να ανακαλέσει τις σχέσεις της με το φυσικό περιβάλλον και να εξελίξει την αποδοτικότητα των πόρων που χρησιμοποιεί, την βιωσιμότητα των συστημάτων παραγωγής της, την αύξηση της γεωγραφικής της εγγύτητας αναφορικά με το πελατολόγιό της, να συνεργαστεί με τους πελάτες της προς την βελτιστοποίηση των προϊόντων και των υπηρεσιών που προσφέρει και να διαμορφώσει διεπαφές, οι οποίες να θέτουν ως επίκεντρο τον άνθρωπο, ενώ τέλος θα δώσει έμφαση στην προαγωγή των συνθηκών μέσα στις οποίες εργάζονται οι υπάλληλοί της (Shi et al., 2020; Sony & Naik, 2019).

Αναφορικά με την ετοιμότητα των επιχειρήσεων, δεν υπάρχει σύμφωνα με τους Sony και Naik (2019), ακόμα και στις μέρες μας, μια γενική και κοινή αντίληψη σχετικά με την αξιολόγηση στις σημερινές επιχειρήσεις. Πιο αναλυτικά, οι Stentoft και συν. (2020) ανέφεραν ότι ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια ανάπτυξης της ετοιμότητας των επιχειρήσεων του βιομηχανικού τομέα και συνακόλουθα της εφαρμογής της Industry 4.0 στην πράξη έγκειται στην έλλειψη αντίληψης των managers σχετικά με τους οδηγούς αυτής της νέας τεχνολογικής πραγματικότητας. Στα πλαίσια της ίδιας έρευνας, ωστόσο, φάνηκε ότι οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις του τομέα της βιομηχανίας προσπαθούν να υπερκεράσουν με αποτελεσματικό τρόπο τα εμπόδια, που ανακύπτουν σχετικά με την εφαρμογή των τεχνολογιών της Industry 4.0, στην περίπτωση όπου έχουν μια συγκεκριμένη επιχειρηματική υπόθεση (business case) να αντιμετωπίσουν.

Ωστόσο, οι Masood και Sonntag (2020) επισημαίνουν ότι, μολονότι οι τεχνολογίες της Industry 4.0 παρουσιάζουν μια πληθώρα από πιθανά οφέλη για τον τομέα της βιομηχανίας, εντούτοις η πλειοψηφία των τεχνολογιών αυτών αναπτύσσονται εκ μέρους των μεγάλων επιχειρήσεων. Επομένως, οι ίδιοι επιστήμονες τονίζουν ότι ένα μεγάλο τμήμα των σύγχρονων μεθόδων δεν συνδέεται με τις ανάγκες των μικρομεσαίων επιχειρήσεων, παρά το γεγονός ότι αυτές αντιπροσωπεύουν το 90% των εγγεγραμμένων επιχειρήσεων σε Ευρώπη. Οι σημαντικότεροι περιορισμοί για τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις, αναφορικά με το να καταφέρουν να συνάδουν με την νέα πραγματικότητα της Industry 4.0, έγκεινται στον περιορισμό οικονομικών πόρων, στον περιορισμό πόρων γνώσης, καθώς και στον περιορισμό τεχνολογικής ευαισθητοποίησης (Masood & Sonntag, 2020).

Τέλος, το επιστημονικό άρθρο των Raj και συν. (2019), εξέτασε τα εμπόδια όσον αφορά στην εφαρμογή των τεχνολογιών της Industry 4.0 στον τομέα της βιομηχανίας στο πλαίσιο τόσο

των ανεπτυγμένων όσο και των αναπτυσσόμενων οικονομιών. Από την συγκεκριμένη επιστημονική έρευνα διαφάνηκε το γεγονός ότι η έλλειψη ψηφιακής στρατηγικής σε συνδυασμό με την έλλειψη πόρων αφορά στο πιο σημαντικό εμπόδιο τόσο για τις ανεπτυγμένες όσο και για τις αναπτυσσόμενες χώρες σχετικά πάντα με την εφαρμογή των τεχνολογιών της Industry 4.0 στον τομέα της βιομηχανίας. Επιπροσθέτως, διαμέσου της ανάλυσης των εμποδίων, τα οποία καλούνται να υπερκεράσουν οι επιχειρήσεις του βιομηχανικού τομέα στις αναπτυσσόμενες χώρες, κατέστησε σαφές ότι οι βελτιώσεις στα πρότυπα (standards) και οι κυβερνητικές ρυθμίσεις θα μπορούσαν να δράσουν επικουρικά σχετικά με την υιοθέτηση των τεχνολογιών της Industry 4.0 στην περίπτωση των αναπτυσσόμενων χωρών, ενώ διαφάνηκε ότι απαιτείται η προαγωγή της τεχνολογικής υποδομής για την προώθηση της υιοθέτησης των προαναφερθεισών τεχνολογιών στην περίπτωση των αναπτυγμένων χωρών (Raj et al., 2019).

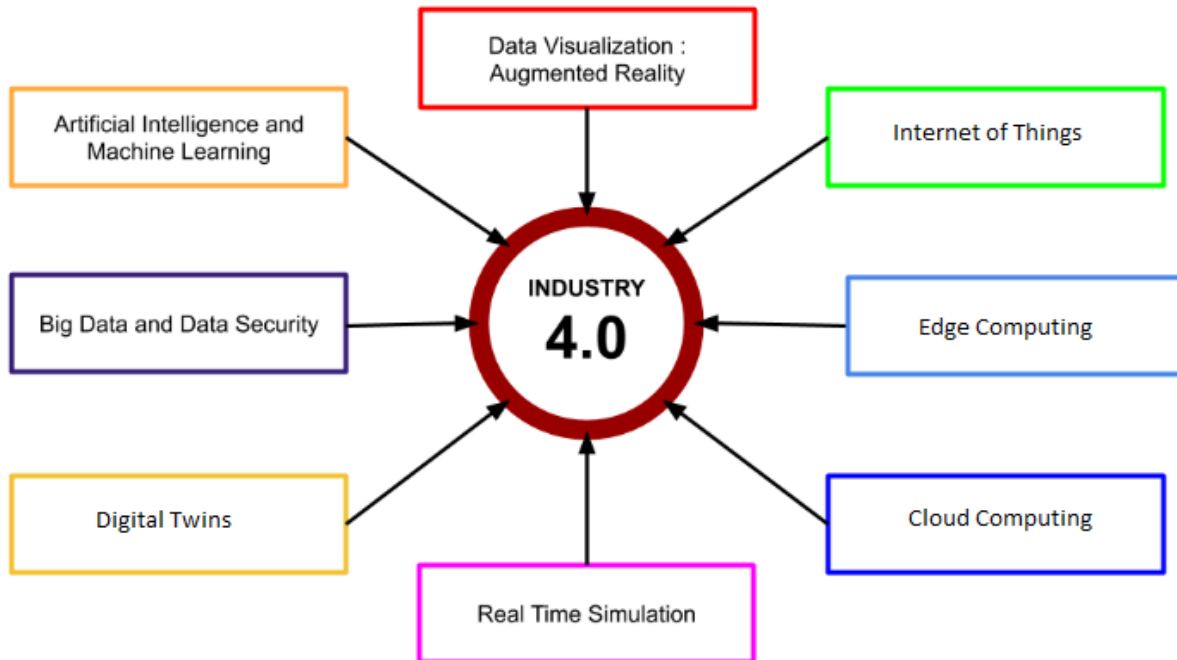
#### **1.4 Οι τεχνολογίες που οδηγούν την Industry 4.0 στην βιομηχανία**

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση (Industry 4.0) θέτει ως στόχο τον μετασχηματισμό των παραδοσιακών βιομηχανιών και συγκεκριμένα την μετατροπή τους σε έξυπνες βιομηχανίες διαμέσου της ενσωμάτωσης καινοτόμων τεχνολογιών. Η αντικατάσταση των φυσικών περιουσιακών στοιχείων των επιχειρήσεων σε συνδεδεμένες και αλληλοεξαρτώμενες ψηφιακές και φυσικές διαδικασίες οδηγεί στην ουσία στα λεγόμενα έξυπνα εργοστάσια και στα έξυπνα βιομηχανικά περιβάλλοντα (Lampropoulos et al., 2019). Στις επιμέρους υποενότητες της παρούσας ενότητας μελετώνται οι σημαντικότερες από τις τεχνολογίες, οι οποίες απαρτίζουν την Industry 4.0. Μία λέξη-κλειδί (buzzword) στον τομέα του IT είναι και το Διαδίκτυο των πραγμάτων (Internet of Things, IoT) (Sharma et al., 2020), ενώ το υπολογιστικό νέφος (cloud computing) έχει καταστεί πλέον στις μέρες μας ένας ευρέως αξιοποιημένος τομέας έρευνας στην ακαδημαϊκή κοινότητα, αλλά και στην βιομηχανία, όπου η υπολογιστική παρυφής (edge computing) έρχεται να άρει περιορισμούς της, ειδικά όσον αφορά στο χρόνο απόκρισης των τεχνολογιών IoT, που αυτή χρησιμοποιεί, στην ασφάλεια και στην ανάγκη άμεσης επεξεργασίας των δεδομένων (Alouffi et al., 2021; Cao et al., 2020; Chen & Ran, 2019), χρησιμοποιώντας τεχνικές, οι οποίες έγκεινται στην τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) και στην μηχανική μάθηση (machine learning) (Nain et al., 2022). Οι τεχνολογίες IoT, που εφαρμόστηκαν στις επιχειρήσεις στα πλαίσια της Industry 4.0, ήρθαν με αναπόφευκτες διαδικτυακές προκλήσεις για



τις επιχειρήσεις του βιομηχανικού τομέα, τις οποίες καλείται να επιλύσει ο τομέας της κυβερνοασφάλειας (cybersecurity) (Corallo et al., 2020; Corallo et al., 2021; Lu & Da Xu, 2018).

**Σχήμα 1.2:** Τεχνολογίες που οδηγούν στην Industry 4.0.



#### 1.4.1 Διαδίκτυο των πραγμάτων

Οι ολοένα και αυξανόμενες εξελίξεις στον τομέα της Τεχνολογίας έχουν οδηγήσει αναπόφευκτα σε καινούργιες δυνατότητες, οι οποίες, με τη σειρά τους, δύνανται να καταστήσουν πιο απλή την καθημερινή ζωή των σημερινών ανθρώπων, ενώ την ίδια στιγμή μπορούν να βελτιστοποιήσουν την αποτελεσματικότητα διαφόρων υπηρεσιών ή ακόμα και διαδικασιών παραγωγής (Nižetić et al., 2020).

Υπό αυτό το πρίσμα, οι τεχνολογίες του Διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things, IoT) θεωρούνται, στις μέρες μας, ότι συνίστανται σε έναν από τους καίριες σημασίας πυλώνες της Industry 4.0. Το τελευταίο συμβαίνει διότι οι τεχνολογίες IoT προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα από δυνατότητες καινοτομίας και ωφελειών προς τον σύγχρονο άνθρωπο (Nižetić et al., 2020). Διαμέσου των τεχνολογιών IoT δίνεται η δυνατότητα στους ανθρώπους, αλλά και στα αντικείμενα, να συνδεθούν ανεξαρτήτου χρόνου και χώρου, ήτοι γεωγραφικής περιοχής, σε ένα

κοινό δίκτυο διαμέσου του διαδικτύου (Lampropoulos et al., 2019). Τα πεδία, τα οποία επηρεάζει η τεχνολογία IoT είναι πάρα πολλά: μερικά μόνο από τα οποία είναι η μηχανική, η γεωργία και η ιατρική, ενώ ορισμένοι πιθανοί τομείς εφαρμογής αυτών δεν είναι ακόμα απόλυτα σαφείς ή παραμένουν ακόμα και τελείως άγνωστοι, κάτι το οποίο αποτελεί προφανή ένδειξη ότι θα πρέπει να διεξαχθεί πιο έντονη ερευνητική δραστηριότητα σε αυτόν τον δύσκολο τομέα με σκοπό την ανακάλυψη νέων και σημαντικών δυνητικών πλεονεκτημάτων για την κοινωνία (Nižetić et al., 2020).

Το IoT αφορά σε ένα μοντέλο, το οποίο συνίσταται σε ένα δυναμικό και όχι στατικό περιβάλλον αλληλένδετων και συνακόλουθα αλληλεξαρτώμενων υπολογιστικών συσκευών με διαφορετικά στοιχεία για απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και μεταφορά δεδομένων (Stoyanova et al., 2020). Πιο αναλυτικά, οι τεχνολογίες IoT κυμαίνονται από IoT-enabled wearables, δηλαδή συσκευές με δυνατότητα IoT, οι οποίες μπορούν να φορεθούν από ένα άτομο, είτε ως εξωτερικά αξεσουάρ, τα οποία ενσωματώνονται σε ενδύματα, είτε ως εμφυτεύματα στο σώμα ή ακόμα και ως τατουάζ στο δέρμα. Οι προαναφερθείσες συσκευές δύνανται να συνδέονται με το διαδίκτυο έτσι ώστε να πραγματοποιούν συλλογή, αποστολή και λήψη δεδομένων, τα οποία μεταφράζονται σε χρήσιμες πληροφορίες, οι οποίες δύνανται με τη σειρά τους να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη λήψη των βέλτιστων κάθε φορά αποφάσεων, ανάλογα πάντα με το σκοπό κάθε φορά (Dian et al., 2020). Πέρα από συσκευές οι οποίες δρουν σε ατομικό επίπεδο, δηλαδή φοριούνται πάνω στο άτομο με κάποιο τρόπο, αξίζει να σημειωθεί ότι μέσω της τεχνολογίας IoT έχουν κατασκευαστεί και συσκευές, οι οποίες ανταλλάσσουν δεδομένα με εκατομμύρια άλλες συσκευές σε όλο τον κόσμο. Το τελευταίο ανοίγει το δρόμο σε μια πληθώρα από εφαρμογές, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί και πολλούς κινδύνους, η αντιμετώπιση και η επίλυση των οποίων έγκειται στο πεδίο της κυβερνοασφάλειας (Stoyanova et al., 2020).

Η τεχνολογία IoT χρησιμοποιείται επιπροσθέτως με σκοπό να δημιουργηθούν αυτοκινούμενα αυτοκίνητα, αλλά και τεχνολογίες, οι οποίες οδηγούν σε μια έξυπνη πόλη (smart city) (Noor & Wan Haslina., 2018), ενώ το βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (Industrial Internet of Things, IIoT) αφορά στην ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση της βιομηχανικής παραγωγής, κάτι το οποίο οδηγεί με τη σειρά του στον μετασχηματισμό της παραδοσιακής βιομηχανίας, αφού εισάγονται έννοιες όπως είναι η αυτό-συντήρηση (self-maintainability), η αυτό-βελτιστοποίηση (self-optimization) και η αυτό-προσαρμογή (self-customization) (Lampropoulos et al., 2019).

Στον τομέα της βιομηχανίας, πέρα από όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, σημειώνεται ότι η βιώσιμη αλυσίδα εφοδιασμού καθίσταται στις μέρες μας αναπόφευκτη, αφού έγκειται σε έναν τρόπο ανταπόκρισης της επιχείρησης στην ριζική αλλαγή των απαιτήσεων των πελατών. Προκειμένου να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, δηλαδή η ανταπόκριση της επιχείρησης στις νέες απαιτήσεις των πελατών της, η τελευταία χρησιμοποιεί και πάλι τεχνολογίες IIoT, ειδικά προκειμένου να γίνει διαχείριση της αβεβαιότητας και του ρίσκου, που είναι ορατοί στην αλυσίδα εφοδιασμού και επισκιάζουν την απόδοσή της, αλλά και προκειμένου να γίνει η παρακολούθηση των προϊόντων, καθώς και η πρόβλεψη όπου αυτή είναι αναγκαία (Manavalan & Jayakrishna, 2018).

Ωστόσο, διαμέσου της εκθετικής ανάπτυξης, την οποία σημειώνει η IIoT, παρατηρείται μια συνεχής παραγωγή ενός τεράστιου όγκου δεδομένων και μάλιστα σε πολλαπλά σημεία. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αναδύεται ένα επιπρόσθετο πρόβλημα, το οποίο αφορά στην αποθήκευση αυτού του τεράστιου όγκου δεδομένων. Ο τεράστιος αυτός όγκος ανεπεξέργαστων δεδομένων δεν είναι δυνατόν να αποθηκευτεί τοπικά στις συσκευές IIoT, ειδικά αν συνυπολογιστεί το γεγονός ότι οι συσκευές αυτές έχουν εκ κατασκευής συγκεκριμένο χώρο αποθήκευσης. Σε αυτό το μείζον πρόβλημα έρχεται μια άλλη τεχνολογία, η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης να δώσει λύση, η οποία είναι το υπολογιστικό νέφος. Μάλιστα, όταν οι τεχνολογίες IoT και η υπολογιστική νέφους συνδυαστούν, τότε οι προσφερόμενες υπηρεσίες είναι εξαιρετικές (Sadeeq et al., 2021).

#### **1.4.2 Υπολογιστικό νέφος**

Το υπολογιστικό νέφος (cloud computing) είναι μια επιπρόσθετη τεχνολογία στο πλαίσιο της Industry 4.0, η οποία έχει εδραιωθεί πλέον σήμερα ως ένας τομέας επισταμένης επιστημονικής έρευνας, αφού είναι ένα πεδίο έντονου ενδιαφέροντος ανάμεσα στα μέλη της ακαδημαϊκής κοινότητας, αλλά συνάμα έχει αναδειχθεί σε ένα πεδίο έρευνας και εφαρμογών και στο χώρο της Βιομηχανίας. Η υπολογιστική νέφους παρέχει μια πλειάδα από ωφέλειες τόσο στους άμεσους καταναλωτές, δηλαδή τα άτομα όσο και σε παρόχους υπηρεσιών νέφους (cloud). Πιο αναλυτικά, το υπολογιστικό νέφος έχει προσθέσει έναν επιπρόσθετο και μάλιστα ελπιδοφόρο ρόλο στο IT διαμέσου της προσθήκης των υπηρεσιών αποθήκευσης στους χρήστες (Alouffi et al., 2021).

Συγκεκριμένα, οι νέες αυτές τεχνολογίες στο πλαίσιο της υπολογιστικής νέφους προσέφεραν τη δυνατότητα στους προμηθευτές να ενοικιάζουν τις υπηρεσίες τους με ωριαία

χρέωση, δηλαδή να νοικιάζουν ανά ώρα το χώρο αποθήκευσης στους πελάτες τους, οι οποίοι (χώροι) βρίσκονται στα φυσικά τους συστήματα (on premises) (Alouffi et al., 2021). Ακόμη, η υπολογιστική νέφος επιτρέπει στο δίκτυο να έχει εύκολη και καθολική πρόσβαση σε μια κοινή δεξαμενή υπολογιστικών πόρων, όπως για παράδειγμα δίκτυα, διακομιστές, χώρο αποθήκευσης, καθώς και διάφορες υπηρεσίες και εφαρμογές, οι οποίες προσφέρονται από τον εκάστοτε πάροχο και επιδέχονται διαμόρφωση (configuration) και άρα προσαρμόζονται εύκολα και άμεσα στις εκάστοτε ανάγκες (Keng-Boon et al., 2017).

Η υπολογιστική νέφος, ως έννοια, έχει προκύψει από την καταναμημένη αρχιτεκτονική λογισμικού (distributed software architecture) και θέτει ως στόχο της να προσφέρει υπηρεσίες, οι οποίες φιλοξενούνται διαμέσου του διαδικτύου, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Ειδικά στις μέρες μας, η υπολογιστική νέφος εντός του ευρύτερου χώρου του ΙΤ έχει αναδείξει την ύπαρξη νέων κοινοτήτων χρηστών των εν λόγω υπηρεσιών, ενώ έχει επίσης ορίσει εξολοκλήρου νέες αγορές. Οι υπηρεσίες της υπολογιστικής νέφος προσφέρονται από κέντρα δεδομένων, τα οποία βρίσκονται σε διάφορα μέρη ανά τον κόσμο, άροντας τον όποιο γεωγραφικό περιορισμό κατ' αυτόν τον τρόπο. Μερικά μόνο παραδείγματα υπηρεσιών, που υπάγονται στην υπολογιστική νέφος, είναι το Microsoft Sharepoint<sup>1</sup>, αλλά και πολλές εφαρμογές της Google με ανάλογες λειτουργίες (Alouffi et al., 2021).

Στα οφέλη των προαναφερθεισών τεχνολογιών συγκαταλέγονται και η ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, αλλά και η μείωση των εργασιών συντήρησης, οι οποίες αφορούν την υποδομή τεχνολογιών πληροφορικής (Keng-Boon et al., 2017). Ωστόσο, οι υπηρεσίες της υπολογιστικής νέφος, όπως και οι υπηρεσίες που προσφέρονται διαμέσου των τεχνολογιών ΙοΤ, οι οποίες αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, έρχονται μαζί με διαδικτυακούς κινδύνους, οι οποίοι δεν γίνεται να αποφευχθούν, παρά μόνο να εντοπιστούν, να μελετηθούν και να αντιμετωπιστούν. Οι προκλήσεις ασφαλείας, οι οποίες σχετίζονται με το υπολογιστικό νέφος, έχουν μελετηθεί ήδη ευρέως στη βιβλιογραφία και συνεχίζουν φυσικά να αποτελούν μείζον θέμα προς μελέτη και επίλυση (Alouffi et al., 2021).

Από πλευράς εφαρμογών, οι υπηρεσίες της υπολογιστικής νέφος έχουν υιοθετηθεί σε ένα ευρύ φάσμα από πεδία, τα οποία σχετίζονται με το ΙοΤ, μερικά εκ των οποίων είναι η επεξεργασία δεδομένων στην γονιδιωματική, η εκπαίδευση, η παροχή υπηρεσιών σε μικρομεσαίες

---

<sup>1</sup> <https://cutt.ly/wZXBIWX>, (08/08/2022).

επιχειρήσεις, η εξ αποστάσεως εκπαίδευση, οι επιχειρήσεις φιλοξενίας, η ηλεκτρονική διακυβέρνηση, η διαχείριση ανθρωπίνου δυναμικού, οι έξυπνες πόλεις, τα έξυπνα αυτοκίνητα, η βιομηχανία και άλλα πεδία (Sadeeq et al., 2021).

Ειδικά στη βιομηχανία, η ευελιξία, αλλά και οι πόροι, που προσφέρονται διαμέσου των τεχνολογιών της υπολογιστικής νέφους, ώθησαν τους κατασκευαστές να στραφούν προς αυτές και συνακόλουθα να επωφεληθούν από αυτές και επομένως να προάγουν τις διαδικασίες κατασκευής και να καινοτομήσουν στον κλάδο τους. Στην ουσία, διαμέσου του υπολογιστικού νέφους και των τεχνολογιών IoT, οι διαδικασίες παραγωγής, διαχείρισης και επίβλεψης μεταφέρθηκαν στο νέφος και, έτσι, αναδύθηκε η βιομηχανία νέφους (cloud manufacturing) (Keng-Boon et al., 2017).

Πιο αναλυτικά, στο πλαίσιο της βιομηχανίας νέφους αναδείχτηκε η ανάγκη για υψηλότερη εξατομίκευση των προϊόντων, ευρύτερη παγκόσμια συνεργασία, καινοτομία με γνώμονα την γνώση και αυξανόμενη ευελιξία ανταπόκρισης στην αγορά (Keng-Boon et al., 2017), ενώ διαμέσου αυτής παρέχεται στις επιχειρήσεις στον τομέα της βιομηχανίας πιο αποτελεσματική ανταλλαγή πληροφοριών, βελτιωμένη διαχείριση του κύκλου ζωής των προϊόντων, προηγμένη ακρίβεια προβλέψεων, μειωμένη επένδυση στις τεχνολογίες πληροφορικής, αυξημένη παραγωγή και γενικά ανταγωνιστικό πλεονέκτημα (Raut et al., 2019).

Βέβαια, πέρα από τις προκλήσεις ασφαλείας, η υπολογιστική νέφους, σε συνδυασμό με τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες IoT στο πλαίσιο αυτής, καλούνται να υπερκεράσουν ένα πλήθος από άλλες προκλήσεις ως προς την ποιότητα και αποτελεσματικότητα της λειτουργίας τους, μία εκ των οποίων είναι το γεγονός ότι οι εφαρμογές IoT, οι οποίες είναι συνδεδεμένες, καθώς και οι γεωκατανεμημένες εφαρμογές ζητούν από το νέφος άμεση απόκριση, ενώ παρατηρούνται ειδικά σε τέτοιες περιπτώσεις καθυστερήσεις στην απόκριση. Σε αυτού του είδους τους περιορισμούς του IoT και της υπολογιστικής νέφους έρχεται να δώσει λύση η υπολογιστική στα άκρα του δικτύου ή με άλλα λόγια η υπολογιστική παρυφής (edge computing) (Sadeeq et al., 2021).

### 1.4.3 Υπολογιστική στα άκρα του δικτύου ή υπολογιστική παρυφής

Με την ραγδαία ανάπτυξη του IoT, ο αριθμός των έξυπνων συσκευών, οι οποίες συνδέονται στο διαδίκτυο αυξάνεται άρδην, κάτι το οποίο συνεπάγεται την παραγωγή μιας υψηλής διάστασης δεδομένων, κάτι το οποίο σημειώθηκε και στην προηγούμενη ενότητα και αναδείχτηκε ως μια από τις προκλήσεις των νέων τεχνολογιών της Industry 4.0. Η έλευση των μεγάλων δεδομένων οδήγησε σε υπερφόρτωση των συστημάτων, σε αυξημένο χρόνο απόκρισης, σε ελλιπή ασφάλεια και ελλιπή ιδιωτικότητα στα συστήματα του υπολογιστικού νέφους. Η παραδοσιακή υπολογιστική νέφος καθίσταται σταδιακά παρωχημένη και δεν δύναται να αρκέσει ως προς την υποστήριξη των ποικίλων αναγκών της σημερινής κοινωνίας αναφορικά με την επεξεργασία των δεδομένων. Προς επίλυση του προαναφερθέντος ζητήματος αναπτύχθηκε η υπολογιστική παρυφής ή με άλλα λόγια η υπολογιστική στα άκρα του δικτύου (edge computing) (Cao et al., 2020).

Σε πολλές περιπτώσεις εφαρμογών, όπως είναι η παρακολούθηση της κυκλοφορίας αυτοκινήτων, απαιτείται άμεση απόκριση, δηλαδή απόκριση κοντά στην πραγματική στιγμή του συμβάντος (real-time feedback), ενώ σε άλλες περιπτώσεις, είναι αναγκαία η τήρηση της ιδιωτικότητας και η επιβεβαίωση της ασφάλειας των προσωπικών δεδομένων, όπως στα έξυπνα τηλέφωνα και γενικά σε εφαρμογές, οι οποίες για να λειτουργήσουν απαιτούν τη χρήση προσωπικών δεδομένων. Ένα άλλο ζήτημα αναφορικά με τον τρόπο λειτουργίας των έξυπνων συσκευών έγκειται στην επίτευξη της βέλτιστης κατανάλωσης ενέργειας κατά τη λειτουργία τους. Σε αυτό το σημείο έρχεται η τεχνολογία της υπολογιστικής παρυφής, ώστε να προσφέρει τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (έννοιας που θα αναλυθεί στην επόμενη ενότητα), καθιστώντας τις υπηρεσίες που προσφέρονται από τις έξυπνες συσκευές πιο σταθερές, πραγματοποιώντας πιο γρήγορη ανάλυση δεδομένων, η οποία γίνεται μάλιστα σε πραγματικό χρόνο (real-time) και με αυξημένη ασφάλεια, ενώ παράλληλα δύναται να προσφέρει μια λύση στο ζήτημα της υπερβολικής κατανάλωσης ενέργειας όσον αφορά στη χρήση του υπολογιστικού νέφους, μειώνοντας έτσι το κόστος και την πίεση στο εύρος ζώνης δικτύου (network bandwidth) (Cao et al., 2020; Chen & Ran, 2019).

Εξάλλου, δεν πρέπει να λησμονείται ότι οι IoT συσκευές έχουν περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων, οι οποίες με τη σειρά τους τις καθιστούν μη κατάλληλες για εργασίες, που χρήζουν υψηλής επεξεργαστικής δύναμης. Όπως διαφάνηκε ανωτέρω, οι ίδιες συσκευές IoT, χωρίς να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά τους, δύναται να αυξήσουν τις δυνατότητές τους,

αξιοποιώντας την υπολογιστική παρυφή, όπου χρησιμοποιούνται πόροι και διάφορες υπηρεσίες, οι οποίες προάγουν τη λειτουργία των IoT συσκευών, όπως υπολογιστικοί κόμβοι, διακομιστές, δρομολογητές και άλλα (Najmul et al., 2018).

Ειδικά στο πεδίο του IIoT, η υπολογιστική παρυφή προσφέρει και πάλι ένα ευρύ φάσμα από οφέλη, μερικά από τα οποία είναι η δυνατότητα ευελιξίας, επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο, καθώς και αυτονομίας για τη δημιουργία αξίας για ευφυείς παραγωγικές διαδικασίες. Οι εφαρμογές του IoT στον τομέα της βιομηχανίας απαιτούν την ύπαρξη χαρακτηριστικών όπως είναι η επίγνωση της τοποθεσίας (location awareness) και η χαμηλή καθυστέρηση (low latency) στην απόκριση. Η υπολογιστική παρυφή, η οποία υλοποιείται στην βιομηχανική υπολογιστική νέφος, και αφορά στις περιφερειακές συσκευές του IoT δικτύου, προσφέρει τη δυνατότητα στην επιχείρηση να υποστηρίξει τις προαναφερθείσες απαιτήσεις (Baotong et al., 2018). Οι έξυπνες συσκευές, που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της υπολογιστικής παρυφής, δύνανται να προεπεξεργάζονται, να συγκεντρώνουν και να αναλύουν αισθητηριακά δεδομένα πιο κοντά στις πηγές παραγωγής των δεδομένων, χρησιμοποιώντας τεχνικές, οι οποίες έγκεινται στην τεχνητή νοημοσύνη και στην μηχανική μάθηση (Nain et al., 2022), έννοιες οι οποίες μελετώνται στην επόμενη υποενότητα.

#### **1.4.4 Τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική και βαθιά μάθηση κατά την ευφυή ανάλυση μεγάλων δεδομένων**

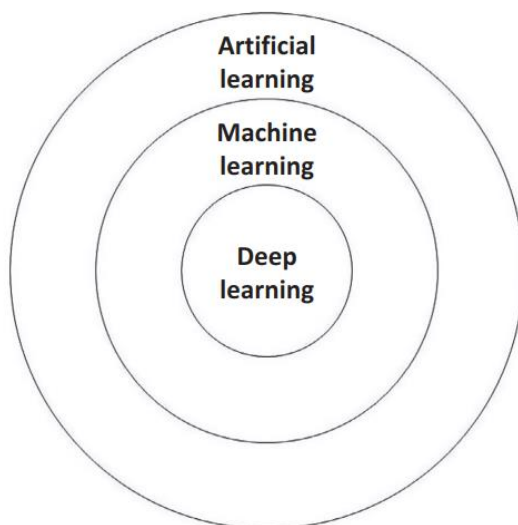
Στις μέρες μας, τα μεγάλα δεδομένα (big data) και τα εργαλεία της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence, AI) έχουν αναδειχθεί σε μία μείζονος σημασίας και αυξανόμενης αναγνωρισιμότητας τεχνολογία, η οποία ουσιαστικά αναδεικνύει τις πιο βαθιές επιπτώσεις των δεδομένων, ενώ επίσης ανακαλύπτει την αξία τους, προκειμένου να αναπτυχθούν εφαρμογές, οι οποίες να είναι έξυπνες, δηλαδή ευφυείς, αλλά και ικανές να ανταποκρίνονται στις ανάγκες κάθε φορά του χρήστη (Bashar, 2019).

Η ευφυής ανάλυση των μεγάλων δεδομένων (intelligent big data analysis) συνίσταται από πέντε διακριτά βήματα: ξεκινάει από την προμήθεια δεδομένων (data procuring), συνεχίζει στην προετοιμασία των δεδομένων (data preparation), μεταβαίνει στην ανάλυση δεδομένων (data analytics) και, εν συνεχεία, στην συλλογή πληροφοριών (insights gathering) και τέλος στην αποθήκευση στο σύννεφο (cloud storage) και την ανάγκη ύπαρξης της κατάλληλης υποδομής (infrastructure). Ειδικά κατά τη διαδικασία της παραγωγικής διαδικασίας στο πεδίο της

βιομηχανίας, η ευφυής ανάλυση των μεγάλων δεδομένων στην ουσία προάγει όχι μόνο την ίδια τη διαδικασία παραγωγής, αλλά επίσης αναβαθμίζει όλο το πεδίο της βιομηχανίας, διατηρεί την φήμη του και οδηγεί στην αποφυγή της σύγχυσης και της περικοπής της παραγωγής (Bashar, 2019).

Αναφορικά με το περιεχόμενό τους, σημειώνεται ότι η μηχανική μάθηση (machine learning, ML) αποτελεί ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης, ενώ ένα υποσύνολο της μηχανικής μάθησης έγκειται σε αυτό που ονομάζεται βαθιά μάθηση (deep learning, DL) (Jakhar & Kaur, 2020), δηλαδή η τεχνητή νοημοσύνη δύναται να εκληφθεί ως ένας όρος-ομπρέλα, όπως καθίσταται σαφές από το παρακάτω σχήμα.

**Σχήμα 1.3:** Η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση και η βαθιά μάθηση.



(Πηγή: Jakhar & Kaur 2020)

Η τεχνητή νοημοσύνη, σύμφωνα με τους Helm και συν. (2020), εμφανίστηκε στη δεκαετία του 1950 και, σύμφωνα με τους Jakhar και Kaur (2020), αφορά σε ένα επιμέρους πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών, το οποίο, με απλά λόγια, σχετίζεται με τη δημιουργία εργασιών, οι οποίες κανονικά θα απαιτούσαν την ύπαρξη ανθρώπινης σκέψης. Πιο αναλυτικά, η τεχνητή νοημοσύνη δύναται να περιγραφεί ως η ενσωμάτωση της ανθρώπινης νοημοσύνης στις μηχανές, όπου οι μηχανές κατά τη διάρκεια υλοποίησης συγκεκριμένων εργασιών καλούνται να τις ολοκληρώσουν στηριζόμενες σε σαφώς ορισμένους κανόνες και ακολουθώντας συγκεκριμένους αλγορίθμους. Η μηχανική μάθηση από την πλευρά της περιέχει όλες τις προσεγγίσεις, διαμέσου των οποίων δίνεται η δυνατότητα στις μηχανές να μαθαίνουν χωρίς να προγραμματίζονται ρητά



από τον άνθρωπο. Πιο συγκεκριμένα, ο σκοπός της μηχανικής μάθησης έγκειται στο να εκπαιδεύσει τις μηχανές βάσει δεδομένων και διαμέσου της χρήσης αλγορίθμων, ώστε οι τελευταίες να λαμβάνουν αποφάσεις, χρησιμοποιώντας τα επεξεργασμένα δεδομένα (Jakhar & Kaur, 2020).

Οι προγνωστικές ικανότητες της μηχανικής μάθησης εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο σε διάφορα επιστημονικά πεδία (Cioffi et al., 2020; Helm et al., 2020), μερικές μόνο από τις οποίες είναι η ιατρική, η γεωργία, η αρχαιολογία και η έξυπνη βιομηχανία (Cioffi et al., 2020). Ένα ακόμη βασικό χαρακτηριστικό της μηχανικής μάθησης είναι το γεγονός ότι είναι μια δυναμική και όχι στατική διαδικασία, κάτι το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι αυτή η διαδικασία μάθησης δύναται να τροποποιείται όταν εκτίθεται σε περισσότερα δεδομένα και άρα να καθίσταται σταδιακά πιο αποτελεσματική. Η βαθιά<sup>2</sup> μάθηση είναι, όπως σημειώθηκε, ένα υποσύνολο της μηχανικής μάθησης και το κύριο γνώρισμά της είναι ότι ενσωματώνει υπολογιστικά μοντέλα, τα οποία προσπαθούν να μιμηθούν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Ειδικότερα, οι αλγόριθμοι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη βαθιά μάθηση μιμούνται την αρχιτεκτονική των βιολογικών δικτύων νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου και, κατ' αντιστοιχία, ονομάζονται νευρωνικά δίκτυα (neural networks) (Jakhar & Kaur, 2020).

Οι Cioffi και συν. (2020) επεσήμαναν για ακόμα μια φορά ότι είναι αναγκαίο να υιοθετηθούν βιώσιμες μέθοδοι στον τομέα της βιομηχανίας, με τους ίδιους να τονίζουν ότι η πραγματοποιηθείσα έρευνα στο πεδίο της εφαρμογής μεθόδων μηχανικής μάθησης στον τομέα της βιομηχανίας έχει κάνει βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση, δηλαδή προς την επίτευξη βιώσιμης παραγωγής, η οποία συνάμα προάγει και την ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Οι νέες τεχνολογίες στο πλαίσιο της τεχνητής νοημοσύνης παράγουν νέα βιομηχανικά πρότυπα και συμβάλλουν σε πεδία της όπως είναι η βελτιστοποίηση των ενεργειακών πόρων, τα logistics, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας και η διαχείριση αποβλήτων, υιοθετώντας αυστηρότερες πολιτικές αναφορικά με την προστασία του περιβάλλοντος. Επίσης, τα έξυπνα εργοστάσια χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (Fahle et al., 2020), κάτι το οποίο μελετάται σε επόμενη υποενότητα.

---

<sup>2</sup> Η λέξη «βαθιά» στον όρο «βαθιά μάθηση» αφορά στον αριθμό των επιπέδων του νευρωνικού δικτύου (Jakhar & Kaur, 2020).

### 1.4.5 Κυβερνοασφάλεια

Η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο έγκειται σε μια από τις κύριες προκλήσεις για τις επιχειρήσεις, οι οποίες προσεγγίζουν το μοντέλο της Industry 4.0. (Corallo et al., 2020; Corallo et al., 2021; Lu & Da Xu, 2018). Πράγματι, όπως σημειώθηκε, οι υπηρεσίες της υπολογιστικής νέφους, όπως και οι υπηρεσίες που προσφέρονται διαμέσου των τεχνολογιών IoT, έρχονται μαζί με διαδικτυακούς κινδύνους για τις επιχειρήσεις, οι οποίες τις υιοθετούν (Alouffi et al., 2021). Όπως τονίζουν και οι Mullet και συν. (2021), η προκύπτουσα από την Industry 4.0 αυξημένη αυτοματοποίηση και η βελτιωμένη συνέργεια της παραγωγής μεταξύ αποθεμάτων, αλυσίδων εφοδιασμού και απαιτήσεων των πελατών, συνοδεύονται με αυξημένες διαδικτυακές απειλές και επιθέσεις. Σε αυτό το σημείο αναδύεται η έννοια της κυβερνοασφάλειας (cybersecurity), η οποία ουσιαστικά έχει σαν σκοπό της την προστασία από εξωτερικές επιθέσεις του υλικού (hardware), του λογισμικού (software) και των δεδομένων (data), που υπάρχουν σε ένα σύστημα με ενεργή σύνδεση στο διαδίκτυο (Dixit & Silakari, 2021).

Κατά τα προηγούμενα έτη, τα συστήματα παραγωγής ήταν κλειστά και η ασφάλεια ήταν εξασφαλισμένη λόγω της απομόνωσής τους, αφού υπεισέρχεται ο έλεγχος της φυσικής πρόσβασης σε αυτά (Corallo et al., 2020). Τουναντίον, σήμερα ελέω της Industry 4.0, οι σύγχρονες μηχανές παραγωγής είναι εξοπλισμένες με IoT συσκευές, οι οποίες, όπως διαπιστώθηκε ανωτέρω, συνδέονται τόσο μέσω ασύρματου δικτύου όσο και μέσω ενσύρματου Ethernet δικτύου με άλλες μηχανές και με συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, κάτι το οποίο δεν παρέχει επαρκή προστασία απέναντι σε διαδικτυακές απειλές (Corallo et al., 2020; Lu & Da Xu, 2018). Οι επιθέσεις αυτές θέτουν σε κίνδυνο την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα των επικοινωνούμενων δεδομένων, αλλά και τη διαθεσιμότητα των υπηρεσιών, οι οποίες παρέχονται από την υποκείμενη υποδομή (Mahdaviifar & Ghorbani, 2019).

Στις μέρες μας, ένας αυξανόμενος αριθμός παραβιάσεων της κυβερνοασφάλειας επιδρά αρνητικά στην απόδοση των σύγχρονων επιχειρήσεων στον τομέα της βιομηχανίας, εκμεταλλευόμενος τα τρωτά σημεία των συνδεδεμένων μηχανών παραγωγής στο διαδίκτυο (Corallo et al., 2020). Οι επιθέσεις αυτές συχνά συνδέονται με οικονομικές κλοπές αλλά και με κλοπές πνευματικής ιδιοκτησίας (Priyanka et al., 2020). Μάλιστα, πολλές φορές, όταν οι επιθέσεις γίνονται σε κρίσιμο εταιρικό εξοπλισμό, τότε υπονομεύεται ολόκληρη η επιχείρηση (Corallo et al., 2020; Lezzi et al., 2018). Οπότε, κρίνεται αναγκαία η γνώση και η αξιολόγηση των κύριων και

κρίσιμων εταιρικών περιουσιακών στοιχείων, τα οποία και πρέπει να προστατευτούν από πιθανές διαδικτυακές επιθέσεις, ώστε να μην υπονομευτεί το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα της επιχείρησης στην αγορά (Corallo et al., 2020), αφού σύμφωνα με τους Lezzi και συν. (2018), η κυβερνοασφάλεια διαδραματίζει μείζονα ρόλο στην πρόληψη της απώλειας της ανταγωνιστικότητας των επιχειρήσεων. Τα δε κίνητρα του επιτιθέμενου, οι διαθέσιμοι πόροι και η ζημία, η οποία τελικά προκαλείται σε κάθε κατηγορία δύναται να διαφέρει κάθε φορά και κρίνεται αναγκαίο οι παράγοντες αυτοί να αποτελούν μέρος της ανάλυσης της απειλής (Priyanka et al., 2020).

Προς τούτο, παράγονται πολλά αντι-υικά (anti-virus) προϊόντα από μεγάλες εταιρίες όπως είναι η Kaspersky<sup>3</sup>, η Microsoft<sup>4</sup>, η McAfee<sup>5</sup> και πολλές άλλες, με σκοπό την προστασία των υπολογιστών και των νόμιμων χρηστών τους από διαδικτυακές κακόβουλες επιθέσεις. Πέρα από τα προαναφερθέντα προστατευτικά αντι-υικά λογισμικά, με την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι αλγόριθμοι DL διαδραματίζουν σήμερα έναν μείζονος σημασίας ρόλο στην επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων διαδικτυακής ασφάλειας και αυτό συμβαίνει χάρη στο μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων τους εν συγκρίσει με άλλους παραδοσιακούς ML αλγορίθμους. Ειδικότερα, οι τεχνολογίες DL χρησιμοποιούν εφαρμογές αναγνώρισης εικόνων, αναγνώρισης ομιλίας και άλλες προηγμένες μεθόδους διασφάλισης της ασφάλειας των συσκευών (MahdaviFar & Ghorbani, 2019).

Αναφορικά με την υπερκέρση ζητημάτων διακύβευσης της κυβερνοασφάλειας των επιχειρήσεων στον τομέα της βιομηχανίας, προτάσσεται πέρα από την αγορά πακέτων ή προϊόντων κυβερνοασφάλειας, όπως αυτά περιγράφηκαν ανωτέρω, είναι απαραίτητο να παρέχεται επιπροσθέτως επαρκής εκπαίδευση του προσωπικού για τέτοια ζητήματα, βέλτιστη απόκριση σε περιπτώσεις παραβίασης, παρακολούθηση και ανίχνευση διαδικτυακών απειλών, διαχείριση του συγκεκριμένου κινδύνου και παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών από εγκεκριμένες εταιρίες στον τομέα της κυβερνοασφάλειας (Lezzi et al., 2018). Άλλα επιμέρους μέτρα πρόληψης διαδικτυακών επιθέσεων είναι ο έλεγχος πρόσβασης (access control), η κρυπτογράφηση (encryption), δηλαδή η διαδικασία κωδικοποίησης ενός μηνύματος με τρόπο ώστε μόνο εξουσιοδοτημένα μέρη να δύνανται να έχουν πρόσβαση σε αυτό, η ταυτοποίηση δηλαδή ο έλεγχος ταυτότητας

---

<sup>3</sup> <https://cutt.ly/8ZX8y3o>, (08/08/2022).

<sup>4</sup> <https://cutt.ly/zZX8d0T>, (08/08/2022).

<sup>5</sup> <https://cutt.ly/zZX8cob>, (08/08/2022).

(authentication) και η ανίχνευση εισβολής (intrusion detection) (Corallo et al., 2021; Wu et al., 2018).

#### **1.4.6 Ψηφιακό δίδυμο**

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις στο χώρο της βιομηχανίας δεν δύνανται να αξιοποιήσουν πλήρως τους πόρους του εργοστασίου (Tu et al., 2022). Ειδικότερα, στις μέρες μας, απαιτείται ένας αυξανόμενος αριθμός εξατομικευμένων (customized) προϊόντων, ο οποίος δεν καθίσταται εφικτός λόγω των περιορισμένων ικανοτήτων των παραδοσιακών μεθόδων κατασκευής στον βιομηχανικό τομέα (Zhang et al., 2020).

Ωστόσο, επισημαίνεται ότι με την πρόοδο των συστημάτων συλλογής δεδομένων, της τεχνολογίας πληροφοριών και των τεχνολογιών δικτύων, η βιομηχανία έχει εισέλθει αναμφίβολα στην ψηφιακή εποχή, υπερκερώντας τα εμπόδια, τα οποία θέτονται πλέον από την παραδοσιακή βιομηχανική προσέγγιση (Tao et al., 2019). Η προσθετική βιομηχανία (Additive Manufacturing, AM) διαδραμάτισε μείζονα ρόλο στο πλαίσιο της Industry 4.0, αλλά ακόμα και στις μέρες μας συνεχίζει να πραγματοποιείται διαμέσου της μεθόδου δοκιμής και λάθους (trial and error), όπου γίνονται πολλές κατασκευές προτού επιτευχθεί η βέλτιστη κατασκευή, κάτι το οποίο συνεπάγεται, όπως είναι λογικό, αυξημένη σπατάλη πόρων, υλικών, χρόνου κλπ. Το ψηφιακό δίδυμο (digital twin) αφορά σε έναν νέο τρόπο υπερκέρασης πολλών εκ των προβλημάτων της AM, καθώς, όπως εξετάζεται αναλυτικότερα παρακάτω, γίνονται πλέον εφικτές η προσομοίωση των διαδικασιών, η παρακολούθηση των διαδικασιών, αλλά και ο έλεγχος σε κάθε φάση της διαδικασίας, ενώ παράλληλα η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου δύναται να συμβάλει στην εις βάθος κατανόηση των διαφόρων παραμέτρων της κατασκευής, αλλά και της ευαισθησίας των εν λόγω παραμέτρων στην τελική ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος, παρέχοντας ουσιώδη ανατροφοδότηση για την διαδικασία κατασκευής (Zhang et al., 2020).

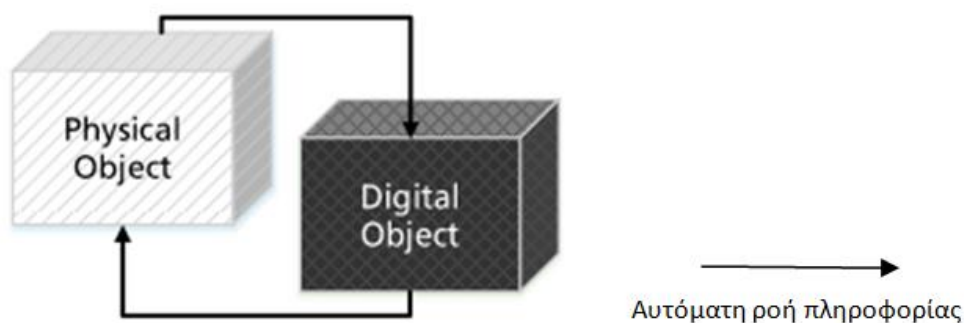
Αξίζει, επομένως, να σημειωθεί ότι η έξυπνη βιομηχανία έχει γίνει μια αναπόφευκτη τάση και η επίτευξη της αλληλεπίδρασης και συγκεκριμένα της ολοκλήρωσης του ψηφιακού και του φυσικού κόσμου της επιχείρησης έγκειται σε μείζονος σημασίας προϋπόθεση σε κάθε έξυπνη κατασκευή. Στο πλαίσιο της ψηφιοποίησης, η βιομηχανία αντιμετωπίζει παγκόσμιες προκλήσεις με την ταχεία πρόοδο των ψηφιακών τεχνολογιών. Υπό αυτά τα γεγονότα και ελέω της Industry 4.0, ανεπτυγμένες βιομηχανικές στρατηγικές αναπτύχθηκαν σταδιακά· με τα ψηφιακά δίδυμα να κατέχουν μια κεντρική θέση στην έξυπνη βιομηχανία (Tao et al., 2019). Πιο αναλυτικά, στο

πλαίσιο των επιταγών της Industry 4.0, σημειώνεται ότι η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων αφορά σε μια αναδυόμενη έννοια και συνάμα πεδίο, το οποίο έχει αναδειχθεί στις μέρες μας σε ένα επίκεντρο της προσοχής τόσο στην ίδια την βιομηχανία όσο και στην ακαδημαϊκή κοινότητα (Kritzinger et al. 2018; Fuller et al., 2020).

Πράγματι, δεδομένου ότι τα ψηφιακά δίδυμα ανοίγουν έναν νέο δρόμο για τον συγχρονισμό των φυσικών δραστηριοτήτων μιας επιχείρησης με τον εικονικό κόσμο, τα τελευταία έχουν αναχθεί σε ένα ιδιαίτερα δημοφιλές θέμα επιστημονικής έρευνας (Tao et al., 2019). Ειδικότερα, σύμφωνα με τους Stark και συν. (2019), τα ψηφιακά δίδυμα αφορούν σε καινοτόμες λύσεις στο χώρο των επιχειρήσεων, οι οποίες δίνουν στις τελευταίες τη δυνατότητα να παρακολουθούν συνεχώς με ψηφιακό τρόπο τα διασυνδεδεμένα προϊόντα, τις διασυνδεδεμένες συσκευές και τις διασυνδεδεμένες μηχανές τους, αλλά και να προβαίνουν σε ενεργή λειτουργική τους βελτίωση (Stark et al., 2019).

Από κατασκευαστικής πλευράς και με απλά λόγια, το ψηφιακό δίδυμο δύναται να περιγραφεί ως η χωρίς κόπο ενσωμάτωση δεδομένων ανάμεσα σε μια φυσικής υπόστασης μηχανή, δηλαδή φυσικό αντικείμενο (physical object) και σε μια εικονική μηχανή, δηλαδή ένα ψηφιακό αντικείμενο (digital object), η οποία επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία τους, δηλαδή την προς δύο κατευθύνσεις ανταλλαγή, δηλαδή ροή πληροφορίας, η οποία μάλιστα πραγματοποιείται κατ' αυτόματο τρόπο και όχι χειροκίνητο τρόπο (Σχήμα 1.4) (Kritzinger et al. 2018; Fuller et al., 2020).

**Σχήμα 1.4:** Ροή πληροφορίας σε ένα ψηφιακό δίδυμο.



(Πηγή: Kritzinger et al. 2018)

Συχνά αναφέρεται από τους ερευνητές ότι το ψηφιακό δίδυμο βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της επανάστασης, την οποία έχει επιφέρει η Industry 4.0 και, από λειτουργικής πλευράς, διευκολύνει κατά πολύ σημαντικό βαθμό την λειτουργία της επιχείρησης. Το τελευταίο όφελος των επιχειρήσεων από τη χρήση των ψηφιακών διδύμων απορρέει από την προηγμένη ανάλυση δεδομένων, η οποία είναι πλέον εφικτή διαμέσου των IoT συσκευών τους, οι οποίες συνδέονται στο διαδίκτυο. Μάλιστα, η χρήση των τεχνολογιών IoT μέσω των ψηφιακών διδύμων έχει εφαρμοστεί ήδη στη βιομηχανία, στην ιατρική και στα έξυπνα περιβάλλοντα πόλεων. Ειδικά όσον αφορά στο ψηφιακό δίδυμο, αυτό δύναται να διαμορφώσει ένα κατάλληλο περιβάλλον, με τον τρόπο που σημειώθηκε ανωτέρω· δηλαδή διαμέσου της σύνδεσης μιας φυσικής και μιας ψηφιακής μηχανής, ώστε να δίνεται στην επιχείρηση η δυνατότητα να αναλύει ταχύτατα τα δεδομένα κοντά μάλιστα σε πραγματικό χρόνο και, επομένως, να λαμβάνει ακριβείς αναλύσεις και άρα να προβαίνει στις βέλτιστες δυνατές αποφάσεις (Fuller et al., 2020). Επιπροσθέτως, η εισαγωγή των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας έχει επιφέρει και πλεονεκτήματα οριζόντιας και κάθετης ολοκλήρωσης (Stark et al., 2019).

## **1.5 Χαρακτηριστικά ενός έξυπνου εργοστασίου**

Οι εταιρίες του βιομηχανικού τομέα έχουν έρθει αντιμέτωπες με πολύπλευρες προκλήσεις, στις μέρες μας, οι οποίες προκαλούνται λόγω των τάχιστων τεχνολογικών αλλαγών, δηλαδή στους σύντομους κύκλους ζωής των προϊόντων, στην ευμετάβλητη ζήτηση από την πλευρά των καταναλωτών και την ανάγκη για εξατομικευμένα (customized) προϊόντα (Mabkhot et al., 2018). Εξάλλου, δεν πρέπει να λησμονείται ότι οι εφαρμογές στο πλαίσιο της παραδοσιακής παραγωγής είναι τελείως αυτόνομες και διαχωρισμένες μεταξύ τους, μη διαθέτοντας δυνατότητες αυτοματοποιημένης παρακολούθησης και ελέγχου, ενώ δεν είναι λίγες οι επιχειρήσεις του βιομηχανικού τομέα, οι οποίες συνεχίζουν να μην έχουν την αναγκαία γνώση των προκλήσεων της παραδοσιακής παραγωγικής διαδικασίας, αλλά και να μην γνωρίζουν τους πόρους που τελικά χρειάζονται προκειμένου να μεταβούν σε αυτό το οποίο εκλαμβάνεται σήμερα ως έξυπνο εργοστάσιο (smart factory) (Kalsoom et al., 2020; Shi et al., 2020). Με την έλευση της IIoT, η παραδοσιακή αρχιτεκτονική των συστημάτων παραγωγής καθίσταται παρωχημένη και μη κατάλληλη (Wan et al., 2019).

Αναφορικά τώρα με την έννοια του έξυπνου εργοστασίου, οι Radziwon και συν. (2014) επισημαίνουν ότι ο συγκεκριμένος όρος χρησιμοποιείται τόσο από επαγγελματίες του χώρου της βιομηχανίας όσο και από μέλη της επιστημονικής κοινότητας, χωρίς να έχει διαμορφωθεί ένας ενιαίος και κοινά αποδεκτός ορισμός. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με τους ίδιους, το έξυπνο εργοστάσιο αφορά σε μια κατασκευαστική λύση, η οποία δίνει τη δυνατότητα σε νέες ευέλικτες και προσαρμοστικές διαδικασίες παραγωγής, που προσφέρουν αποτελεσματική λύση σε ζητήματα, τα οποία ανακύπτουν σε μια παραγωγική διαδικασία, λειτουργώντας σε μεταβαλλόμενες και συχνά οριακές συνθήκες και μάλιστα εντός ενός επιχειρηματικού κόσμου αυξανόμενης πολυπλοκότητας. Οι λύσεις, οι οποίες προσφέρονται από ένα έξυπνο εργοστάσιο, εδράζονται τόσο στην αυτοματοποίηση, η οποία με τη σειρά της οδηγεί στη βελτιστοποίηση της παραγωγής, αλλά και στην συνεργασία μεταξύ εταιρών τόσο εντός όσο και εκτός του βιομηχανικού τομέα με δυναμικό και έξυπνο τρόπο (Radziwon et al., 2014), ενώ επίσης παρέχει μεθόδους, οι οποίες συμβάλλουν στην προβλεπτική συντήρηση (predictive maintenance), η οποία καθίσταται εφικτή διαμέσου έξυπνων αισθητήρων (Pech et al., 2021).

Η συντήρηση αφορά σε ένα μείζονος σημασίας ζήτημα για τις επιχειρήσεις και αυτό συμβαίνει διότι διαμέσου της εφαρμογής των κατάλληλων τεχνικών συντήρησης, κάθε επιχείρηση δύναται να ωφεληθεί στο μέγιστο βαθμό. Η προβλεπτική συντήρηση αποτελεί μία αναδυόμενη προσέγγιση για τον εξοπλισμό συντήρησης, δίνοντας στους χρήστες τη δυνατότητα να αποκομίσουν τα οφέλη της μείωσης του κόστους συντήρησης, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τον χρόνο διακοπής λειτουργίας. Οι τεχνικές στο πλαίσιο της προβλεπτικής συντήρησης εφαρμόζονται διαμέσου της χρήσης μια πληθώρας από τεχνολογίες, όπως είναι οι IoT τεχνολογίες, η υπολογιστική νέφος, η προηγμένη ανάλυση δεδομένων και η επαυξημένη πραγματικότητα, από τις οποίες κάθε εταιρεία μπορεί να επιλέξει ανάλογα με τις ανάγκες της, ενώ επίσης οι προαναφερθείσες τεχνολογίες δύνανται να συνδυαστούν με πληροφοριακά συστήματα για τη βελτίωση των επιχειρηματικών διαδικασιών συντήρησης εξοπλισμού (Gayialis et al., 2022b).

Με την έλευση και την ανάπτυξη της Industry 4.0 και με την εμφάνιση της έννοιας του έξυπνου εργοστασίου, το οποίο συχνά καλείται και ψηφιακό (digital) εργοστάσιο, πραγματοποιείται μια αλλαγή αναφορικά με την παραδοσιακή φιλοσοφία των συστημάτων παραγωγής των σημερινών εργοστασίων. Πιο αναλυτικά, όπως κατέστη σαφές και από την ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου, το έξυπνο εργοστάσιο φέρνει για πρώτη φορά αλλαγές στους παράγοντες, αλλά και στα επιμέρους στοιχεία των παραδοσιακών συστημάτων παραγωγής και,

ειδικότερα, ενσωματώνει τις σύγχρονες απαιτήσεις των έξυπνων IoT συστημάτων έτσι ώστε να μπορέσουν να ανταποκριθούν στις σημερινές απαιτήσεις ανταγωνισμού (Mabkhot et al., 2018; Osterrieder et al., 2019).

Εξάλλου, είναι γεγονός ότι ήδη στις μέρες μας έχουν διεξαχθεί ένα ευρύ φάσμα από επιστημονικές έρευνες τόσο στον ακαδημαϊκό όσο και στον βιομηχανικό χώρο σχετικά με τη μετάβαση της έννοιας τους έξυπνου εργοστασίου από τη θεωρία στη πράξη, ενώ η τάση διεξαγωγής σχετικής έρευνας είναι ακόμη αυξανόμενη. Εντός αυτής της νέας λοιπόν πραγματικότητας, το σύγχρονο εργοστάσιο καλείται να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά τις IoT τεχνολογίες, το υπολογιστικό νέφος, τον παγκόσμιο ιστό, αλλά και να αξιοποιήσει τα υψηλής διάστασης δεδομένα (Büchi et al. 2020; Mabkhot et al., 2018). Όμως, πολλές από τις τεχνολογίες αυτές εξακολουθούσαν οκτώ έτη πριν, σύμφωνα με τους Radziwon και συν. (2014), να είναι απλώς ένα όραμα του μέλλοντος, το οποίο σύμφωνα με τους ίδιους, χρειάζεται ακόμη πολλή προσπάθεια για να γίνει πραγματικότητα, ενώ ακόμη και σήμερα, μια δεκαετία σχεδόν μετά και παρόλη την ύπαρξη του αυξανόμενου ενδιαφέροντος των ακαδημαϊκών και των επαγγελματιών του τομέα της βιομηχανίας, σημειώνεται ότι το ερευνητικό πεδίο γύρω από το Industry 4.0 είναι ακόμα και σήμερα σπασμωδικό και κατακερματισμένο και αυτό συμβαίνει κυρίως διότι το θέμα προσεγγίζεται από διάφορες πλευρές (Osterrieder et al., 2019) και δεν έχει βρεθεί ακόμα ενιαία προσέγγιση στις επιμέρους έννοιες (Radziwon et al., 2014).

Στο επόμενο κεφάλαιο μελετώνται τα ψηφιακά δίδυμα, οι τομείς εφαρμογής τους και η σημασία τους στη βιομηχανία, τόσο για την προσομοίωση μηχανημάτων και περιουσιακών στοιχείων όσο και για την προσομοίωση γραμμών παραγωγής.

## **1.6 Κριτική σύνοψη κεφαλαίου**

Το βασικό χαρακτηριστικό των βιομηχανικών επαναστάσεων, από το 1960 μέχρι και τις μέρες μας, είναι το στοιχείο της αλλαγής, που πραγματοποιείται στον τομέα της βιομηχανίας, και η ευρύτερη επιρροή στην κοινωνία και κατά κύριο λόγο στις συνθήκες διαβίωσης εντός αυτής, καθώς και στην οικονομία. Η Industry 4.0, η οποία εμφανίστηκε περίπου κατά το έτος 2011, συνδέθηκε με την έννοια του ψηφιακού μετασχηματισμού, του αυτοματισμού και της ανταλλαγής



δεδομένων στη βιομηχανία και τη διάχυση αυτών των αλλαγών στην κοινωνία, προάγοντας τις συνθήκες διαβίωσης εντός αυτής.

Η Industry 4.0, εν αντιθέσει με τις προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις, δεν αποτέλεσε κάτι το ανατρεπτικό, αλλά ήταν το αποτέλεσμα μιας εξελικτικής πορείας, λόγω όμως της σημασίας των αλλαγών, που αυτή επέφερε στη βιομηχανία και στην κοινωνία, χαρακτηρίστηκε και η ίδια υπό τον όρο της επανάστασης. Δύο στοιχεία της σύγχρονης κοινωνίας, τα οποία καλείται να διαχειριστεί και να αξιοποιήσει η Industry 4.0, είναι η πληθώρα της πληροφορίας, η οποία είναι σήμερα διαθέσιμη διαρκώς, και το ζήτημα του κόστους, το οποίο είναι αναγκαίο να ελαχιστοποιηθεί.

Οι αλλαγές, τις οποίες επιτάσσει η Industry 4.0 στο βιομηχανικό τομέα, απαιτούν ριζικές τομές και συγκλίνουν σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία, εν αντιθέσει με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής, τα οποία συνοδεύονταν με σημαντικές οικολογικές επιπτώσεις, με τον συνακόλουθο φυσικά κοινωνικό αντίκτυπο. Πιο αναλυτικά, οι τεχνολογίες της Industry 4.0 στοχεύουν σε αυξημένη αποτελεσματικότητα και ανταγωνιστικότητα, καινοτομία και αποδοτικότητα, αλλά και συνάμα σε μία κοινωνική και περιβαλλοντική βιώσιμη ανάπτυξη. Προκειμένου όλα αυτά να γίνουν εφικτά, οι σύγχρονες βιομηχανικές επιχειρήσεις καλούνται να αλλάξουν τα επιχειρηματικά τους μοντέλα, να τα αναδιαμορφώσουν κατάλληλα και να εφαρμόσουν καινοτόμες ψηφιακές λύσεις, κάτι το οποίο φυσικά και αποτελεί πρόκληση, ειδικά για τις χώρες εκείνες, οι οποίες βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης, εφόσον μια τέτοια αλλαγή στον τρόπο λειτουργίας μιας επιχείρησης συνοδεύεται με την ανάλογη επένδυση.

Η ίδια η επιχείρηση, στο εσωτερικό της, οφείλει να επιδείξει ευελιξία, αποτελεσματικότητα και ικανότητα συνεχούς μείωσης του λειτουργικού της κόστους. Ως προς την ετοιμότητα των επιχειρήσεων, ώστε οι τελευταίες να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της Industry 4.0, δεν υπάρχει σαφής εικόνα. Υπάρχουν απτά εμπόδια, τα οποία πρέπει να υπερκεραστούν, ειδικά από την πλευρά των μικρομεσαίων επιχειρήσεων, καθώς τις περισσότερες φορές οι μεγάλες εταιρίες είναι εκείνες, που εν τέλει καταφέρνουν να εφαρμόσουν στην πράξη τις τεχνολογίες της Industry 4.0.

Στο πλαίσιο της Industry 4.0 κάνουν την εμφάνισή τους ουσιαστικά τα έξυπνα εργοστάσια, τα οποία λύνουν τα σημαντικότερα από τα προβλήματα των παραδοσιακών εργοστασίων, στηριζόμενα στην παρατήρηση ότι, πλέον, η παραδοσιακή αρχιτεκτονική των συστημάτων

παραγωγής καθίσταται παρωχημένη και μη κατάλληλη. Τα έξυπνα εργοστάσια στηρίζονται κατά κύριο λόγο στο IIoT και δίνουν τη δυνατότητα σε νέες ευέλικτες και προσαρμοστικές διαδικασίες παραγωγής, που προσφέρουν αποτελεσματική λύση σε ζητήματα, τα οποία ανακύπτουν σε μια παραγωγική διαδικασία, λειτουργώντας σε μεταβαλλόμενες και συχνά οριακές συνθήκες και, μάλιστα, εντός ενός επιχειρηματικού κόσμου αυξανόμενης πολυπλοκότητας. Το IIoT αφορά στην ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση της βιομηχανικής παραγωγής, κάτι το οποίο οδηγεί με τη σειρά του στον μετασχηματισμό της παραδοσιακής βιομηχανίας, συμβάλλοντας στη διαχείριση της αβεβαιότητας και του ρίσκου, στην παρακολούθηση των προϊόντων, καθώς και η πρόβλεψη όπου αυτή είναι αναγκαία.

Μια επιπρόσθετη τεχνολογία, η οποία ήλθε διαμέσου της Industry 4.0 στον τομέα της βιομηχανίας, είναι το υπολογιστικό νέφος, το οποίο αφορά στην προσθήκη υπηρεσιών αποθήκευσης στους χρήστες, οι οποίοι μπορούν να βρίσκονται είτε στα φυσικά τους συστήματα είτε σε διάφορα μέρη ανά τον κόσμο, κάτι το οποίο με τη σειρά του συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, αλλά και στη μείωση των εργασιών συντήρησης της υποδομής τεχνολογιών πληροφορικής. Μέσα από τη χρήση του IIoT και του υπολογιστικού νέφους στον τομέα της βιομηχανίας, οι διαδικασίες παραγωγής, διαχείρισης και επίβλεψης μεταφέρθηκαν στο νέφος και, έτσι, αναδύθηκε η βιομηχανία νέφους. Μάλιστα, σε περιπτώσεις όπου η υπολογιστική νέφος καθίσταται παρωχημένη, όπως όταν απαιτείται η επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τότε χρησιμοποιείται η υπολογιστική στα άκρα του δικτύου, ενώ η ίδια τεχνολογία δύναται να αυξήσει τις δυνατότητες των IoT συσκευών, που ήδη χρησιμοποιούνται στις βιομηχανικές επιχειρήσεις.

Οι συσκευές, οι οποίες λειτουργούν βάσει της υπολογιστικής στα άκρα του δικτύου, χρησιμοποιούν τεχνικές AI και ML προκειμένου να αναλύσουν τα δεδομένα, τα οποία συλλέγονται από τους διάφορους αισθητήρες. Μέσα από τη χρήση των αλγορίθμων ML γίνεται εφικτή η διεξαγωγή προβλέψεων, μέσα από μια δυναμική διαδικασία. Όλες οι ανωτέρω τεχνολογίες, οι οποίες έγιναν διαθέσιμες στον βιομηχανικό τομέα, διαμέσου της Industry 4.0, έρχονται μαζί με τους διαδικτυακούς κινδύνους.

Μία ακόμη τεχνολογία, η οποία έγινε διαθέσιμη στον τομέα της βιομηχανίας, είναι εκείνη του ψηφιακού διδύμου, η οποία έρχεται να υπερκεράσει τους περιορισμούς της προσθετικής βιομηχανίας. Το ψηφιακό δίδυμο αποτελεί έναν νέο τρόπο προσέγγισης στον χώρο της

βιομηχανίας, όπου αξιοποιούνται όλα τα δεδομένα, τα οποία μπορούν να συλλεγούν από τον χώρο του (έξυπνου) εργοστασίου και στην ουσία τα ψηφιακά δίδυμα ανοίγουν έναν νέο δρόμο για το συγχρονισμό των φυσικών δραστηριοτήτων μιας επιχείρησης με τον εικονικό κόσμο. Βέβαια, δεν πρέπει να λησμονηθεί ότι η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο έγκειται σε μια από τις κύριες προκλήσεις για τις επιχειρήσεις, οι οποίες προσεγγίζουν το μοντέλο της Industry 4.0.

## **2 ΤΑ ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΚΑΙ Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στα ψηφιακά δίδυμα. Προσδιορίζονται εννοιολογικά, γίνεται μνεία των κυριότερων εφαρμογών τους, εστιάζοντας στα ψηφιακά δίδυμα στον τομέα της βιομηχανίας και συγκεκριμένα στην προσομοίωση μηχανημάτων, περιουσιακών στοιχείων και γραμμών παραγωγής. Αναλύονται τα οφέλη τους, γενικά και στον τομέα της βιομηχανίας, αλλά και οι προκλήσεις, οι οποίες είναι συνυφασμένες με τη χρήση τους.

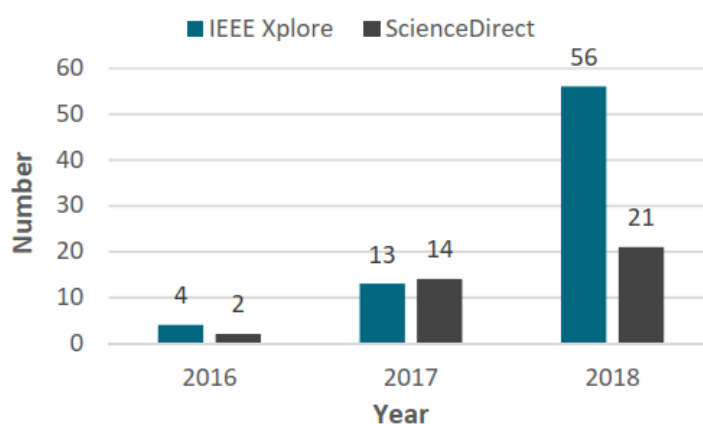
### **2.2 Εννοιολογική προσέγγιση, αξία και λειτουργία των ψηφιακών διδύμων – Διαφοροποίηση από τις ΙοΤ συσκευές**

Το ψηφιακό δίδυμο αφορά σε έναν μείζονος σημασίας όρο, ο οποίος χρησιμοποιείται κατά κόρον στα πλαίσια της ψηφιοποίησης, που εισήχθη μέσω της Industry 4.0, αλλά ωστόσο με τον προαναφερθέντα όρο, υπάρχει σύγχυση και ο καθένας κατανοεί κάτι διαφορετικό όταν γίνεται μνεία σε αυτόν (Biesinger & Weyrich, 2019). Σημειώνεται ότι τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins, DT) αφορούν, με απλά λόγια, σε αναπαραστάσεις φυσικών συστημάτων στον ψηφιακό κόσμο. Πιο αναλυτικά, για τη δημιουργία τους, είναι απαραίτητο να αξιοποιηθούν ένα ευρύ φάσμα από τεχνολογίες, αλλά και δεδομένα, τα οποία με τη σειρά τους παρέχονται από αισθητήρες. Διαμέσου των ψηφιακών διδύμων καθίσταται εφικτή η παροχή μιας πληθώρας υπηρεσιών, οι οποίες αφορούν σε λειτουργίες όπως είναι η παρακολούθηση, η προσομοίωση και η πρόβλεψη για διάφορα σενάρια, δηλαδή περιπτώσεις λειτουργίας (Grieves & Vickers, 2016).

Όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω, παρά το γεγονός ότι υπάρχει ήδη στις μέρες μας μια αρκετά εκτεταμένη αρθρογραφία και σχετική βιβλιογραφία αναφορικά με τα ψηφιακά δίδυμα (Fuller et al., 2020), εντούτοις εκλείπει ένας ενιαίος και κοινά αποδεκτός ορισμός για αυτά (Deren et al., 2021; Grieves & Vickers, 2016; Jones et al., 2020), κάτι το οποίο προκαλεί σύγχυση σχετικά με τον όρο (Biesinger & Weyrich, 2019). Χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Biesinger και Weyrich

(2019) ότι στις βάσεις δεδομένων IEEE Xplore και ScienceDirect οι επιστημονικές έρευνες σχετικά τον όρο του ψηφιακού διδύμου αυξάνονται γοργά σε αριθμό, ενώ οι Kaznah και συν. (2021) επισημαίνουν ότι το ίδιο παρατηρείται και στις βάσεις δεδομένων Google Scholar, Scopus και Elsevier. Συνοπτικά αναπαρίστανται στο επόμενο σχήμα ο αριθμός (Number) των δημοσιεύσεων, που περιέχουν τον όρο «*digital twin*» στον τίτλο τους στις δύο προαναφερθείσες βάσεις δεδομένων για τα έτη (Year) 2016, 2017 και 2018 (Biesinger & Weyrich, 2019).

**Σχήμα 2.1:** Αριθμός δημοσιεύσεων με τον όρο «*digital twin*» στον τίτλο, στις βάσεις δεδομένων IEEE Xplore και ScienceDirect.



(Πηγή: Biesinger & Weyrich, 2019)

Ωστόσο, η προαναφερθείσα έλλειψη συνέπειας κατά την εννοιολογική προσέγγιση ενός ψηφιακού διδύμου είχε σαν συνέπεια να διαμορφωθούν μια πληθώρα από εναλλακτικούς ορισμούς και χαρακτηρισμούς για το ψηφιακό δίδυμο, κάτι το οποίο οδηγεί σε ενδεχόμενα αποδυνάμωσης της υπό εξέταση έννοιας και απώλειας πολλών εκ των πλεονεκτημάτων της, για τα οποία στην αρχή σχεδιάστηκε να προσφέρει (Jones et al., 2020). Ακόμη, ο ευρύς αριθμός επιστημονικών ερευνών αναφορικά με την υπό εξέταση έννοια, έχει σαν αποτέλεσμα να έχουν αναπτυχθεί πολλές πτυχές αυτής σε διάφορους τομείς, ένας εκ των οποίων είναι και η παραγωγή στον ευρύτερο τομέα της βιομηχανίας (Biesinger & Weyrich, 2019).

Τα ψηφιακά δίδυμα ως έννοια εντοπίζονται ήδη από το 2002 με τον Grieves να παρουσιάζει την έννοια κατά το 2003 στο πλαίσιο μιας ομιλίας του, αλλά κατά το έτος 2010 πραγματοποιήθηκε η πρώτη υλοποίηση ενός ψηφιακού διδύμου από τη NASA, στο πλαίσιο του

προγράμματος Apollo (Liu et al., 2020), αφού τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στην αεροδιαστημική βιομηχανία (Kaznah et al., 2021). Πιο αναλυτικά, η NASA προέβη στην κατασκευή δύο ίδιων καθ' όλα διαστημικών αεροσκαφών, με σκοπό την προσομοίωση και τον αντικατοπτρισμό της λειτουργίας του πραγματικού διαστημικού αεροσκάφους κατά τη διάρκεια ολόκληρης της αποστολής (Jones et al., 2020; Mylonas et al., 2021; Schleich et al., 2017). Ο σκοπός του εγχειρήματος ήταν η κατασκευή δύο πανομοιότυπων, λοιπόν, διαστημικών αεροσκαφών, έτσι ώστε το αεροσκάφος στη Γη θα αντικατόπτριζε, προσομοίωνε και προέβλεπε τις συνθήκες του άλλου αεροσκάφους στο διάστημα (Liu et al., 2020).

Σχετικά με την εννοιολογική προσέγγιση του όρου του ψηφιακού διδύμου, σημειώνεται ότι η πρώτη προσπάθεια απόδοσης ορισμού σε αυτή την έννοια πραγματοποιήθηκε από τους Schleich και συν. (2017) και αφορούσε τα αεροσκάφη, αλλά οι Ταο και συν. (2018) έδωσαν έναν πιο απλοποιημένο και συνάμα γενικό ορισμό αυτού και ανέφεραν ότι το ψηφιακό δίδυμο συνίσταται από το φυσικό και το εικονικό σύστημα καθώς και δεδομένα, διαμέσου των οποίων καθίσταται δυνατή η σύνδεση των δύο προαναφερθέντων συστημάτων, κάτι το οποίο συνεπάγεται ότι το ψηφιακό μοντέλο, ουσιαστικά προσομοιώνει το πραγματικό δηλαδή το φυσικό μοντέλο, σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας κατ' αυτόν τον τρόπο ρεαλιστικές και ολιστικές μετρήσεις (Boulos & Zhang, 2021; Grieves, 2014; Fuller et al., 2020), ενώ φυσικά εμπεριέχει, σύμφωνα με τους Holdowsky και συν. (2015) και την ιστορική συμπεριφορά του φυσικού μοντέλου. Την ίδια περιγραφή χρησιμοποιούν και οι Jones και συν. (2020) εντός του ερευνητικού τους άρθρου.

Σύμφωνα με τον El Saddik (2018), η επικοινωνία εντός του ψηφιακού διδύμου, δηλαδή η επικοινωνία του πραγματικού συστήματος με το εικονικό σύστημα, πραγματοποιείται διαμέσου της χρήσης ενός μοναδικού αναγνωριστικού· η δε επικοινωνία και κυρίως η αναπαραγωγή των πέντε αισθήσεων του πραγματικού αντικειμένου από το ψηφιακό γίνεται διαμέσου αισθητήρων και ενεργοποιητών (El Saddik, 2018).

Σε αυτό το σημείο καθίσταται σαφές, αλλά και αξίζει να τονιστεί η διαφορά του ψηφιακού διδύμου με μια IoT συσκευή· η IoT συσκευή διαμέσου αισθητήρων ανιχνεύει και καταγράφει δεδομένα, τα οποία σχετίζονται με τη θέση ή τη λειτουργία ακόμα και τη διαγνωστική λειτουργία της συσκευής, αλλά δεν μπορεί να καταγράψει τις πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των επιμέρους στοιχείων ή των διαδικασιών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της συσκευής, κάτι το οποίο είναι εφικτό από το ψηφιακό δίδυμο (Holdowsky et al., 2015). Το ψηφιακό δίδυμο ουσιαστικά

πραγματοποιεί την αναγκαία σύνδεση ανάμεσα στις προηγμένες IoT τεχνολογίες και την ανάλυση δεδομένων (data analytics), με τρόπο ώστε να υπερκεράζονται οι προκλήσεις που αναφέρθηκαν ανωτέρω (Fuller et al., 2020).

Ειδικότερα, σε ένα ψηφιακό δίδυμο, το φυσικό σύστημα βρίσκεται στη βάση για τη δημιουργία του ψηφιακού συστήματος, το οποίο με τη σειρά του δύναται να αξιοποιηθεί στο πλαίσιο της προσομοίωσης, με σκοπό να ληφθούν τελικά αποφάσεις, ή επιπροσθέτως να καταστεί δυνατός ο έλεγχος του συνδεδεμένου φυσικού συστήματος, από τη στιγμή που, όπως σημειώθηκε, επιτυγχάνεται αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού συστήματος (Tao & Zhang, 2017). Διαμέσου της αναλύσιμης τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, προσφέρεται η δυνατότητα στις επιχειρήσεις να έχουν στη διάθεσή τους ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό αποτύπωμα των προϊόντων τους, από το στάδιο του σχεδιασμού, το στάδιο της ανάπτυξης έως και το στάδιο του τέλους του κύκλου ζωής τους (Mussomeli et al., 2016).

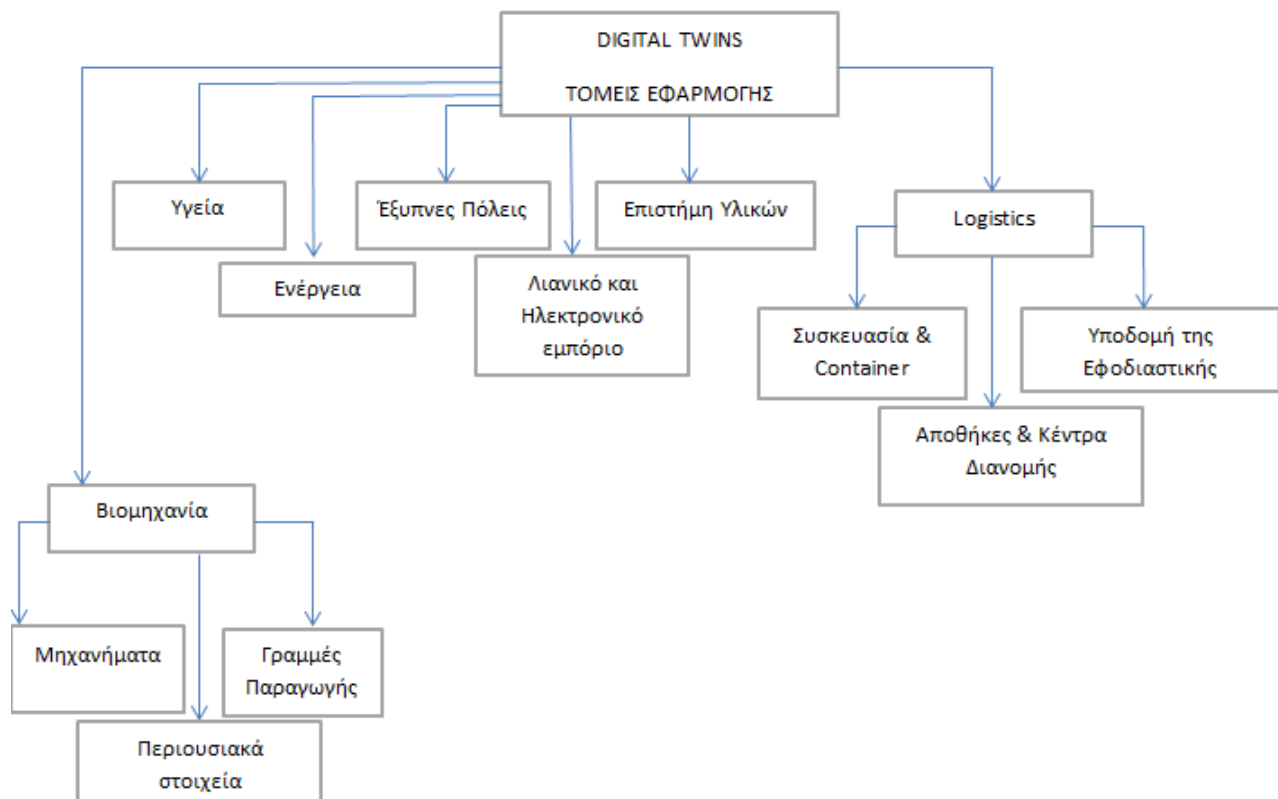
Η αξία των ψηφιακών διδύμων έγκειται στο γεγονός ότι, διαμέσου αυτών, δίνεται η δυνατότητα να μοντελοποιηθούν περίπλοκες διαδικασίες και πολύπλοκα στοιχεία, τα οποία βρίσκονται σε μια συνεχή αλληλεπίδραση με τα περιβάλλοντά τους, για τα οποία δεν είναι εύκολο να γίνουν προβλέψεις με αποτελεσματικό τρόπο, οι οποίες μάλιστα να αφορούν σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους (Grievies, 2014). Σύμφωνα με τους Holdowsky και συν. (2015), τα ψηφιακά δίδυμα έχουν χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα από πεδία, ένα εκ των οποίων είναι και η βιομηχανία.

Ειδικότερα, το ψηφιακό δίδυμο ουσιαστικά αποτελεί ένα εικονικό αντίγραφο μιας διαδικασίας, που λαμβάνει χώρα εντός του εργοστασίου και μάλιστα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Η λειτουργία του ψηφιακού διδύμου εδράζεται στην ύπαρξη ενός μεγάλου αριθμού αισθητήρων, οι οποίοι είναι διανεμημένοι σε ολόκληρη τη φυσική διαδικασία παραγωγής. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν δεδομένα, τα οποία αφορούν σε ένα ευρύ πεδίο διαστάσεων· από δεδομένα των μηχανημάτων που εμπλέκονται στη παραγωγή και σχετίζονται με χαρακτηριστικά των προϊόντων, όπως είναι το πάχος, η ποιότητα του χρώματος, η σκληρότητα, η ροπή και άλλα, έως τις συνθήκες του περιβάλλοντος οι οποίες επικρατούν μέσα στο ίδιο το εργοστάσιο. Τα δεδομένα, τα οποία συλλέγονται μέσω των αισθητήρων, τελικά συγκεντρώνονται και προσφέρονται διαμέσου του ψηφιακού διδύμου, το οποίο προβαίνει στη συνεχή ανάλυση τους καθώς αυτά εισέρχονται (Holdowsky et al., 2015).

## 2.3 Εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων σε διάφορους τομείς

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά σε μερικές από τις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων, δηλαδή στον τομέα, στα πεδία και στα ειδικά προβλήματα στο χώρο του IT, που προσπαθεί η νέα αυτή τεχνολογία να επιλύσει. Η περαιτέρω εξέλιξη των ψηφιακών διδύμων καθίσταται δυνατή διαμέσου της ολοένα και αυξανόμενης εξέλιξης τόσο στο χώρο των IoT τεχνολογιών όσο και στο χώρο της τεχνητής νοημοσύνης (Fuller et al., 2020). Όπως αναφέρει χαρακτηριστικά ο El Saddik (2018), η έννοια των ψηφιακών διδύμων οφείλει να επεκταθεί ακόμα περισσότερο, καθότι δύναται να εφαρμοστεί ευρέως σε πολλά τεχνολογικά πεδία, τα οποία ξεφεύγουν από το πεδίο της βιομηχανίας.

Σχήμα 2.2: Διάγραμμα τομέων εφαρμογής ψηφιακών διδύμων.



Πιο αναλυτικά, ορισμένοι κύριοι τομείς εφαρμογής της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, πέρα από τη βιομηχανία, η οποία αποτελεί και τον πυρήνα της παρούσας εργασίας, είναι οι έξυπνες πόλεις (Dembski et al., 2020; Deren et al., 2021; Du et al., 2020; Fuller et al., 2020;



Kaznah et al., 2021; Mylonas et al., 2021), οι επιστήμες του τομέα της υγείας (Fuller et al., 2020; Hassani et al., 2022; Caprari, 2022), ενώ εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων εμφανίζονται, επίσης, στα logistics<sup>6</sup> (Longo et al., 2021) και στα βιομηχανικά προϊόντα, στην ενέργεια (Teng et al., 2021; Rassõlkin et al., 2021; Yu et al., 2022), στην επιστήμη των υλικών (Morgado et al., 2020) καθώς και στο λιανικό ηλεκτρονικό εμπόριο (Vancea & Nemirschi, 2020).

### 2.3.1 Έξυπνες πόλεις

Οι πόλεις γενικά, δύνανται να εκληφθούν ως ζωντανά συστήματα, ή ακόμα και ως ζωντανοί «οργανισμοί», λόγω της σε μεγάλο βαθμό δυναμικής φύσης τους, της πολυπλοκότητάς τους και φυσικά του μεγέθους τους (Mylonas et al., 2021). Σύμφωνα με τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ), πάνω από το 55% του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικούσε σε πόλεις το 2008, ενώ το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί στο 68% μέχρι το 2050. Από πλευράς σημασίας, δεν δύναται να τεθεί υπό αμφισβήτηση το γεγονός ότι οι πόλεις διαδραματίζουν μείζονα ρόλο στην κοινωνική, αλλά και οικονομική ανάπτυξη, σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ την ίδια στιγμή κατέχουν ένα σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον (Du et al., 2020).

Ωστόσο, οι πόλεις υπόκεινται σε συνεχείς αλλαγές οικονομικής, οικολογικής και δημογραφικής φύσης (Dembski et al., 2020), όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των πόλεων συνάδουν με τον ορισμό των ψηφιακών διδύμων ως δυναμικών, εξελισσόμενων μοντέλων. Ο ολοένα και αυξανόμενος αριθμός των κατοίκων των πόλεων σε συνδυασμό με τον περιορισμένο πλέον χώρο, καθώς και τους περιορισμένους πόρους αναφορικά με την επέκταση των πόλεων, καθιστούν τον πολεοδομικό σχεδιασμό και την προσομοίωση των προτεινόμενων μέτρων και λύσεων μείζονος σημασίας για τη βιωσιμότητα της υλοποίησής τους στην πράξη (Mylonas et al., 2021). Σημειώνεται ότι τα ψηφιακά δίδυμα εκλαμβάνονται ως ένα νέο σημείο εκκίνησης για τη σημερινή κατασκευή έξυπνων πόλεων (smart cities) (Deren et al., 2021).

Πιο αναλυτικά, στο πεδίο των έξυπνων πόλεων, είναι γεγονός ότι η χρήση, αλλά και οι δυνατότητες των ψηφιακών διδύμων είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές και μάλιστα η αποτελεσματικότητά τους αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και αυτό συμβαίνει κυρίως διότι εξελίσσεται επίσης ραγδαία η δυνατότητα συνδεσιμότητας μέσω IoT τεχνολογιών (Fuller et al., 2020). Τα αστικά ψηφιακά δίδυμα είναι εξελιγμένα μοντέλα δεδομένων, τα οποία παρέχουν την

---

<sup>6</sup> με πιο συγκεκριμένες εφαρμογές τη συσκευασία και τα εμπορευματοκιβώτια (containers), τις αποθήκες και τα κέντρα διανομής καθώς και τις υποδομές της εφοδιαστικής αλυσίδας.

δυνατότητα συνεργατικών διαδικασιών (Dembski et al., 2020). Από κατασκευαστικής πλευράς, η δημιουργία ψηφιακού διδύμου στον συγκεκριμένο τομέα αφορά στην κατασκευή ενός περίπλοκου τεράστιου συστήματος ανάμεσα στον φυσικό κόσμο (δηλαδή στην πραγματική πόλη) και τον εικονικό, ή με άλλα λόγια ψηφιακό κόσμο (δηλαδή την εικονική πόλη), το οποίο δύναται να χαρτογραφήσει το ένα το άλλο και να επιτρέπει την αλληλεπίδραση προς τις δύο κατευθύνσεις (Deren et al., 2021).

Η κατασκευή ψηφιακών διδύμων πόλεων ουσιαστικά οδηγεί σε καινοτομίες στο αστικό ευφυή σχεδιασμό, στη διαχείριση των υπηρεσιών και αποτελεί το εφαλτήριο για την κατασκευή έξυπνων πόλεων (Deren et al., 2021), αλλά και την συνακόλουθη προαγωγή των IoT και AI τεχνολογιών (Fuller et al., 2020). Για το τελευταίο, σημειώνεται ότι με την ανάπτυξη ολοένα και πιο πολλών έξυπνων πόλεων, τόσο δημιουργούνται περισσότερες συνδεδεμένες κοινότητες διαμέσου της χρήσης ψηφιακών διδύμων, κάτι το οποίο συνεπάγεται ολοένα και περισσότερα διαθέσιμα δεδομένα προς ανάλυση, τα οποία συλλέγονται μέσω αισθητήρων IoT συσκευών σε βασικές υπηρεσίες, οι οποίες προσφέρονται εντός μιας έξυπνης πόλης, αλλά και σε υποδομές της. Καθίσταται κατανοητό ότι η διαθεσιμότητα ολοένα περισσότερων τέτοιων δεδομένων συνδεδεμένων κοινοτήτων προς ανάλυση ανοίγει, με τη σειρά της, το δρόμο για την έρευνα των αρμόδιων επιστημόνων και συνδράμουν στη δημιουργία ακόμα πιο προηγμένων αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (Fuller et al., 2020).

Η ικανότητα των υποδομών, αλλά και των υπηρεσιών, οι οποίες προσφέρονται μέσα σε μια έξυπνη πόλη να διαθέτουν αισθητήρες και να παρακολουθούνται από IoT συσκευές, έχει περισσότερη αξία από όση επισημάνθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Συγκεκριμένα, αυτές οι υποδομές και υπηρεσίες, οι οποίες παρακολουθούνται από IoT συσκευές, αποτελούν το εφαλτήριο για κάθε μελλοντική ανάπτυξη και συνεισφέρουν στη συνεχή εξέλιξη άλλων έξυπνων πόλεων.

Πέρα από τα πλεονεκτήματα σχεδιασμού, εντοπίζονται επιπροσθέτως πλεονεκτήματα, τα οποία αφορούν στην εξοικονόμηση ενέργειας: τα συλλεχθέντα δεδομένα προσφέρουν μια εποπτεία για την κατανομή και την χρήση των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας (Fuller et al., 2020). Το τελευταίο καθίσταται δυνατό διαμέσου της δημιουργίας και της χρήσης ενός πολυεπίπεδου μοντέλου, με σκοπό την οπτικοποίηση και συστηματική κατηγοριοποίηση των διαφόρων στοιχείων, προσφέροντας τη δυνατότητα της εστίασης της προσοχής των αρμοδίων στην προαγωγή των λειτουργιών (Kaznah et al., 2021).

### 2.3.2 Υγεία

Σύμφωνα με τους Björnsson και συν. (2020), παρά την σημαντική πρόοδο, η οποία έχει σημειωθεί στη βιοϊατρική, κατά τη διάρκεια του αιώνα που διανύουμε, εντούτοις ένας μεγάλος αριθμός ασθενών δεν ανταποκρίνεται στην φαρμακευτική θεραπεία, η οποία τους παρέχεται. Μάλιστα, σύμφωνα με σχετική έκθεση του Οργανισμού Τροφίμων και Φαρμάκων (Food and Drug Administration, FDA), η φαρμακευτική αγωγή θεωρείται αναποτελεσματική για το 38% έως και το 75% των ασθενών με κοινές ασθένειες, κάτι το οποίο συνεπάγεται αυξημένη ταλαιπωρία για τους ασθενείς, αλλά και αύξηση του κόστους της υγειονομικής περίθαλψης (Björnsson et al., 2020; Boulos & Zhang, 2021), με πολλές περιπτώσεις να αφορούν στην κατάθλιψη και στον καρκίνο (Boulos & Zhang, 2021). Οι Boulos και Zhang (2021) τονίζουν ότι ένας λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι οι διακυμάνσεις μεταξύ των ασθενών, που λαμβάνουν την ίδια ή παρόμοια θεραπεία.

Πέρα από την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, ο χώρος της υγείας και της περίθαλψης αφορά σε έναν ακόμα τομέα εφαρμογής της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, με τις δυνατότητες και τις εξελίξεις που επιφέρονται σε αυτόν να είναι πρωτοφανείς, καθώς κάτι το οποίο εκλαμβανόταν πριν έτη ότι είναι ανέφικτο καθίσταται πλέον εφικτό. Ειδικά αν συνυπολογιστεί ότι στις μέρες μας το κόστος των IoT συσκευών γίνεται προσπελάσιμο, γίνεται κατανοητό ότι η χρήση τους στον τομέα της υγείας γίνεται ολοένα και πιο εφικτή και, άρα, αυξάνεται η δυνατότητα συνδεσιμότητας, η οποία με τη σειρά της αυξάνει τις πιθανές εφαρμογές της εν λόγω τεχνολογίας στον υπό εξέταση τομέα (Fuller et al., 2020). Οι στόχοι αυτών των εφαρμογών έγκεινται στην μοντελοποίηση συστημάτων προκειμένου να αναπτυχθούν και να δοκιμαστούν ταχύτερα και οικονομικά σε πραγματικές συνθήκες (Björnsson et al., 2020). Η μοντελοποίηση στο πλαίσιο της υγείας, διαμέσου της χρήσης των ψηφιακών διδύμων, αφορά στην επίτευξη μιας περισσότερο ή λιγότερο αντιπροσωπευτικής προσομοίωσης οργάνων ή ακόμη και ολόκληρων ατόμων (Braun, 2021).

Πιο αναλυτικά, μια καινοτόμα εφαρμογή της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων στο χώρο της υγείας είναι το ψηφιακό δίδυμο ενός ανθρώπου, το οποίο θα παρέχει ανάλυση σε πραγματικό χρόνο του σώματός του (Fuller et al., 2020). Ένα ψηφιακό δίδυμο θα πρέπει ιδανικά να ενσωματώνει όλους τους τύπους μεταβλητών, οι οποίες σχετίζονται με την εκάστοτε παθογένεια του ατόμου που μελετάται (Björnsson et al., 2020). Προς ώρας, μια ρεαλιστική

τρέχουσα εφαρμογή αφορά στο ψηφιακό δίδυμο, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της επίδρασης ορισμένων φαρμάκων, δηλαδή για τις θεραπείες, ενώ μια άλλη εφαρμογή αφορά στην πρόβλεψη και στον σχεδιασμό αναφορικά με την εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων (Björnsson et al., 2020; Fuller et al., 2020), αλλά και στις διαγνώσεις (Björnsson et al., 2020).

Ειδικά στις χειρουργικές επεμβάσεις, η προσομοίωση της λειτουργίας της καρδιάς είναι καίριας σημασίας προκειμένου να ανιχνευτούν πιθανές δυσκολίες ή και επιπλοκές, οι οποίες ενδέχεται να εμφανιστούν κατά τη διάρκεια της πραγματικής χειρουργικής επέμβασης· αυτό επιτρέπει την έγκαιρη και αποτελεσματική αντιμετώπισή τους ή ακόμα και την επιλογή και εφαρμογή εναλλακτικής θεραπείας του προβλήματος (Braun, 2021).

Γενικά, η χρήση ενός ψηφιακού διδύμου προσφέρει τόσο στους ερευνητές, όσο και στους γιατρούς, τα νοσοκομεία και τους παρόχους υγειονομικής περίθαλψης τη δυνατότητα να προσομοιώνουν περιβάλλοντα ειδικά για τις ανάγκες τους, είτε πρόκειται για πραγματικό χρόνο ή με σκοπό την πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων και χρήσεων. Εν έτη 2020 η αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων στο χώρο της υγείας ήταν σε εμβρυικό επίπεδο, αλλά αναμφισβήτητα οι δυνατότητες που δίνει στον συγκεκριμένο τομέα είναι τεράστιες και κυμαίνονται από τη χρήση του για τη διαχείριση των κλινών και φτάνουν μέχρι τη χρήση τους σε ευρεία κλίμακα τόσο σε ολόκληρους θαλάμους όσο και στη διαχείριση πολλών νοσοκομείων (Fuller et al., 2020) και στην προσωποποιημένη ιατρική (Björnsson et al., 2020).

Εξάλλου, η προσωποποιημένη ή με άλλα λόγια εξατομικευμένη ιατρική έγκειται σε μια αυξανόμενη προσέγγιση στο χώρο της υγειονομικής περίθαλψης, η οποία θέτει ως στόχο της την αντιμετώπιση των ζητημάτων που σκιαγραφήθηκαν στην παρούσα ενότητα και που η κλασσική ιατρική δεν δύναται να υπερκεράσει. Διαμέσου της εξατομικευμένης ιατρικής, προσφέρονται θεραπείες ασθενειών και προληπτικές παρεμβάσεις προσαρμοσμένες σε μεταβλητές του ασθενούς όπως είναι η γενετική του σύνθεση, ο τρόπος ζωής του, αλλά και διάφοροι περιβαλλοντικοί του παράγοντες· μεταβλητές οι οποίες καθιστούν τον κάθε ασθενή μοναδικό. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μοντελοποιούνται, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μεμονωμένοι ασθενείς (Boulos & Zhang, 2021).

### 2.3.3 Επιστήμη των υλικών

Στον τομέα της επιστήμης των υλικών (materials science) παράγεται στις μέρες μας ένα ευρύ φάσμα δεδομένων. Τα δεδομένα, που παράγονται στον συγκεκριμένο τομέα, προέρχονται από πειράματα, αλλά και από υπολογισμούς και προσομοιώσεις και, χωρίς αμφιβολία, συνιστούν μία πρόκληση όσον αφορά την επεξεργασία, κατανόηση, ανάλυση και ανταλλαγή αυτών των πληροφοριών. Η αποθήκευση και διαχείριση του τεράστιου αυτού όγκου δεδομένων είναι μια επιπρόσθετη πρόκληση, η οποία πρέπει να υπερκεραστεί (Morgado et al., 2020).

Από εννοιολογικής πλευράς, η επιστήμη των υλικών αφορά σε έναν άρτια καθιερωμένο επιστημονικό κλάδο, ο οποίος είναι απαραίτητος για την παροχή νέων υλικών, τα οποία με τη σειρά τους να είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τις τρέχουσες περιβαλλοντικές προκλήσεις, αλλά και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα. Ο κύκλος ανάπτυξης βιομηχανικών υλικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τους μεγάλους όγκους δεδομένων, που παράγονται συνεχώς από πειράματα, υπολογισμούς και προσομοιώσεις, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Διαμέσου της αξιοποίησης των διαθέσιμων πληροφοριών, δίνεται η δυνατότητα της παραγωγής νέων γνώσεων, οι οποίες, με τη σειρά τους, δύνανται να υποστηρίξουν τη δημιουργία καλύτερων υλικών, πιο ισχυρών διεργασιών και διαδικασιών παραγωγής και τελικά πιο έξυπνων βιομηχανιών και θεωριών, που βασίζονται σε καλά ενημερωμένες και τεκμηριωμένες αποφάσεις (Morgado et al., 2020).

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της διαχείρισης και αξιοποίησης των δεδομένων μεγάλης διάστασης στον τομέα της επιστήμης των υλικών, που αναφέρθηκαν αναλυτικά ανωτέρω, μείζονα ρόλο διαδραματίζει η ψηφιοποίηση των υλικών, δηλαδή να επέλθει ο ψηφιακός μετασχηματισμός του συγκεκριμένου επιστημονικού τομέα. Ερευνητές έχουν επισημάνει ότι οι ήδη υπάρχουσες και ώριμες προσεγγίσεις μοντελοποίησης των υλικών δεν είναι πλέον στις μέρες μας επαρκής. Πράγματι, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το όφελος, αλλά και προκειμένου να επιτευχθεί ο ψηφιακός μετασχηματισμός του τομέα της επιστήμης των υλικών, καθίσταται αναγκαία η αξιοποίηση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων. Το πρώτο βήμα, για να αξιοποιηθεί η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της επιστήμης των υλικών, είναι η εξασφάλιση της διαθεσιμότητας όλων των στοιχείων, τα οποία είναι απαραίτητα για την δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου. Η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου επιτρέπει τη διεξαγωγή μηχανικών δοκιμών, οι οποίες καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δοκιμών, που διεξάγονται με σκοπό τον

προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, με σκοπό να διασφαλιστεί ότι η αντίδραση του υλικού σε μια δεδομένη ενέργεια καθιστά το υλικό κατάλληλο για την επιδιωκόμενη εφαρμογή. Τέλος, η εφαρμογή ψηφιακού διδύμου στον τομέα της επιστήμης των υλικών διασφαλίζει την απρόσκοπτη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων μερών, διαμέσου της αξιοποίησης τεχνολογικών μέσων, όπως είναι π.χ. το αποθετήριο ανοικτής πρόσβασης στο GitHub, το οποίο είναι πρόσφορο μέρος για τη συνεργασία κατά τη διάρκεια ανάπτυξης εφαρμογών κλπ. (Morgado et al., 2020).

#### **2.3.4 Ενέργεια**

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων εφαρμόζεται και στον τομέα της ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων έχει εφαρμοστεί στα συστήματα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας, αξιοποιώντας το γεγονός ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προβλέψουν τις μελλοντικές επιδόσεις, τη συμπεριφορά και τις ανάγκες συντήρησης ενός πολύπλοκου συστήματος. Ωστόσο, τονίζεται ότι ακόμη και στις μέρες μας η εφαρμογή της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων στα συστήματα μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα σημαντικό και ανοικτό ερώτημα στον βιομηχανικό τομέα, το οποίο χρήζει επιπρόσθετης επιστημονικής έρευνας (Rassõlkin et al., 2021).

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της ενέργειας προσφέρει τη δυνατότητα της τροποποίησης, της βελτιστοποίησης και της ανάπτυξης κωδικών προγραμματισμού διαφόρων εφαρμογών, οι οποίες εφαρμογές με τη σειρά τους αξιοποιούνται στον τομέα της προσομοίωσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατό για μια μηχανή να επαναπρογραμματιστεί ενώ συνεχίζει να εκτελεί τα καθημερινά της καθήκοντα και ο χρόνος αναμονής του μηχανήματος μειώνεται, με αποτέλεσμα το ενεργειακό κόστος, επίσης να μειώνεται και τελικά να καθίσταται δυνατή η εξοικονόμηση ενέργειας. Σημειώνεται ότι η βελτιστοποίηση της κατανάλωσης της ενέργειας επιτρέπει επιπροσθέτως την ανάπτυξη εφαρμογών, οι οποίες να είναι πιο αποδοτικές από ενεργειακής πλευράς και οι οποίες είναι μέρη του ευρύτερου συστήματος μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας (Rassõlkin et al., 2021). Όπως επισημαίνεται από τους Teng και συν. (2021), τα μοντέλα τα οποία εδράζονται σε δεδομένα για την εξοικονόμηση ενέργειας στη βιομηχανία βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε δεδομένα αισθητήρων, δεδομένα πειραματισμού και δεδομένα που βασίζονται στη γνώση. Γενικά, το έξυπνο εργοστάσιο δύναται να προάγει την αξιοπιστία του συστήματος,

κάτι το οποίο καθίσταται δυνατό διαμέσου της εφαρμογής προγνωστικών συντήρησης και διαμέσου της έξυπνης εξοικονόμησης ενέργειας (Teng et al., 2021).

### **2.3.5 Λιανικό ηλεκτρονικό εμπόριο**

Η ψηφιοποίηση εμφανίζεται σε ολοένα και περισσότερα πεδία της ανθρώπινης δραστηριότητας. Ένα από αυτά τα πεδία είναι, χωρίς αμφιβολία, και το πεδίο της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στον άνθρωπο και τις μηχανές. Ειδικά, λόγω της πανδημίας Covid-19 που ξέσπασε στη χώρα μας επίσημα κατά το έτος 2020, παρατηρήθηκε μια απότομη αύξηση του ηλεκτρονικού εμπορίου (online commerce), δηλαδή του εμπορίου το οποίο πραγματοποιείται με τη βοήθεια του Η/Υ με απαραίτητη τη σύνδεση στο διαδίκτυο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ήταν η περίπτωση των Χριστουγέννων 2020, όπου εν μέσω της πανδημίας Covid-19, κατέστη εφικτό για τις επιχειρήσεις λιανικού εμπορίου να προβλέψουν με ακρίβεια τις ανάγκες των καταναλωτών και, κατ' αυτόν τον τρόπο, να μην επιτρέψουν στην υγειονομική αυτή κατάσταση να διαταράξει τις χριστουγεννιάτικες αγορές των ανθρώπων, χωρίς αυτό βέβαια να σημαίνει ότι η προσπάθεια αυτή λειτούργησε με τον βέλτιστο τρόπο σε όλες τις περιπτώσεις· τουναντίον, δημιουργήθηκαν και πολλές δυσλειτουργίες, οι οποίες τελικώς διατάραξαν τις χριστουγεννιάτικες αγορές του έτους 2020 (Vancea & Nemirschi, 2020).

Η απότομη αυτή αύξηση του ηλεκτρονικού εμπορίου, πέρα λοιπόν από οφέλη, επέφερε όμως και αρκετές προκλήσεις, τις οποίες κλήθηκαν να αντιμετωπίσουν τόσο οι λιανοπωλητές όσο και οι ίδιοι οι πελάτες, που πραγματοποιούν τις αγορές. Μερικές από τις τεχνολογίες, οι οποίες εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο του ηλεκτρονικού εμπορίου, ήταν η τεχνητή νοημοσύνη, τα διάφορα bots (έννοια, η οποία αποτελεί σύμπτυξη της λέξης «robot»), τα οποία, με απλά λόγια, αποτελούν αυτόνομα προγράμματα στο διαδίκτυο ή σε άλλο δίκτυο, τα οποία μπορούν να αλληλεπιδράσουν με άλλα συστήματα ή χρήστες (Vancea & Nemirschi, 2020).

Εκείνο, που έχει σημασία να καταστεί κατανοητό, σε αυτό το σημείο, είναι το ότι μια από τις πλέον πρόσφατες τεχνολογικές τάσεις στον τομέα του λιανικού ηλεκτρονικού εμπορίου αφορά στη δημιουργία, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, ψηφιακών διδύμων για κάθε άτομο, το οποίο συνδέεται με το δίκτυο. Η τάση αυτή πρόκειται να συνεχιστεί με ακόμη περισσότερα (και καλύτερα) δεδομένα, ταχύτερη επεξεργασία και ακόμη πιο έξυπνους αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης. Επίσης, η αυτοματοποίηση των ρομποτικών διαδικασιών χρησιμοποιεί την κατάλληλη τεχνολογία, ώστε να δημιουργήσει ψηφιακούς εργαζομένους, οι οποίοι με τη σειρά

τους θα εξυπηρετήσουν τους ψηφιακούς πελάτες, που αντιστοιχίζονται όπως ειπώθηκε ανωτέρω με τους αληθινούς πελάτες, οι οποίοι διαδικτυακά πραγματοποιούν τις αγορές τους (Vancea & Nemirschi, 2020).

## **2.4 Ψηφιακά δίδυμα στη βιομηχανία και στα βιομηχανικά προϊόντα**

Ένας τομέας αξιοποίησης των ψηφιακών διδύμων είναι και ο τομέας της βιομηχανίας και ο λόγος για αυτό εδράζεται στο γεγονός ότι οι επιχειρηματίες του υπό εξέταση κλάδου επιδιώκουν πάντα να εξοικονομήσουν χρήματα, αλλά και χρόνο διαμέσου της παρακολούθησης και του ελέγχου των προϊόντων τους. Όπως συμβαίνει και στην περίπτωση των έξυπνων πόλεων, αλλά και του χώρου της υγείας, έτσι και στο χώρο της βιομηχανίας, καίρια σημασία αναφορικά με τη χρήση των ψηφιακών διδύμων διαδραματίζει η δυνατότητα συνδεσιμότητας, η οποία στην ουσία αποτελεί και το κίνητρο για τη χρήση τους στον συγκεκριμένο τομέα. Η αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων στην βιομηχανία συνάδει με την IIoT και τις επιταγές της Industry 4.0 στο τομέα της παραγωγής (Fuller et al., 2020).

Πράγματι, η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων μπορεί να εφαρμοστεί και στα βιομηχανικά προϊόντα (industrial products). Μάλιστα, ερευνητές αναφέρουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα αξιοποιούνται στα βιομηχανικά προϊόντα, στο πλαίσιο του IIoT, έννοιας η οποία οδηγεί την Industry 4.0 και η οποία μελετήθηκε αναλυτικά ανωτέρω (Autiosalo et al., 2021).

Πιο αναλυτικά, το ψηφιακό δίδυμο προσφέρει τη δυνατότητα της καταγραφής της απόδοσης των μηχανημάτων και της γραμμής παραγωγής και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, κάτι το οποίο παρέχει με τη σειρά του τη δυνατότητα στην βιομηχανική επιχείρηση να προβλέψει προβλήματα πριν αυτά εμφανιστούν. Η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου αυξάνει τη δυνατότητα την σύνδεσης των επιμέρους συσκευών και την παροχή ανατροφοδότησης, προάγοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τόσο την αξιοπιστία όσο και την απόδοση. Η ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων διαμέσου αλγορίθμων AI σε συνδυασμό με τα ψηφιακά δίδυμα εξασφαλίζουν στην επιχείρηση αυξημένη ακρίβεια, ενώ την ίδια στιγμή διαμορφώνεται ένα περιβάλλον, το οποίο προσφέρει τη δυνατότητα της δοκιμής προϊόντων, καθώς και ένα σύστημα, το οποίο αποκρίνεται αποτελεσματικά σε δεδομένα πραγματικού χρόνου εντός ενός περιβάλλοντος παραγωγής (Fuller et al., 2020).

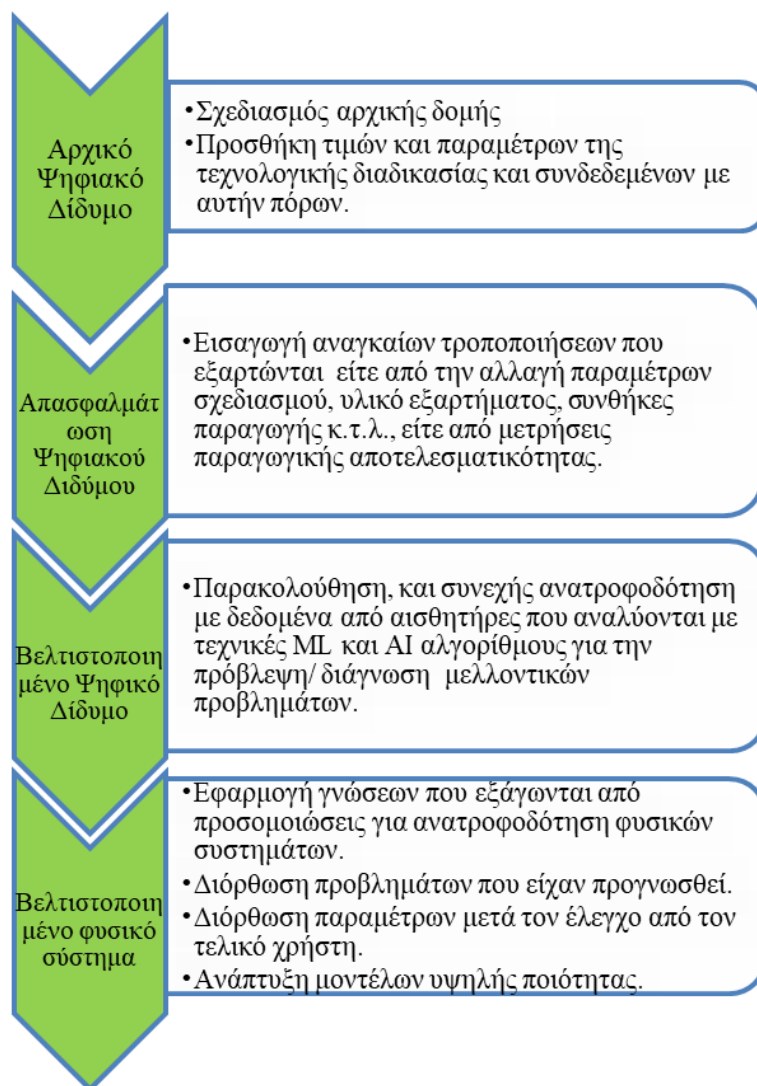


Στις μέρες μας, η ψηφιοποίηση της ανθρώπινης δραστηριότητας αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της τεχνολογικής προόδου (Kholopov et al., 2019). Μάλιστα, ερευνητές οραματίστηκαν την έννοια του ψηφιακού διδύμου προτού γίνει διαθέσιμη η απαραίτητη τεχνολογία για την υλοποίησή της (Resman et al., 2021). Όταν η αναγκαία τεχνολογία υπήρξε διαθέσιμη, κατά την έλευση της Industry 4.0, τέθηκε επί τάπητος η διαδικασία σχεδιασμού του ψηφιακού διδύμου στην πράξη. Κατά το σχεδιασμό ενός ψηφιακού διδύμου, ουσιαστικά αναπτύσσεται η δομή του, συμπεριλαμβανομένων των αντίστοιχων τιμών παραμέτρων της τεχνολογικής διαδικασίας, αλλά και των συνδεδεμένων με αυτήν πόρων. Έπειτα, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της αποσφαλμάτωσης (debugging) και την εφαρμογή της τεχνολογικής διαδικασίας, το αρχικό ψηφιακό δίδυμο δύναται να τροποποιηθεί, προκειμένου να επιτευχθεί η βελτιστοποίησή του (Kholopov et al., 2019).

Σημειώνεται ότι η τροποποίηση του αρχικά σχεδιασθέντος ψηφιακού διδύμου εκλαμβάνεται στην πράξη ως η εισαγωγή των αναγκαίων τροποποιήσεων και η δημιουργία μιας καινούργιας έκδοσης αυτού, υπό το φως εξωτερικών παραγόντων, οι οποίοι συναρτώνται με την αλλαγή των παραμέτρων σχεδιασμού του εξαρτήματος, καθώς και με το υλικό, τις συνθήκες παραγωγής κ.α. Βέβαια, υπάρχει και η δυνατότητα, πλέον, βελτιστοποίησης του ψηφιακού διδύμου, χωρίς να είναι απαραίτητη η δημιουργία νέας εκδοχής αυτού· διαμέσου της διόρθωσης εσωτερικών παραγόντων, που συνδέονται με μετρήσεις της παραγωγικής αποτελεσματικότητας (Kholopov et al., 2019).

Ολοένα και περισσότεροι οργανισμοί έχουν ξεκινήσει να στηρίζονται στη χρήση των ψηφιακών διδύμων για την παρακολούθηση, την ανάλυση και την προσομοίωση φυσικών, δηλαδή υλικών περιουσιακών στοιχείων (physical assets), αλλά και διαδικασιών (processes), αλλά και για την αποτελεσματική διαχείριση των τελευταίων (Intizar Ali et al., 2021; Kholopov et al., 2019). Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του σχεδιασμού των ψηφιακών διδύμων έγκειται στο ότι τα τελευταία δύναται να προσφέρουν πολύ περισσότερα από ό,τι απλά ένα ακριβές αντίγραφο, αναφορικά με την υποστήριξη υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας, οι οποίες δεν είναι δυνατές στα φυσικά περιουσιακά στοιχεία (Intizar Ali et al., 2021).

**Σχήμα 2.3:** Ψηφιακό δίδυμο στη βιομηχανική παραγωγή.



Όπως κατέστη σαφές ανωτέρω, με την έλευση του IIoT και της Industry 4.0, τα ψηφιακά δίδυμα αξιοποιήθηκαν, εκτός των άλλων, και στον κλάδο της βιομηχανίας (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019; Fuller et al., 2020). Πιο αναλυτικά, στο πλαίσιο του έξυπνου εργοστασίου, οι μηχανικοί, αλλά και οι ερευνητές έχουν αναπτύξει μεθόδους, καθώς και ένα ευρύ φάσμα από εργαλεία, προκειμένου να κατορθώσουν να δώσουν λύση σε συγκεκριμένα προβλήματα και ζητήματα στην μηχανική διαδικασία (Jaensch et al., 2018).

Στο πλαίσιο, μάλιστα, της ψηφιοποίησης της βιομηχανίας και ειδικά της ψηφιοποίησης των διαδικασιών παραγωγής, τα προαναφερθέντα εργαλεία και οι προαναφερθέντες μέθοδοι είναι

αποκλειστικά βασισμένες στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αναμένεται ότι οι εικονικές μέθοδοι, αλλά και τα προαναφερθέντα εργαλεία, θα κερδίσουν ακόμα πιο μεγάλη αξία κατά τα έτη που θα ακολουθήσουν και, μάλιστα, ο σκοπός θα είναι να καταστεί δυνατή η πλήρης αντιστοίχιση ένα προς ένα ανάμεσα στα πραγματικά συστήματα και στα εικονικά συστήματα· κάτι το οποίο ονομάζεται ψηφιακό δίδυμο, όπως έχει αναφερθεί ήδη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας (Jaensch et al., 2018).

Εκείνο που πρέπει να τονιστεί είναι το γεγονός ότι η ίδια ιδέα της δημιουργίας ενός ψηφιακού διδύμου, το οποίο να οδηγείται από δεδομένα (data-driven) εδράζεται, όχι απλά στην ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, αλλά και στις διαρκώς αυξανόμενες ποσότητες δεδομένων που παράγονται εντός του χώρου ενός έξυπνου εργοστασίου (Friederich et al., 2022). Το πρόβλημα, ή με άλλα λόγια η πρόκληση, με την ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων, τα οποία συνιστούν το ψηφιακό δίδυμο έγκειται στο ότι λειτουργούν με μεγάλες ποσότητες ετερογενών δεδομένων (Resman et al., 2021). Οι πληροφορίες, που συλλέγονται από τα δεδομένα, δύνανται να είναι στατικές ή δυναμικές· ειδικότερα, αυτές μπορούν να αντικατοπτρίζουν την κατάσταση του αντικειμένου σε ένα χρονικό διάστημα ή σε μια στιγμή, ή ενδέχεται να αλλάζουν σε πραγματικό χρόνο, σε συντονισμό με ένα συγκεκριμένο αντικείμενο ή μια ομάδα αντικειμένων του ίδιου τύπου (Kholopov et al., 2019).

Εξάλλου, είναι γεγονός ότι, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής, παράγονται σε συνεχή βάση δεδομένα, τα οποία προέρχονται από το ίδιο το σύστημα, ή παράγονται σε κατάλληλους αισθητήρες (Jaensch et al., 2018). Η έμφαση, επομένως, αναπόφευκτα οφείλει να δοθεί τελικώς στα δεδομένα, διότι αυτά αποτελούν στο κύριο στοιχείο, το οποίο δύναται να αξιοποιηθεί με σκοπό τον προσδιορισμό, αλλά και την παρακολούθηση των καταστάσεων πολύπλοκων συστημάτων εντός του περιβάλλοντος του εργοστασίου (Friederich et al., 2022).

Η αποτελεσματική αξιοποίηση αυτών των δεδομένων, με τη σειρά της, δύναται να συνδράμει στην ανάπτυξη μοντέλων υψηλής πιστότητας για συστήματα παραγωγής, όπως θα αναλυθεί και στην αντίστοιχη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου. Προκειμένου να εξαχθεί γνώση από τα δεδομένα, όπως διαπιστώθηκε ανωτέρω, χρησιμοποιούνται προηγμένες ML τεχνικές (Friederich et al., 2022). Πιο συγκεκριμένα, διαμέσου της διαδικασίας της προσομοίωσης, καθίσταται εφικτή η πρόβλεψη του τρόπου με τον οποίο η φυσική οντότητα ενός ψηφιακού

διδύμου αναμένεται να αποδώσει στον πραγματικό κόσμο (Assad Neto et al., 2021; Friederich et al., 2022).

Ως εκ τούτου, είναι μείζονος σημασίας ο προαναφερθέντας παράγοντας κατά τη διάρκεια δημιουργίας ενός ψηφιακού διδύμου. Διαμέσου της ενσωμάτωσης δεδομένων από το φυσικό μέρος στο ψηφιακό δίδυμο, οι μηχανικοί δύνανται να προάγουν το σύστημα εν συνόλω και εν συνεχεία να κάνουν χρήση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των παραχθέντων από το ψηφιακό δίδυμο δεδομένων, προκειμένου να βελτιώσουν τη λειτουργία του φυσικού συστήματος στον πραγματικό κόσμο (Catarci et al., 2019). Μείζονος σημασίας είναι επίσης να τονιστεί ότι η αρχιτεκτονική δημιουργίας ενός ψηφιακού διδύμου δύναται να υποστηρίξει παραπάνω από έναν τύπο μοντέλου την ίδια στιγμή (Assad Neto et al., 2021).

Τώρα, όσον αφορά την μοντελοποίηση προσομοίωσης (simulation modeling) και τα ψηφιακά δίδυμα, αυτά διέπονται από ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά, αλλά την ίδια στιγμή έχουν και καίριες διαφορές. Πιο αναλυτικά, η ικανότητα κατανόησης, παρακολούθησης και πειραματισμού με πολύπλοκα φυσικά συστήματα ή μοντέλα είναι κοινά χαρακτηριστικά και στην μοντελοποίηση προσομοίωσης και στα ψηφιακά δίδυμα. Μια επιπρόσθετη ικανότητα, την οποία κατέχουν τα ψηφιακά δίδυμα, αλλά όχι τα μοντέλα προσομοίωσης, έγκειται στην ικανότητα των πρώτων να χρησιμοποιούν την γνώση, η οποία εξάγεται από τις προσομοιώσεις προκειμένου να ανατροφοδοτήσουν τα φυσικά συστήματα ή μοντέλα (Friederich et al., 2022).

Διαμέσου της προαναφερθείσας ανατροφοδότησης στο φυσικό σύστημα από τις γνώσεις που έχουν συγκεντρωθεί διαμέσου των προσομοιώσεων, γίνεται εφικτή η προαγωγή της λειτουργίας τους και η διόρθωση προβλημάτων, που ενδεχομένως να είχαν επισημανθεί κατά την προσομοίωση. Επίσης, σύμφωνα με τους Friederich και συν. (2022), αυτή η πληροφορία, διαμέσου των προσομοιώσεων, δύναται να χρησιμοποιηθεί, ώστε να ελεγχθούν ή να κατευθυνθούν σωστά οι παράμετροι, που δίνονται στο σύστημα από τον τελικό χρήστη αυτού. Η γνώση αυτή ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο και, ως εκ τούτου, αναπαριστά ενδεχόμενες αλλαγές, οι οποίες συμβαίνουν στο περιβάλλον παραγωγής· προάγοντας έτσι, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, τις διάφορες πτυχές των διαδικασιών παραγωγής, αλλά και βελτιώνοντας τις δυνατότητες του ίδιου του ψηφιακού διδύμου (Friederich et al., 2022).

Αναφορικά με το πεδίο της υλοποίησης ψηφιακών διδύμων κατά την έξυπνη βιομηχανία, είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθεί λογισμικό ανοικτού κώδικα (open source software) και αυτό

διότι η χρήση τέτοιου είδους λογισμικού προσφέρει ευελιξία και διαλειτουργικότητα των λύσεων, οι οποίες παράγονται στο πλαίσιο της έξυπνης βιομηχανίας. Όταν, μάλιστα, γίνεται αξιοποίηση αδειών χρήσης ανοικτού κώδικα, τότε εξασφαλίζεται ότι η τεχνολογία αυτή δύναται να διανεμηθεί ελεύθερα, αλλά και να υποστεί τροποποιήσεις. Το τελευταίο δίνει τη δυνατότητα στους αρμόδιους του τομέα της βιομηχανίας να συνδυάσουν τον παλιό τους εξοπλισμό με τις σύγχρονες μηχανές και τα σύγχρονα εργαλεία, τα οποία με τη σειρά τους χρησιμοποιούν αισθητήρες από διάφορους προμηθευτές (vendors) (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της χρήσης λογισμικού ανοικτού κώδικα αφορά στο γεγονός ότι η επεκτασιμότητα από τεχνικής πλευράς, αλλά και η αυξημένη υπολογιστική ισχύς, προσφέρουν τη δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων μεγάλης διάστασης. Κατ' αναλογία, το υλικό ανοικτού κώδικα υποστηρίζει την ταχύτερη δημιουργία πρωτοτύπων και την προσαρμογή στις τρέχουσες και ειδικές ανάγκες της βιομηχανικής επιχείρησης των συστημάτων, τα οποία μπορούν να επαναπρογραμματίζονται. Όλα αυτά τα πλεονεκτήματα βοηθούν τις βιομηχανικές επιχειρήσεις να βελτιστοποιούν τον σχεδιασμό, καθώς και τη διαλειτουργικότητα σε όλες τις πραγματικές διαδικασίες του κύκλου ζωής των γραμμών παραγωγής (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019).

Μερικές από την ανοικτού κώδικα κοινότητες είναι το ίδρυμα λογισμικού Apache (Apache Software Foundation<sup>7</sup>), το ίδρυμα λογισμικού και λειτουργικού Linux (Linux Foundation<sup>8</sup>), οι τεχνολογίες IoT της Eclipse (Eclipse IoT<sup>9</sup>), στις οποίες περιέχονται είκοσι οκτώ έργα και πολλές IoT λύσεις, καθώς και άλλες κοινότητες, οι οποίες, συνολικά αλλά και η καθεμία ξεχωριστά, έχουν αναδειχθεί πλέον σε μείζονος σημασίας προμηθευτές στο πλαίσιο της έξυπνης βιομηχανίας. Παράλληλα, με την συνεχή βελτίωση και ανάπτυξη της ανοικτού κώδικα τεχνολογίας, οι Damjanovic-Behrendt και Behrendt (2019) επισημαίνουν ότι η έννοια των ψηφιακών διδύμων αλλάζει και αυτή άρδην, προκειμένου να υπερκεράσει όλες τις προκλήσεις, οι οποίες υπάρχουν στον τομέα της έξυπνης βιομηχανίας (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019).

Στη συνέχεια μελετούνται δύο συγκεκριμένα πεδία του τομέα της βιομηχανίας, όπου εφαρμόζεται η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, τα οποία είναι η προσομοίωση μηχανημάτων και η μοντελοποίηση περιουσιακών στοιχείων γενικότερα και η προσομοίωση γραμμών παραγωγής.

---

<sup>7</sup> <https://cutt.ly/6ZCdQoD>, (08/08/2022).

<sup>8</sup> <https://cutt.ly/BZCdOch>, (08/08/2022).

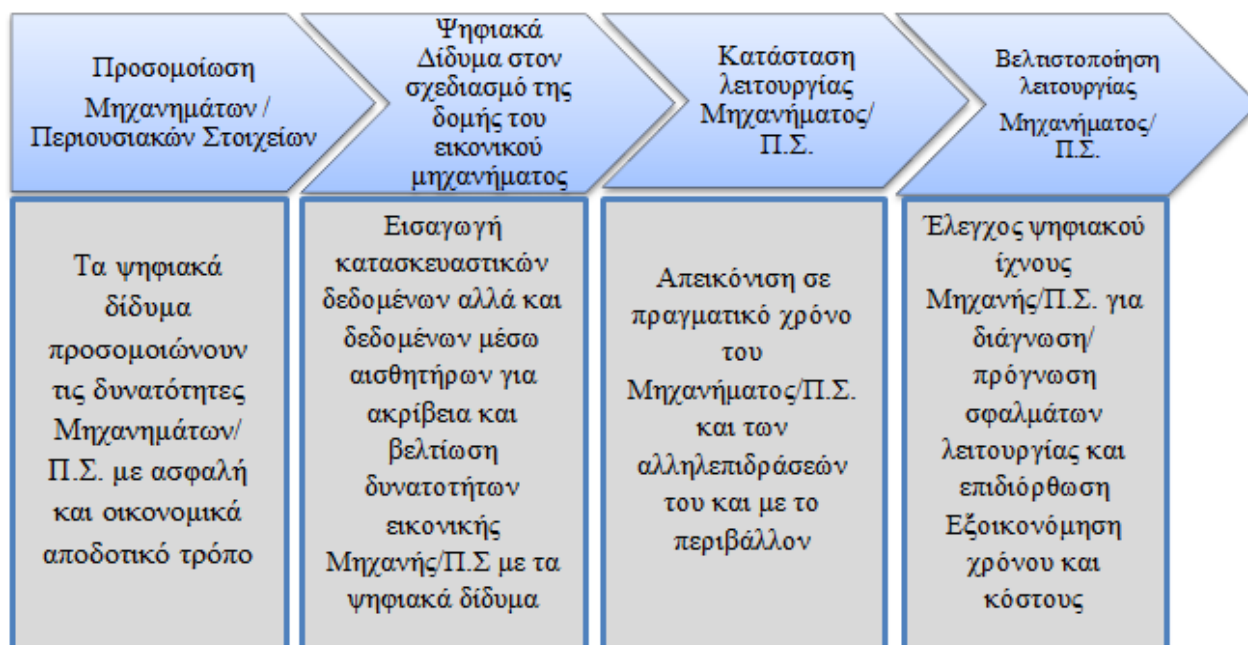
<sup>9</sup> <https://cutt.ly/aZCdHfL>, (08/08/2022).

## **2.5 Ψηφιακά δίδυμα στην προσομοίωση μηχανημάτων και στην μοντελοποίηση περιουσιακών στοιχείων**

Ένας τομέας, όπου τα ψηφιακά δίδυμα δύνανται να εφαρμοστούν, είναι η προσομοίωση των μηχανημάτων (machine simulation). Πιο αναλυτικά, οι εικονικές μηχανές έχουν αποβεί εξαιρετικά χρήσιμες στον τομέα της βιομηχανίας, καθώς παρέχουν στην επιχείρηση τη δυνατότητα να προχωρήσουν στην προσομοίωση των δυνατοτήτων των μηχανημάτων τους με ασφαλή και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αξίζει φυσικά να τονιστεί ότι η προαναφερθείσα προσομοίωση δεν είναι εύκολη· είναι μάλιστα εξαιρετικά δύσκολο να προσομοιωθεί με λεπτομέρειες ακριβείας η φυσική μηχανή από την αντίστοιχη εικονική. Ο τρόπος με τον οποίο αυτή η προσομοίωση βελτιώνεται με το χρόνο έγκειται στο γεγονός ότι οι μηχανικοί, σε περίπτωση που ένα φυσικό μηχάνημα δυσλειτουργεί ή ακόμα και χαλάει, τότε ελέγχουν τα ψηφιακά ίχνη της αντίστοιχης εικονικής μηχανής για διάγνωση και πρόγνωση (Cai et al., 2017).

Από το παραπάνω, καθίσταται κατανοητό ότι η αξιοπιστία των λειτουργιών, οι οποίες αφορούν στο εικονικό μηχάνημα, σε ένα ψηφιακό δίδυμο κατά την προσομοίωση μηχανημάτων στη βιομηχανία, συναρτάται και μάλιστα σε σημαντικό βαθμό με το επίπεδο της εξομοίωσής του με το αντίστοιχο φυσικό μηχάνημα. Ωστόσο, το γεγονός ότι το σύστημα είναι εξαιρετικά περίπλοκο και εμπεριέχεται έντονο το στοιχείο της αβεβαιότητας στις διαδικασίες, που λαμβάνουν χώρα, είναι τις περισσότερες φορές δύσκολη η κατασκευή μιας εικονικής μηχανής, η οποία να είναι ρεαλιστική ως προς το φυσικό της αντίγραφο. Ένας τρόπος κατασκευής εικονικής μηχανής είναι η ενσωμάτωση κατασκευαστικών δεδομένων, αλλά και η εισαγωγή κατάλληλων αισθητήρων ώστε να προαχθεί η ακρίβεια, αλλά να βελτιωθούν οι δυνατότητες της εικονικής μηχανής (Cai et al., 2017).

**Σχήμα 2.4:** Ψηφιακά δίδυμα και προσομοίωση μηχανημάτων / περιουσιακών στοιχείων.



Σημειώνεται ότι ένα βήμα μετά τη χρήση ψηφιακών διδύμων στην προσομοίωση μηχανημάτων βρίσκεται η αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων στην μοντελοποίηση περιουσιακών στοιχείων (asset modeling), όπου η αρχιτεκτονική του ψηφιακού διδύμου είναι τέτοια, ώστε να στοχεύει στον σχεδιασμό της δομής των περιουσιακών στοιχείων, δηλαδή όλων των φυσικών πραγμάτων, αλλά και των επιμέρους στοιχείων τους, των μετρήσιμων παραμέτρων τους, καθώς και των κατασκευαστικών πληροφοριών τους, όπως είναι η ημερομηνία κατασκευής τους, ή ακόμα και το ιστορικό συντήρησής τους (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019).

Η χρήση των ψηφιακών διδύμων στο πλαίσιο της μοντελοποίησης περιουσιακών στοιχείων είναι μείζονος σημασίας, καθώς η διαδικασία αυτή προσθέτει αξία στα συνδεδεμένα δεδομένα των αισθητήρων και συμβάλλει σε μια σειρά από νέες γνώσεις, όπως είναι η απόκτηση πληροφοριών αναφορικά με την κατάσταση υγείας των περιουσιακών στοιχείων· κάτι που δεν θα μπορούσε να γίνει εφικτό αν δεν είχαν εισαχθεί κατάλληλοι αισθητήρες, αλλά και της εκτίμησης του κατά πόσον τα τελευταία έχουν ανάγκη για συντήρηση (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019).

Η διαδικασία της μοντελοποίησης περιουσιακών στοιχείων διαμέσου της χρήσης ψηφιακών διδύμων δύναται επίσης να προσφέρει διάφορες μορφές παρουσίασης, ή με άλλα λόγια οπτικοποίησης, για διαφορετικές ομάδες χρηστών, δηλαδή ενδιαφερόμενων μερών. Π.χ. για μια

ομάδα ενδιαφερόμενων μερών, δύναται να κριθεί χρήσιμη η εικόνα μόνο των επιχειρησιακών δεδομένων, ενώ σε άλλη ομάδα ενδιαφερόμενων μερών δύναται να αποτελέσει χρήσιμη η εικόνα της λειτουργίας μιας μεμονωμένης μηχανής. Η λειτουργία του ψηφιακού διδύμου, προκειμένου να ενισχυθεί και να καταστεί εφικτή η παραγωγή τέτοιων εικόνων, κρίνεται αναγκαία η παροχή μεταδεδομένων (metadata) σχετικών με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, τα δεδομένα συντήρησης, το ιστορικό των επισκευών, τα δεδομένα παραγωγής, των διαφόρων επιχειρησιακών διαδικτυακών υπηρεσιών κ.α. (Damjanovic-Behrendt & Behrendt, 2019).

Τα αυτόνομα συστήματα (autonomous systems) είναι έξυπνες μηχανές, ή έξυπνα συστήματα από πολλές μηχανές, οι οποίες προκειμένου να λειτουργήσουν, χρειάζονται την πρόσβαση σε πολύ ρεαλιστικά μοντέλα της τρέχουσας κατάστασης της διαδικασίας, η οποία λαμβάνει χώρα μέσα στο εργοστάσιο, αλλά και της συμπεριφοράς των μηχανημάτων σε σχέση με το περιβάλλον τους στον πραγματικό κόσμο. Το τελευταίο καθίσταται δυνατό διαμέσου των ψηφιακών διδύμων και τότε τα αυτόνομα συστήματα, τα οποία δημιουργούνται, δύνανται να φέρουν εις πέρας δύσκολες εργασίες χωρίς να χρειάζονται λεπτομερή προγραμματισμό με ρητό τρόπο, αλλά ούτε και τον ανθρώπινο έλεγχο. Οι μηχανές αυτές γνωρίζουν τις δυνατότητές τους και την τρέχουσα κατάστασή τους και με βάση αυτούς τους παράγοντες μπορούν να αποφασίσουν ανάμεσα από ένα σύνολο δυνατών εναλλακτικών αποφάσεων· αφού ληφθεί η βέλτιστη δυνατή απόφαση, οργανώνουν τον τρόπο υλοποίησής της. Αυτού του είδους οι έξυπνες μηχανές αποτελούν ουσιαστικά το σήμα κατατεθέν του ευέλικτου αυτοματισμού, καθώς είναι σε θέση να προσαρμόζονται αυτόματα στις μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, στα προς κατασκευή προϊόντα, στους όγκους παραγωγής, ενώ την ίδια στιγμή δύνανται να αποκρίνονται με αποτελεσματικό τρόπο σε εξαιρέσεις, οι οποίες προκύπτουν, πολλές φορές, κατά την εκτέλεση των δραστηριοτήτων της παραγωγικής διαδικασίας (Rosen et al., 2015).

Προκειμένου, τα αυτόνομα μηχανήματα να μπορέσουν να φέρουν εις πέρας αποτελεσματικά τους στόχους για τους οποίους έχουν δημιουργηθεί, αυτά χρειάζονται όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη συνολική κατάσταση του περιβάλλοντος χώρου, των προϊόντων που πρόκειται να κατασκευαστούν, της γεωμετρίας και των δυνατοτήτων των εξαρτημάτων και των εργαλείων που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και τις δικές τους δυνατότητες και την δική τους διαμόρφωση. Ένα μέρος από τις προαναφερθείσες πληροφορίες θα είναι διαθέσιμες ήδη από το στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος, του σχεδιασμού του συστήματος παραγωγής, καθώς και κατά τον προγραμματισμό της παραγωγής. Ο δε τρόπος



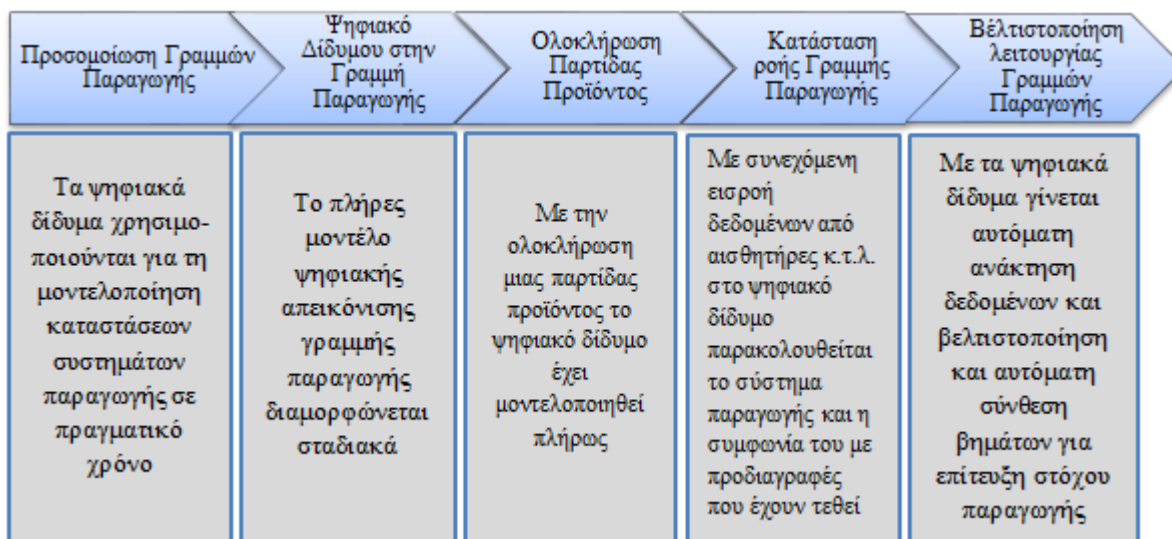
συλλογής όλων αυτών των πληροφοριών θα γίνει διαμέσου της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου, όπως έχει καταστεί ήδη κατανοητό από την έως τώρα ανάλυση (Rosen et al., 2015).

## **2.6 Ψηφιακά δίδυμα στην προσομοίωση γραμμών παραγωγής**

Όπως αναφέρουν οι Cronrath και συν. (2019), τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν έναν καίριας σημασίας παράγοντα για την έλευση και την συνεχή βελτίωση έξυπνων και αυτόνομων συστημάτων παραγωγής (Cronrath et al., 2019). Πράγματι, η αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων στα έξυπνα εργοστάσια καθίσταται δυνατή διαμέσου της μοντελοποίησης πραγματικών καταστάσεων των συστημάτων παραγωγής. Το τελευταίο με τη σειρά του γίνεται διαμέσου της προσομοίωσης της λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής (process simulation) σε πραγματικό χρόνο, όπως επισημάνθηκε και ανωτέρω. Σημειώνεται ότι η χρήση των ψηφιακών διδύμων στην προσομοίωση γραμμών παραγωγής, με τον τρόπο που αναφέρθηκε ανωτέρω, τελικά οδηγεί σε αυξημένη παραγωγικότητα για την επιχείρηση, αλλά και ταυτόχρονα μείωση του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας (Friederich et al., 2022).

Πιο αναλυτικά, το ψηφιακό δίδυμο είναι διαθέσιμο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός συστήματος παραγωγής με σκοπό την ανάπτυξη και την προαγωγή του, εδράζοντας στην προσομοίωση, στον σχεδιασμό του ίδιου του συστήματος, στις δοκιμές, στην εκπαίδευση, καθώς και στην διασφάλιση της βέλτιστης συνολικής λειτουργίας των διαδικασιών παραγωγής και των εγκαταστάσεων, οι οποίες στηρίζονται σε ψηφιακές μεθόδους και εργαλεία (Jaensch et al., 2018). Όταν η παραγωγή μιας παρτίδας (batch) προϊόντος ολοκληρωθεί, τότε το ψηφιακό δίδυμο προσδιορίζεται πλήρως, από πλευράς μοντελοποίησης, και δύναται να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να αναλυθούν τα δεδομένα παρακολούθησης της τεχνολογικής αυτής διαδικασίας. Επομένως, δίνεται η δυνατότητα στο σύστημα παρακολούθησης να δείξει εάν η τεχνολογική διαδικασία που μόλις έλαβε χώρα συνάδει με τις απαιτήσεις που τέθηκαν (Kholopov et al., 2019).

**Σχήμα 2.5:** Ψηφιακά δίδυμα και προσομοίωση γραμμών παραγωγής.



Σύμφωνα και με άλλους ερευνητές, όπως είναι οι Catarci και συν. (2019) και οι Cronrath και συν. (2019), η διαθεσιμότητα των δεδομένων και των υπηρεσιών διαμέσου των ψηφιακών διδύμων δύναται να επιφέρει σημαντικά αποτελέσματα στον σχεδιασμό των διαδικασιών παραγωγής, επιτρέποντας:

- την αυτόματη ανάκτηση,
- τη βελτιστοποίηση, αλλά και
- την αυτόματη σύνθεση των ενδιάμεσων βημάτων, τα οποία είναι απαραίτητα για την επίτευξη ενός στόχου παραγωγής (Catarci et al., 2019; Cronrath et al., 2019),

ενώ σύμφωνα με τους Kholopon και συν. (2019), τα ψηφιακά δίδυμα προφέρουν:

- ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο,
- ευκολία ενσωμάτωσης με άλλα συστήματα και
- ακρίβεια της προσομοίωσης.

Επισημαίνεται ότι, αναφορικά με τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων στην παραγωγή, ένας μείζονος σημασίας παράγοντας ή με άλλα λόγια χαρακτηριστικό της κατασκευής των ψηφιακών διδύμων στο πεδίο αυτό έγκειται στην ικανότητα να δημιουργηθεί ένα ψηφιακό, δηλαδή εικονικό

μοντέλο<sup>10</sup> του δαπέδου του εργοστασίου και των πόρων ή και των χαρακτηριστικών που απαρτίζουν το τελευταίο. Όσον αφορά στην προσομοίωση και στην αναπαράσταση της λειτουργίας του δαπέδου των εργοστασίων, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα συμπεριφοράς συστήματος (system behavior models) (Assad Neto et al., 2021).

Πιο αναλυτικά, τα μοντέλα συμπεριφοράς συστήματος δίνουν έμφαση σε μια ευρύτερη αναπαράσταση του δαπέδου του εργοστασίου· στα συγκεκριμένα μάλιστα μοντέλα δεν πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της εσωτερικής μηχανικής των επιμέρους στοιχείων, τουναντίον πραγματοποιείται η μοντελοποίηση άλλων γεγονότων, όπως είναι η ροή των υλικών και οι κινήσεις των χειριστών. Τα προαναφερθέντα στοιχεία αναπαράγονται, διαμέσου του ψηφιακού διδύμου, εικονικά, προκειμένου να αναπαραχθεί τελικώς η συμπεριφορά του συστήματος παραγωγής ως στο σύνολό του (Assad Neto et al., 2021).

Τα ψηφιακά δίδυμα στον τομέα της προσομοίωσης των γραμμών παραγωγής δύνανται να αξιοποιηθούν προκειμένου να καταστούν εφικτές οι αναγκαίες διαγνωστικές λειτουργίες. Το τελευταίο αφορά σε μια εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της προσομοίωσης των γραμμών παραγωγής, διότι τα ψηφιακά αυτά μοντέλα δύνανται να επισημάνουν συνθήκες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο πραγματικό σύστημα παραγωγής, το οποίο προσομοιάζουν (Assad Neto et al., 2021). Επιπροσθέτως, είναι δυνατή η χρήση των ψηφιακών διδύμων σε πιο προηγμένες λειτουργίες πρόβλεψης και καταγραφής, διαμέσου της αξιοποίησης προσομοιώσεων, αλλά και διαμέσου της μοντελοποίησης σφαλμάτων, καθώς και διαμέσου της συνδυασμένης χρήσης τεχνικών ανάλυσης δεδομένων (Assad Neto et al., 2021; Cronrath et al., 2019).

Σύμφωνα με τους Cronrath και συν. (2019), τα ψηφιακά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούνται με σκοπό την προσομοίωση της παραγωγικής διαδικασίας, μπορούν να προσαρμοστούν μέσω της ενισχυτικής μάθησης (Reinforcement Learning, RL) (Cronrath et al., 2019). Οι μέθοδοι RL είναι γνωστοί και ως «*μέθοδοι ML χωρίς μοντέλα*», κάτι το οποίο στην πράξη σημαίνει ότι η RL μέθοδος μαθαίνει να αντιδρά στην τρέχουσα κατάσταση, με τρόπο ώστε να εκπληρώνει έναν αρχικώς ορισμένο στόχο, ο οποίος ορίζεται από μια συνάρτηση, η οποία ονομάζεται «*συνάρτηση ανταμοιβής*». Προκειμένου να εκπαιδευτεί το RL μοντέλο, είναι αναγκαίο

---

<sup>10</sup> Το στοιχείο εκείνο, το οποίο διαφοροποιεί ένα απλό ψηφιακό μοντέλο από ένα ψηφιακό δίδυμο, έγκειται στο ότι η αρχιτεκτονική του ψηφιακού διδύμου είναι τέτοια ώστε να υποστηρίζεται η αυτόματη ροή δεδομένων ανάμεσα στο ψηφιακό και το πραγματικό μοντέλο, η οποία μάλιστα πραγματοποιείται και προς τις δύο κατευθύνσεις (Assad Neto et al., 2021).

ένα περιβάλλον, το οποίο δύναται είτε να είναι μια προσομοίωση είτε ένα μοντέλο. Η μέθοδος RL δύναται να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και οφείλει να παρατηρεί την τρέχουσα κατάσταση του περιβάλλοντος. Επιπροσθέτως, η συνάρτηση ανταμοιβής, η οποία παρέχεται, ορίζει τον σκοπό της RL μεθόδου και, συγκεκριμένα, η RL μέθοδος προσπαθεί να μεγιστοποιήσει, διαμέσου αυτής, την ανταμοιβή του (Jaensch et al., 2018).

Όπως συμβαίνει σε κάθε τέτοια περίπτωση, ο ευρύτερος στόχος είναι η επίλυση ενός προβλήματος. Κατά την υλοποίηση ενός αυτόματου λύτη προβλημάτων διαμέσου της χρήσης των μεθόδων που εντάσσονται στο πεδίο της RL, οι τιμές εισόδου οφείλουν να προσαρμόζονται σε μια συνάρτηση αναγνώσιμη από τη μηχανή. Όλες οι υπόλοιπες πληροφορίες, οι οποίες είναι αναγκαίες για την επίλυση ή για την βελτιστοποίηση του προβλήματος, βρίσκονται στο ίδιο το ψηφιακό δίδυμο (Jaensch et al., 2018). Όσον αφορά τώρα την έρευνα των Cronrath και συν. (2019), σημειώνεται ότι οι ανωτέρω επιστήμονες εισήγαγαν στο πλαίσιο της μελέτης τους έναν συγκεκριμένο RL αλγόριθμο, τον EDiT, ο οποίος έχει σαν σκοπό του να ενισχύσει την πολιτική ελέγχου του ψηφιακού διδύμου (Cronrath et al., 2019).

Πιο αναλυτικά, η προαγωγή του ελέγχου σε ένα ψηφιακό δίδυμο, διαμέσου της χρήσης του EDiT αλγορίθμου, εδράζεται στη χρήση του ίδιου του ψηφιακού διδύμου ως μια πολιτική ασφάλειας για την διατήρηση ενός περιορισμού, ο οποίος με τη σειρά του επιβάλλεται κατά τη μέτρηση της απόδοσης του συγκεκριμένου RL μοντέλου. Ο EDiT αλγόριθμος συνδυάζει πρόσφατες και ασφαλείς RL και DL μεθόδους, όπως είναι τα Μπεϋζιανά νευρωνικά δίκτυα. Παρά τα οφέλη του, ο EDiT αλγόριθμος έχει και κάποια αρνητικά στοιχεία. Από την μία πλευρά, χρειάζεται βελτίωση της ασφάλειας και της δειγματοληπτικής απόδοσης, αλλά και, από την άλλη πλευρά, η συμπεριφορά των εκτιμήσεων, δηλαδή των προβλέψεων των DL τεχνικών, δηλαδή των νευρωνικών δικτύων, ενδέχεται να είναι, πολλές φορές, απρόβλεπτες, κατά τη διάρκεια του σταδίου της μάθησης (Cronrath et al., 2019).

Σημειώνεται ότι ένα ακόμα από τα πλεονεκτήματα του συνδυασμού του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, διαμέσου της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της παραγωγής στο χώρο της βιομηχανίας, έγκειται, πέρα από τον έλεγχο του πραγματικού συστήματος παραγωγής, και στην ψηφιακή ιχνηλασιμότητα (digital traceability) ενός προϊόντος, που παράγεται κατά την συγκεκριμένη παραγωγική διαδικασία. Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η σημασία αυτού του γεγονότος, επισημαίνεται ότι η ψηφιακή ιχνηλασιμότητα επιτρέπει τον εντοπισμό της θέσης των

προϊόντων όταν δεν είναι δυνατή η εφαρμογή γραμμωτού/ραβδωτού κώδικα (barcode) ή ετικέτας ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency Identification, RFID) λόγω περιορισμών στις οποίες υπόκεινται τα προϊόντα, όπως είναι η γεωμετρία ή το μέγεθός τους (Resman et al., 2021).

Οι αλυσίδες εφοδιασμού και, κατ' επέκταση, όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς καλούνται να υπερκεράσουν ιδιαίτερα σοβαρές προκλήσεις, οι οποίες δημιουργούν δυσλειτουργίες στην απρόσκοπτη λειτουργία των εφοδιαστικών αλυσίδων· ένα ζήτημα εκ των οποίων είναι η παραχάραξη, η οποία δύναται να δημιουργήσει σοβαρές προκλήσεις για τη βιωσιμότητα μιας αλυσίδας εφοδιασμού, δεδομένου ότι ο αντίκτυπός της δύναται να αποβεί καταστροφικός τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για την οικονομική βιωσιμότητα μιας εταιρείας. Η αποτελεσματική ιχνηλασιμότητα των προϊόντων, που παράγονται από μια παραγωγική διαδικασία, έχει αναδειχθεί ως ο μόνος τρόπος να καταπολεμηθεί το προαναφερθέν φαινόμενο, εξασφαλίζοντας ασφαλείς και βιώσιμες λειτουργίες στην αλυσίδα εφοδιασμού (Gayialis et al., 2022a).

Πέρα από τις ανωτέρω προκλήσεις, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μια βιομηχανική επιχείρηση έχει, επίσης, την ανάγκη να ελαττώσει τόσο το κόστος διανομής των προϊόντων που παράγονται από μια γραμμή παραγωγής της, όσο και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Αυτές οι ανάγκες εκ μέρους των επιχειρήσεων στον τομέα της βιομηχανίας, έχουν οδηγήσει τους ερευνητές, αλλά και τους επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται στον συγκεκριμένο τομέα, να αναζητήσουν καινούργιες στρατηγικές προκειμένου να επιτύχουν τους προαναφερθέντες στόχους. Προκειμένου να δημιουργηθεί το χρονοδιάγραμμα των παραδόσεων, καθώς και να υπολογιστεί το κόστος διανομής των προϊόντων, αλλά και οι συνολικές εκπομπές σε ρύπους στο περιβάλλον, κρίνεται αναγκαία η κατοχή πολλών δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα προέρχονται και σχετίζονται τόσο με τους πελάτες όσο και με τα οχήματα και χρησιμοποιούνται είτε ως μεταβλητές, είτε ως περιορισμοί της δρομολόγησης των οχημάτων, αλλά και στον συνολικό προγραμματισμό του προβλήματος (Konstantakopoulos et al., 2021). Τα δεδομένα αυτά δύναται να συλλεχθούν διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, όπως κατέστη σαφές, από την έως τώρα ανάλυση, και να αναλυθούν κατάλληλα διαμέσου προηγμένων μεθόδων ανάλυσης στα πλαίσια της ΑΙ.

Σημειώνεται ότι μία ακόμη εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας και ειδικότερα στον τομέα της παραγωγής προϊόντων αφορά στην έννοια του ψηφιακού διδύμου

ρεύματος αξίας (digital value stream twin). Μάλιστα, η μέθοδος ρεύματος αξίας (Value Stream Method, VSM) είναι μια μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται σε ευρεία κλίμακα στις εταιρίες του βιομηχανικού τομέα, προκειμένου να καταστεί δυνατή η ανάλυση, αλλά και ο επανασχεδιασμός, όποτε αυτός κρίνεται αναγκαίος, των ροών αξίας. Ο σκοπός της συγκεκριμένης μεθόδου ψηφιακού διδύμου αφορά στην προαγωγή των διαδικασιών, στη μείωση της σπατάλης, καθώς και στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης ροής προϊόντων και, γενικά να μετασχηματίσει, με οργανωμένο και συστηματικό τρόπο, αλλά και διαφάνεια, μια τρέχουσα κατάσταση ροής αξιών και να την οδηγήσει σε μια επιθυμητή κατάσταση, η οποία τίθεται ως στόχος (Frick & Metternich, 2022).

Η μέθοδος ρεύματος αξίας είχε φτάσει στα όριά της, ελέω των νέων δεδομένων στο χώρο των σύγχρονων βιομηχανικών επιχειρήσεων, και αυτό διότι η υπό εξέταση μέθοδος παρέχει μόνο ένα στιγμιότυπο των ροών αξίας και συνεπώς δεν λαμβάνει υπόψη τη δυναμική ανάπτυξη των σημερινών συστημάτων παραγωγής. Προκειμένου να υπερκεραστεί ο προαναφερθέντας περιορισμός της μεθόδου ρεύματος αξίας, εντοπίζεται η ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη της, αλλά και τεχνολογικό της εμπλουτισμό, ώστε να ανταποκρίνεται στην τρέχουσα δυναμική των συστημάτων παραγωγής και για εναρμόνισή της με τις επιταγές της Industry 4.0. Η βελτίωση της συγκεκριμένης μεθόδου, ώστε να μπορέσει να σταθεί στο ύψος των περιστάσεων, καθίσταται εφικτή διαμέσου της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου. Όταν ένα ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της μεθόδου ρεύματος αξίας, τότε ονομάζεται ψηφιακό δίδυμο ρεύματος αξίας και ορίζεται από τους ερευνητές ως μια ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση μιας ροής αξίας και περιλαμβάνει τις ιδιότητες, τις συνθήκες και τις συμπεριφορές της ροής αξίας μέσω μαθηματικών μοντέλων και δεδομένων. Το εικονικό, δυναμικό μοντέλο συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης μιας ροής αξίας και χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και την παρουσίαση μιας ολιστικής εικόνας, ή ακριβέστερα αναπαράστασης, των αλληλεπιδράσεων και των εξαρτήσεων, που υπάρχουν ανάμεσα στις μεμονωμένες διαδικασίες παραγωγής (Frick & Metternich, 2022).

Οι Kim και συν. (2022) τόνισαν τη σημασία και την αξία των ψηφιακών διδύμων κατά την παραγωγική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, οι ανωτέρω επιστήμονες επεσήμαναν ότι, δημιουργώντας και διατηρώντας ένα υψηλής προβλεπτικής ικανότητας μοντέλο ψηφιακού διδύμου, επιτυγχάνεται εκ μέρους της κατασκευαστικής εταιρίας η βέλτιστη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού του παραγόμενου προϊόντος, ήδη από τα αρχικά στάδια της ανάπτυξής του, ενώ

δύναται, ως διαδικασία, να δώσει λύση και στο πρόβλημα της έναρξης και ανάπτυξης ρωγμών στα προϊόντα, κάτι το οποίο έγκειται σε ένα από τα πιο κοινά και συχνά προβλήματα αστοχίας σε βιομηχανικά προϊόντα. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η δομική αξιοπιστία και η ανθεκτικότητα των προϊόντων στον τομέα της βιομηχανίας, οι ειδικοί επιχείρησαν να προβλέψουν τα χαρακτηριστικά κόπωσης του προϊόντος, χρησιμοποιώντας ένα εμπειρικό μοντέλο ανάπτυξης ρωγμών και προηγμένης προσομοίωσης με βάση την επιστήμη της Φυσικής. Ωστόσο, η προβλεπτική ικανότητα ενός τέτοιου μοντέλου προσομοίωσης μπορεί να υποβαθμιστεί από τη φυσική αβεβαιότητα στη διαμόρφωση του μοντέλου και από τις συνθήκες δοκιμής. Η προσέγγιση του ανωτέρω προβλήματος από την πλευρά των ψηφιακών διδύμων επιχειρεί να άρει τους προαναφερθέντες περιορισμούς των ήδη υπαρχόντων προβλεπτικών μοντέλων στον τομέα της βιομηχανίας και προσπαθεί, επίσης, να αντικαταστήσει ελάχιστα τα συμβατικά μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία εδράζονταν στην Φυσική, όπως ειπώθηκε και ανωτέρω (Kim et al., 2022).

Ένα άλλο πεδίο στον τομέα της βιομηχανίας αφορά στην εξατομικευμένη παραγωγή (individualized manufacturing), η οποία θέτει ως προαπαιτούμενο, για να λειτουργήσει, την υψηλή ευελιξία τόσο του υλικού όσο και του λογισμικού των γραμμών παραγωγής. Ο ρόλος της εξατομικευμένης παραγωγής συνδέεται με το ότι είναι αναγκαίο για τις γραμμές παραγωγής να είναι ικανές να εκτελούν συνεχώς ευέλικτη αναδιαμόρφωση του συστήματος και να διασφαλίζουν την αυτονομία της διαδικασίας, ώστε να προσαρμόζονται σε αλλαγές, αλλά και σε νέες και πολλές φορές εξατομικευμένες προδιαγραφές προϊόντων. Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων προσφέρει στις βιομηχανικές επιχειρήσεις ένα θεωρητικό μοντέλο για τον έλεγχο πολύπλοκων διεργασιών βιώσιμης εξατομικευμένης παραγωγής, δηλαδή διεργασιών παραγωγής προϊόντων με εξατομικευμένες προδιαγραφές το καθένα (Leng et al., 2022).

Στο πλαίσιο της χρήσης της τεχνολογίας ψηφιακών διδύμων στην παραγωγή προϊόντων είναι και το σύστημα συνεργατικής παραγωγής, το οποίο στηρίζεται σε ψηφιακά δίδυμα επαυξημένης πραγματικότητας. Πρόκειται για ένα σύστημα παραγωγής στον τομέα της βιομηχανίας, όπου συνδυάζεται η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων με την τεχνολογία της επαυξημένης πραγματικότητας, προκειμένου να υπάρξει όχι μόνο το βέλτιστο παραγωγικό αποτέλεσμα, αλλά και να υπάρξει επικοινωνιακή συνεργασία ειδικών από διάφορα πεδία του ευρύτερου βιομηχανικού τομέα (Li et al., 2022α).

Πέρα από τις ανάγκες της εξατομικευμένης παραγωγικής διαδικασίας και της συνεργατικής παραγωγής, που αναφέρθηκαν ανωτέρω, σημειώνεται ότι ο προγραμματισμός της παραγωγικής διαδικασίας αφορά σε έναν από τους πιο τους κρίσιμους παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν την αποδοτικότητα της παραγωγής. Στο πλαίσιο της πραγματικής παραγωγής προϊόντων, ωστόσο, δηλαδή σε ρεαλιστικές συνθήκες παραγωγής, οι διάφορες ανωμαλίες οδηγούν σε απόκλιση του χρονοπρογραμματισμού και τελικά ασκούν αρνητική επιρροή στην εκτέλεση του παραγωγικού συστήματος. Το τελευταίο με τη σειρά του καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους χρονοπρογραμματισμού της παραγωγικής εργασίας ανεπαρκείς για να καλύψουν τις ανάγκες του πραγματικού χρόνου παραγωγής και της ακρίβειας, η οποία πρέπει να πληρείται σε κάθε βήμα αυτής. Με την εισαγωγή της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου και πάλι καθίσταται εφικτή η επίτευξη της βέλτιστης σύγκλισης ανάμεσα στο φυσικό και στο εικονικό σύστημα, κάτι το οποίο συμβάλλει θετικά στην απόδοση του προγραμματισμού των επιμέρους εργασιών παραγωγής. Πέρα από τον ίδιο τον χρονοπρογραμματισμό της παραγωγικής διαδικασίας, καθίσταται εφικτή, διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, και η ανίχνευση ανωμαλιών (Li et al., 2022β).

Η ανίχνευση των ανωμαλιών και των σφαλμάτων δύναται να δράσει συνδυαστικά με ένα πλαίσιο, το οποίο πραγματοποιεί καταναμημένο έλεγχο, δείχνοντας ανοχή στις ενδεχόμενες ανωμαλίες και στα ενδεχόμενα σφάλματα και, στην ουσία, να προβαίνει στον επαναπροσδιορισμό των συστημάτων παραγωγής, προκειμένου να συνεχίσουν τη λειτουργία τους. Οι πληροφορίες, οι οποίες χάνονται λόγω των σφαλμάτων και των ανωμαλιών στο παραγωγικό σύστημα, αντικαθίστανται από χρονομετρημένες πληροφορίες, που επιτρέπουν στο παραγωγικό σύστημα να συνεχίσει τις λειτουργίες του, όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω (Tahiri et al., 2022).

Η μετάβαση από μια κανονική συμπεριφορά σε μια υποβαθμισμένη συμπεριφορά, όταν εμφανίζεται σφάλμα αισθητήρα, εξασφαλίζεται από κανόνες επαναρρύθμισης, η οποία, μολονότι είναι ελλιπέστερη σε δεδομένα, εντούτοις επιτρέπει τη συνέχιση της λειτουργίας της παραγωγικής διαδικασίας με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, αφού μια διακοπή αυτής συνεπάγεται περισσότερες αρνητικές επιπτώσεις από ό,τι μια υποβαθμισμένη συμπεριφορά του παραγωγικού συστήματος (Tahiri et al., 2022).



## 2.7 Οφέλη των ψηφιακών διδύμων

Η χρήση των ψηφιακών διδύμων φέρνει πολλά οφέλη για τις επιχειρήσεις. Μερικά από τα οφέλη, τα οποία συνοδεύουν την αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων από μια επιχείρηση, είναι η αυξημένη παραγωγικότητα, η μειωμένη πολυπλοκότητα, η εξοικονόμηση χρόνου, το χαμηλότερο κόστος, ο προσδιορισμός νέων επιχειρηματικών πεδίων, η αύξηση της ποιότητας, η αυξημένη ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, η μείωση του ρίσκου και η αυξημένη αποτελεσματικότητα (Biesinger & Weyrich, 2019).

Πράγματι, σύμφωνα και με τους Salem και Dragomir (2022), υποστηρίζεται ότι η αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων έχει συνδράμει σθεναρά στην προσπάθεια των ερευνητών και των επαγγελματιών να προάγουν τις λειτουργίες, να προβλέψουν προβλήματα και να επιτύχουν την επίλυσή τους, διασφαλίζοντας υψηλή ποιότητα στο τελικό προϊόν ή την τελική προσφερόμενη υπηρεσία και μειώνοντας την ίδια στιγμή το κόστος. Τα οφέλη αυτά δύνανται να αξιοποιηθούν στην πράξη από μια πληθώρα από τομείς, όπως είναι η βιομηχανία, από τις διαδικασίες κατασκευής και παραγωγής μέχρι τη διαχείριση των μηχανικών και κατασκευαστικών έργων, η υγεία και άλλες περίπλοκες εφαρμογές, όπως αναλύθηκε ήδη και σε προηγούμενη ενότητα (Salem & Dragomir, 2022).

Εκείνο που πρέπει να μείνει κατά νου, αναφορικά με τα οφέλη των ψηφιακών διδύμων, έγκειται στο γεγονός ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να διασφαλίσει, αλλά και επαληθεύσει την ακεραιότητα ενός μοντέλου συστήματος, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται διαμέσου ελέγχων και δοκιμών, κάνοντας χρήση δεδομένων από το λειτουργικό περιβάλλον και εν συνεχεία να αξιολογήσει, να βελτιώσει, καθώς και να πραγματοποιήσει προβλέψεις. Ακόμη, ένα ψηφιακό δίδυμο δύνανται να επιτρέψει τους υπευθύνους να λάβουν αποφάσεις, οι οποίες στηρίζονται από σχετικές αναφορές, οι οποίες παρέχονται από το ψηφιακό σύστημα σχετικά με το έργο, που αναμένεται να υλοποιηθεί στο πραγματικό περιβάλλον. Το ψηφιακό δίδυμο παρέχει, επιπροσθέτως, η δυνατότητα να προβλεφθούν μελλοντικές αλλαγές στο φυσικό σύστημα, καθώς το αντίστοιχο ψηφιακό σύστημα προσφέρει, όπως σημειώθηκε, τη δυνατότητα ανάλυσης και προσομοίωσης των λειτουργιών, οπότε και μπορούν να υλοποιηθούν κατάλληλα σενάρια. Τέλος, μέσω της προσομοίωσης καθίσταται εφικτή η ανακάλυψη ορισμένων ευκαιριών, οι οποίες

δύνανται να οδηγήσουν σε βελτιώσεις του φυσικού συστήματος, κάτι το οποίο μεταφράζεται σε επιπρόσθετα κέρδη για την επιχείρηση (Salem & Dragomir, 2022).

## 2.8 Προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων λειτουργεί εν παραλλήλω με τις τεχνολογίες των IoT συσκευών και της τεχνητής νοημοσύνης. Η τελευταία παρατήρηση έπεται ότι οι προκλήσεις των IoT τεχνολογιών, αλλά και οι προκλήσεις των μεθόδων ΑΙ ουσιαστικά ενυπάρχουν και στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων· δηλαδή είναι κοινές. Όπως καθίσταται εύκολα αντιληπτό, προκειμένου να υπερκεραστούν οι προκλήσεις, οι οποίες συναντώνται στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, πρώτα είναι απαραίτητο για αυτές να εντοπιστούν. Ορισμένες από τις κοινές προκλήσεις αυτών των τεχνολογιών εντοπίζονται κατά την ανάλυση των δεδομένων ή κατά την χρήση τεχνολογιών IoT, οπότε προκειμένου να μελετηθούν οι προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων, αρκεί να διερευνηθούν οι προκλήσεις των πεδίων IoT, ΑΙ και της ανάλυσης δεδομένων (Fuller et al., 2020).

Μια μεγάλη πρόκληση, που δύναται να εντοπιστεί αρχικά και αφορά στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης, έγκειται στην γενική υποδομή τεχνολογίας πληροφορικής (IT infrastructure), η οποία απαιτείται ώστε να επιτευχθούν υψηλές αποδόσεις. Πιο αναλυτικά, κρίνεται αναγκαία η ύπαρξη σύγχρονου υλικού και λογισμικού, έτσι ώστε να καθίσταται εφικτή η εκτέλεση των ΑΙ αλγορίθμων. Η πρόκληση, που ενυπάρχει στην απόκτηση υψηλών προδιαγραφών τεχνολογικής υποδομής, έγκειται στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας αυτών των συστημάτων. Προκειμένου, ωστόσο, να λειτουργήσουν αποτελεσματικά οι ΑΙ αλγόριθμοι, δεν αρκεί μόνο η κατάλληλη και προηγμένη υποδομή. Καίριας σημασίας είναι και η ποιότητα των δεδομένων, που εισέρχονται μέσα στον αλγόριθμο προς ανάλυση. Από πλευράς λοιπόν των δεδομένων, είναι μείζονος σημασίας να εξασφαλιστεί ότι είναι υψηλής ποιότητας. Προς τούτο, τα συλλεχθέντα δεδομένα πρέπει να ταξινομηθούν και να καθαριστούν προτού τροφοδοτήσουν τους ΑΙ αλγορίθμους (Fuller et al., 2020).

Το ζήτημα του απορρήτου και της ασφάλειας αφορούν σε δύο επίσης μείζονα θέματα στον κλάδο του IT και εφαρμόζεται κανονικά και στην ανάλυση των δεδομένων, μολονότι η προσαρμογή των σχετικών νόμων στον τομέα του ΑΙ δεν έχουν θεσπιστεί ακόμη πλήρως, αφού ο κλάδος συνεχίζει να αναπτύσσεται. Με απλά λόγια, οι ΑΙ αλγόριθμοι οφείλουν να λειτουργούν με

τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται η προστασία των δεδομένων των χρηστών, σύμφωνα με τον γενικό κανονισμό για την προστασία των δεδομένων (General Data Protection Regulation<sup>11</sup>, GDPR), ο οποίος βρίσκεται σε ισχύ για τις ευρωπαϊκές χώρες και το Ηνωμένο Βασίλειο. Το γεγονός ότι ο τομέας του ΑΙ είναι καινούργιος δεν αφορά μόνο την έλλειψη σαφών κανόνων και νόμων ασφάλειας και απορρήτου, αλλά καλείται να υπερκεράσει και το ζήτημα της εμπιστοσύνης σε αυτόν. Ειδικότερα, δεν είναι λίγες οι φορές όπου ένας μη εξοικειωμένος προγραμματιστής αποθαρρύνεται λόγω της πολυπλοκότητας του πεδίου αυτού. Στο άλλο άκρο βρίσκεται το ζήτημα των υπερβολικών προσδοκιών ότι η ανάλυση δεδομένων και το ΑΙ θα επιλύσουν άμεσα τα διάφορα επιχειρηματικά προβλήματα και θα απαντήσουν άμεσα σε διάφορα επιχειρηματικά ερωτήματα, ενώ η αλήθεια είναι ότι απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και η συνεργασία με τους επιχειρηματικούς τομείς (Fuller et al., 2020).

Επιπροσθέτως, με την ραγδαία ανάπτυξη και αύξηση των ΙοΤ συσκευών τόσο στο χώρο της οικείας όσο και στη βιομηχανία, εμφανίζεται και στο πεδίο αυτό η πρόκληση της συλλογής σημαντικής ποσότητας δεδομένων και ο έλεγχος της ροής τους, διασφαλίζοντας κυρίως ότι δύνανται να οργανωθούν, αλλά και να αξιοποιηθούν με αποτελεσματικό τρόπο. Η χρήση του ΙοΤ αυξάνει τους μεγάλους όγκους των αδόμητων δεδομένων και η πρόκληση αυτή καθίσταται μεγαλύτερη με την έλευση των δεδομένων μεγάλης διάστασης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας. Η ανάγκη για προηγμένη τεχνολογική δομή και οι υψηλές απαιτήσεις υπάρχουν και στο πεδίο των ΙοΤ τεχνολογιών, ενώ προστίθεται το ζήτημα της συνδεσιμότητας και της λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο, ειδικά αν συνυπολογιστεί ότι πολλές φορές οι ΙοΤ συσκευές είναι εκείνες οι οποίες προμηθεύουν τους ΑΙ αλγορίθμους με δεδομένα (Fuller et al., 2020).

Όσον αφορά τώρα στα ψηφιακά δίδυμα, αυτά χρειάζονται, επίσης, την κατάλληλη τεχνολογική υποδομή, η οποία να επιτρέπει την με επιτυχία λειτουργία των ΙοΤ τεχνολογιών και της ανάλυσης δεδομένων, αφού αυτές εξασφαλίζουν με τη σειρά τους την αποτελεσματική λειτουργία του ψηφιακού διδύμου και την επίτευξη των στόχων του. Η επόμενη πρόκληση αφορά στα δεδομένα, τα οποία απαιτούνται για τη λειτουργία ενός ψηφιακού διδύμου· πρέπει να είναι ποιοτικά, χωρίς θόρυβο με ροή, η οποία να είναι συνεχής και χωρίς διακοπή. Στην περίπτωση κατά την οποία τα δεδομένα είναι χαμηλής ποιότητας ή μη συνεχή, τότε ελλοχεύει κίνδυνος για το

---

<sup>11</sup> <https://cutt.ly/uZCoJpQ>, (08/08/2022).

ψηφιακό δίδυμο να υπολειτουργεί, καθώς η λειτουργία του θα εδράζεται σε ελλιπή και φτωχά δεδομένα. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον, είναι γεγονός ότι η προστασία της ιδιωτικότητας και η ασφάλεια, που αφορούν στα ψηφιακά δίδυμα, έγκεινται σε μια επιπλέον πρόκληση, που πρέπει να αντιμετωπιστεί. Ο τεράστιος όγκος δεδομένων, αλλά και τα ευαίσθητα δεδομένα του συστήματος είναι οι δύο κύριοι παράγοντες, που διαμορφώνουν το ζήτημα της ασφάλειας των ψηφιακών διδύμων (Fuller et al., 2020).

Ακόμη, πέρα από τα ζητήματα εμπιστοσύνης και υπερβολικών προσδοκιών, που αναλύθηκαν ανωτέρω για τις IoT συσκευές και το AI, και τα οποία ενυπάρχουν και στα ψηφιακά δίδυμα, σημειώνεται ότι μια επιπρόσθετη πρόκληση αυτών είναι και το ότι δεν υπάρχει κάποια τυποποιημένη προσέγγιση για την μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων από τον αρχικό σχεδιασμό τους μέχρι και το στάδιο της προσομοίωσης. Καθίσταται επομένως αναγκαία η ανάπτυξη μιας τυποποιημένης προσέγγισης αναφορικά με την υλοποίηση ενός ψηφιακού διδύμου. Είναι εξάλλου γεγονός ότι οι τυποποιημένες προσεγγίσεις διασφαλίζουν την κατανόηση τόσο του τομέα και όσο και του ίδιου του χρήστη, ενώ παράλληλα εξασφαλίζουν την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ κάθε σταδίου της ανάπτυξης και της υλοποίησης του ψηφιακού διδύμου (Fuller et al., 2020).

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται λογισμικά ανάπτυξης της τεχνολογίας ψηφιακών διδύμων από μεγάλες εταιρίες, που χρησιμοποιούνται σήμερα στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής και όχι μόνο.

## **2.9 Κριτική σύνοψη κεφαλαίου**

Στον πυρήνα των τεχνολογιών της Industry 4.0 είναι η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, των οποίων ο εννοιολογικός προσδιορισμός επιδέχεται πολλαπλές προσεγγίσεις, δεδομένου ότι δύναται να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα από εφαρμογές. Η αναπαράσταση πραγματικών αντικειμένων στον ψηφιακό κόσμο, διαμέσου των ψηφιακών διδύμων, δίνει τη δυνατότητα για παρακολούθηση, προσομοίωση και πρόβλεψη διαφόρων λειτουργιών της βιομηχανικής επιχείρησης και οι ειδικοί διερευνούν ολοένα και περισσότερο τις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας. Η επικοινωνία του πραγματικού αντικειμένου με την

ψηφιακή αναπαράστασή του, στο πλαίσιο του ψηφιακού διδύμου, γίνεται διαμέσου αισθητήρων και ενεργοποιητών και αποτελεί καινοτομία σε σύγκριση με τις IoT συσκευές, όπου δεν είναι εφικτή η καταγραφή αλληλεπιδράσεων σε όλο τον κύκλο ζωής της συσκευής ή σε όλο τον κύκλο των παραγόμενων προϊόντων.

Η αξία των ψηφιακών διδύμων αφορά, επίσης, στο γεγονός ότι, διαμέσου αυτών, δίνεται η δυνατότητα να μοντελοποιηθούν περίπλοκες διαδικασίες και πολύπλοκα στοιχεία, τα οποία βρίσκονται σε μια συνεχή αλληλεπίδραση με τα περιβάλλοντά τους, για τα οποία δεν είναι εύκολο να γίνουν προβλέψεις με αποτελεσματικό τρόπο, οι οποίες μάλιστα να αφορούν σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής τους. Τα δεδομένα, τα οποία συλλέγονται διαμέσου κατάλληλων αισθητήρων, τελικά συγκεντρώνονται και αναλύονται με συνεχή τρόπο και σε πραγματικό χρόνο από το ψηφιακό δίδυμο. Η έννοια των ψηφιακών διδύμων οφείλει να επεκταθεί ακόμα περισσότερο, δεδομένου ότι δύναται να εφαρμοστεί ευρέως σε πολλά τεχνολογικά πεδία, τα οποία ξεφεύγουν από το πεδίο της βιομηχανίας. Μερικά μόνο από τα πεδία εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων είναι οι έξυπνες πόλεις και οι επιστήμες υγείας. Ειδικά, όμως, στον τομέα της βιομηχανίας, σημειώνεται ότι η αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων συνάδει με την ΠoT και τις επιταγές της Industry 4.0 στο τομέα της παραγωγής.

Πιο αναλυτικά, το ψηφιακό δίδυμο προσφέρει τη δυνατότητα καταγραφής της απόδοσης των μηχανημάτων και της γραμμής παραγωγής και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, κάτι το οποίο παρέχει με τη σειρά του τη δυνατότητα στην βιομηχανική επιχείρηση να προβλέψει προβλήματα πριν αυτά εμφανιστούν, να αυξήσει την ακρίβειά της, την αξιοπιστία και την απόδοσή της, την παραγωγικότητά της, αλλά και την ποιότητά της, καθώς και να εξοικονομήσει χρόνο, να μειώσει το κόστος της, αλλά και το ρίσκο της. Ειδικά εάν υπερκεραστούν οι προκλήσεις, οι οποίες αφορούν την εφαρμογή στην πράξη των ψηφιακών διδύμων, που ταυτίζονται με τις προκλήσεις των υπόλοιπων τεχνολογιών της Industry 4.0, τότε οι βιομηχανικές επιχειρήσεις θα είναι σε θέση να ωφεληθούν κατά το μέγιστο δυνατό από την πολλά υποσχόμενη τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων.

Στο πλαίσιο της ψηφιοποίησης της βιομηχανίας και της κοινωνίας γενικότερα, ελέω της Industry 4.0, το ψηφιακό δίδυμο, το οποίο απαιτεί έναν από τους πυλώνες των νέων αυτών τεχνολογιών, μπορεί μετά το στάδιο του σχεδιασμού του, να τροποποιείται κατάλληλα και, με αυτόν τον τρόπο, να βελτιστοποιείται η αποτελεσματικότητά του.

Ολοένα και περισσότερες επιχειρήσεις στον τομέα της βιομηχανίας προβαίνουν στη χρήση ψηφιακών διδύμων για την παρακολούθηση, την ανάλυση, τη διαχείριση και την προσομοίωση φυσικών περιουσιακών στοιχείων, αλλά και διαδικασιών, στις οποίες τελικώς προσθέτουν αξία, ειδικά εν συγκρίσει με τις συμβατικές μεθόδους, που υπήρχαν και εφαρμόζονταν στο παρελθόν. Εντός του έξυπνου εργοστασίου, και διαμέσου των ψηφιακών διδύμων, γίνεται πλήρης αντιστοίχιση ένα προς ένα ανάμεσα στα πραγματικά συστήματα και στα εικονικά συστήματα και στηρίζεται, ως προς τη λειτουργία της, στην ανάλυση στατικών ή δυναμικών δεδομένων μεγάλης διάστασης σε πραγματικό χρόνο και με συνεχόμενο ρυθμό, αλλά και στην αξιοποίηση λογισμικού ανοικτού κώδικα, το οποίο εξασφαλίζει την ευελιξία και τη διαλειτουργικότητα των λύσεων, που αναπτύσσονται.

Σημειώνεται ότι η αποτελεσματική αξιοποίηση των μεγάλων δεδομένων, με τη σειρά της, δύναται να συνδράμει στην ανάπτυξη μοντέλων υψηλής πιστότητας για συστήματα παραγωγής, τα οποία να επιτρέπουν τη διεξαγωγή αξιόπιστων προσομοιώσεων των συστημάτων παραγωγής. Μέσα από την ανατροφοδότηση, που δίνεται από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, καθίσταται δυνατό να προαχθεί η λειτουργία των συστημάτων παραγωγής, αλλά και να διορθωθούν τα ενδεχόμενα προβλήματα.

Αναφορικά με την προσομοίωση μηχανημάτων και περιουσιακών στοιχείων, προσφέρονται ένα ευρύ φάσμα από οφέλη στην βιομηχανική επιχείρηση. Πιο αναλυτικά, μέσα από την κατασκευή εικονικών μηχανών μέσα από την ενσωμάτωση κατασκευαστικών δεδομένων και την εισαγωγή κατάλληλων αισθητήρων, στο πλαίσιο της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, η βιομηχανική επιχείρηση μπορεί να προχωρήσει στην προσομοίωση των δυνατοτήτων των μηχανημάτων της με ασφαλή και οικονομικά αποδοτικό τρόπο, κάτι το οποίο ανοίγει το δρόμο για τη διάγνωση, αλλά και την πρόγνωση αστοχιών και προβλημάτων στο μέλλον. Οι λειτουργίες του εικονικού μηχανήματος είναι, φυσικά, καίριας σημασίας και στην ουσία καθορίζουν και την ποιότητα και τελικώς την αξιοπιστία των προσομοιώσεων.

Πέρα από την προσομοίωση των μηχανημάτων διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, σημειώνεται ότι είναι δυνατή η προσομοίωση και όλων των περιουσιακών στοιχείων της βιομηχανικής επιχείρησης. Η τελευταία εφαρμογή αυξάνει την αξία, τις νέες γνώσεις και την εικόνα σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας των περιουσιακών στοιχείων, κάτι το οποίο συμβάλλει σημαντικά στην κατανόηση και στην εκτίμηση του κατά πόσον τα περιουσιακά

στοιχεία της επιχείρησης χρήζουν συντήρησης. Η εικόνα σχετικά με την κατάσταση λειτουργίας των περιουσιακών στοιχείων της επιχείρησης δύναται να αποδοθεί διαμέσου της οπτικοποίησης δεδομένων για συγκεκριμένες ομάδες χρηστών. Στο πλαίσιο της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στην προσομοίωση μηχανημάτων και περιουσιακών στοιχείων εντάσσονται και τα αυτόνομα συστήματα, δηλαδή τα έξυπνα συστήματα, τα οποία δύνανται να φέρουν εις πέρας δύσκολες εργασίες χωρίς να χρειάζονται λεπτομερή προγραμματισμό με ρητό τρόπο, αλλά ούτε και τον ανθρώπινο έλεγχο.

Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να εφαρμοστούν και στο πλαίσιο της προσομοίωσης γραμμών παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, τα ψηφιακά δίδυμα είναι σε θέση να προάγουν συνεχώς την λειτουργία των έξυπνων και αυτόνομων συστημάτων παραγωγής εντός των έξυπνων εργοστασίων, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας τα κόστη για την επιχείρηση. Το σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι το να γίνει κατανοητό ότι το ψηφιακό δίδυμο είναι διαθέσιμο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός συστήματος παραγωγής και σε κάθε στάδιο παραγωγής το μοντέλο βελτιώνεται με βάση τα προηγούμενα στάδια, ενώ μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές της ενισχυτικής μάθησης.

Πέρα από τα οφέλη στο ίδιο το σύστημα παραγωγής, τα ψηφιακά δίδυμα προσφέρουν και τη δυνατότητα της ψηφιακής ιχνηλασιμότητας των προϊόντων και συμβάλλουν στη βιωσιμότητα της αλυσίδας εφοδιασμού, στον επανασχεδιασμό, όποτε αυτός κρίνεται αναγκαίος, των ροών αξίας, καθώς και στη βέλτιστη λήψη αποφάσεων βάσει των προσομοιώσεων, οι οποίες είναι πιο προηγμένες εν συγκρίσει με τις συμβατικές προσομοιώσεις, οι οποίες εδράζονταν στους νόμους της Φυσικής. Επιπροσθέτως, η εξατομικευμένη παραγωγή είναι ένα ακόμη πεδίο όπου αξιοποιούνται τα ψηφιακά δίδυμα, στο πλαίσιο πάντα των εφαρμογών τους στην παραγωγική διαδικασία στον βιομηχανικό τομέα. Η σημασία της εξατομικευμένης παραγωγής έγκειται στο ότι είναι αναγκαίο για τις γραμμές παραγωγής να είναι ικανές να εκτελούν συνεχώς ευέλικτη αναδιαμόρφωση του συστήματος και να διασφαλίζουν την αυτονομία της διαδικασίας, ώστε να προσαρμόζονται σε αλλαγές, αλλά και σε νέες και πολλές φορές εξατομικευμένες προσφορές προϊόντων. Τέλος, διαμέσου της αξιοποίησης των ψηφιακών διδύμων στα συστήματα παραγωγής, καθίσταται εφικτός ο χρονοπρογραμματισμός των επιμέρους εργασιών παραγωγής, αλλά και η ανίχνευση των ανωμαλιών και των σφαλμάτων.

### **3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝ ΟΙ ΕΤΑΙΡΙΕΣ FUJITSU, GENERAL ELECTRIC, SIEMENS, SAP, AUTODESK & ANSYS**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Η πρόοδος, που έχει σημειωθεί στις IoT τεχνολογίες και στο 5G, έχει οδηγήσει σε ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, τα οποία, όπως διεφάνη ανωτέρω, ψηφιοποιούν τον πραγματικό κόσμο σε πραγματικό μάλιστα χρόνο, έτσι ώστε τα δεδομένα να μπορούν να αποδώσουν αξία και διαμέσου της αποθήκευσής τους στο υπολογιστικό νέφος, να καθίσταται δυνατή η χρήση τους, χωρίς να είναι αναγκαία γνωστό από ποια συσκευή προήλθαν, συμβάλλοντας έτσι σε αυτό που ονομάζεται διαθεσιμότητα δεδομένων (data availability). Βασική προϋπόθεση, όπως διεφάνη, για την κατασκευή ενός ψηφιακού διδύμου είναι η ικανότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ροής με υψηλή ταχύτητα και να γίνονται προσθήκες ή αλλαγές στην επεξεργασία χωρίς διακοπή των υπηρεσιών (Kato et al., 2021; Matsumoto et al., 2020).

Οι προαναφερόμενες υπηρεσίες έχουν, ήδη στις μέρες μας, ξεκινήσει να αξιοποιούνται με εμπορικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο των εταιριών, τα δεδομένα του πραγματικού κόσμου συλλέγονται διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων και μεταφέρονται ή, με άλλα λόγια, αποθηκεύονται στο υπολογιστικό νέφος. Η ποσότητα των δεδομένων αυτών είναι εξαιρετικά μεγάλη, οπότε και δύναται να αξιοποιηθούν σε ένα ευρύ πλήθος εφαρμογών, μερικές εκ των οποίων είναι η ανάλυση, η οπτικοποίηση, αλλά και η διεξαγωγή προβλέψεων. Οι εφαρμογές αυτές χρήζουν αξιοποίησης όλων των τεχνολογιών και καινοτομιών, οι οποίες αφορούν τα μεγάλα δεδομένα, όπως είναι οι τεχνικές ανάλυσης και οπτικοποίησής τους, αλλά και οι διάφοροι αλγόριθμοι ML και AI, που επιτρέπουν τη διεξαγωγή προβλέψεων διαμέσου της κατασκευής μοντέλων (Matsumoto et al., 2020).

Ερευνητές εκτιμούν ότι στο εγγύς μέλλον θα προσφέρεται η δυνατότητα για τις διάφορες υπηρεσίες και τα δεδομένα, τα οποία συλλέγονται και που προέρχονται από πολλές και διαφορετικές βιομηχανίες, να μπορούν τελικά να συνδυαστούν μεταξύ τους, με σκοπό την

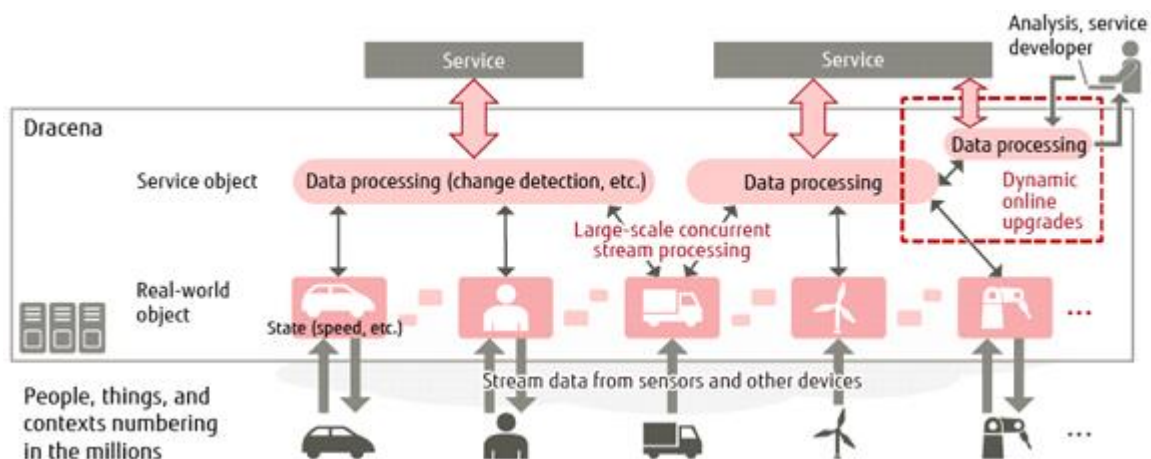


ανάπτυξη προηγμένων τρόπων ελέγχου του πραγματικού κόσμου σε πραγματικό χρόνο. Μια τεχνολογία, η οποία αναμένεται να διαδραματίσει μείζονα ρόλο στην επίτευξη των ανωτέρω, είναι εκείνη των ψηφιακών διδύμων. Ένα παράδειγμα τεχνολογίας, η οποία θέτει στόχους όπως οι προαναφερθέντες, είναι και εκείνη, που έχει αναπτυχθεί από την εταιρία Fujitsu (Matsumoto et al., 2020).

### 3.2 Fujitsu

Η εταιρία Fujitsu ανέπτυξε, μέσα στα εργαστήριά της, μια ειδικά διαμορφωμένη πλατφόρμα, η οποία ονομάζεται *Dracena*<sup>12</sup> (Dynamically-Reconfigurable Asynchronous Consistent Event processing Architecture), η οποία βασίζεται σε μια δυναμικά επαναδιαμορφώσιμη ασύγχρονη πλατφόρμα, που επεξεργάζεται με συνεπή τρόπο διαδικασίες ή, με άλλα λόγια, αποτελεί μια πλατφόρμα ψηφιακού δίδυμου λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Πιο αναλυτικά, η συγκεκριμένη πλατφόρμα δύναται να αξιοποιηθεί με σκοπό την ευέλικτη, αλλά και γρήγορη ανάπτυξη υπηρεσιών, κάτι το οποίο καθίσταται εφικτό, από κατασκευαστικής πλευράς, διαμέσου της δημιουργίας ψηφιακών διδύμων, που με τη σειρά τους εδράζονται, αναφορικά με τη λειτουργία τους, στο νέφος και αφορούν ανθρώπους, πράγματα και στοιχεία από τον πραγματικό κόσμο (Matsumoto et al., 2020).

Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική της Dracena.



(Πηγή: <https://cutt.ly/mVzsNEb>)

<sup>12</sup> <https://cutt.ly/FXz8RtB>, (12/08/2022).

Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη πλατφόρμα παρέχει τη δυνατότητα της επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ροής σε πραγματικό χρόνο, αλλά και να προβαίνει σε πραγματοποίηση προσθηκών και αλλαγών χωρίς να καθίσταται αναγκαία η διακοπή της λειτουργίας του συστήματος (Matsumoto et al., 2020; Yamaoka et al., 2019). Ακόμη, η πλατφόρμα *Dracena* δύναται να πραγματοποιήσει ανανέωση (update) του συστήματος, όταν αυτό κριθεί αναγκαίο, χωρίς να είναι απαραίτητη η εκ νέου διακοπή της λειτουργίας του συστήματος, κάτι το οποίο, χωρίς αμφιβολία, προσθέτει μεγάλη ευελιξία στην συγκεκριμένη πλατφόρμα, καθώς δεν διαταράσσεται η απρόσκοπτη λειτουργία της επιχείρησης (Matsumoto et al., 2020).

Ακόμη, σημειώνεται ότι η ενδεχόμενη χρονική καθυστέρηση ορισμένου συμβάντος απορροφάται σε επίπεδο πλατφόρμας, κάτι το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι οι προγραμματιστές υπηρεσιών, οι οποίοι περιγράφουν την επεξεργασία με βάση το χρόνο του συμβάντος δεν χρειάζεται να λάβουν υπόψη τους τη χρονική αυτή υστέρηση και, επίσης, δεν επισκιάζεται η τελική αποτελεσματικότητα της ανάπτυξης υπηρεσιών (Onishi et al., 2020).

Αναφορικά με τον τρόπο σύνδεσης και επικοινωνίας του πραγματικού κόσμου με τον ψηφιακό κόσμο, μέσα στο περιβάλλον της υπό εξέταση πλατφόρμας, σημειώνεται ότι κάθε συσκευή του πραγματικού κόσμου μπορεί να συγχρονίσει την κατάστασή της με το αντίστοιχο εικονικό αντικείμενο εντός της πλατφόρμας *Dracena*, διαμέσου της αποστολής των δεδομένων κατάστασης στην πλατφόρμα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η συμπεριφορά κάθε εικονικού αντικείμενου, δηλαδή η επεξεργασία δεδομένων στο αντικείμενο, δύναται να είναι ευέλικτα προσδιορισμένη μέσω των πρόσθετων μηχανισμών της υπό εξέταση πλατφόρμας (Yamaoka et al., 2019).

Προκειμένου αυτή η πλατφόρμα να κατασκευαστεί και διαμέσου αυτής, η Fujitsu να υπερκεράσει τα προβλήματα του παρελθόντος, απαιτεί την ικανότητα χειρισμού μεγάλου όγκου δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο σε πραγματικό χρόνο, συνδυάζοντας παράλληλα τη δυνατότητα λειτουργίας χωρίς διακοπή με την ευέλικτη ανάπτυξη και βελτίωση διαφορετικών τύπων υπηρεσιών, οι οποίες να λειτουργούν με τους ανθρώπους, τα πράγματα και τα περιβάλλοντα του πραγματικού κόσμου. Από πλευράς τεχνολογίας, η *Dracena* χρησιμοποιεί IoT συσκευές, ψηφιακά δίδυμα, κατάλληλα πρόσθετα (plug-in) προγράμματα, προηγμένο πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων μεγάλης διάστασης, ενώ ιδιαίτερη μνεία χρειάζεται, επίσης, το γεγονός ότι η

εν λόγω πλατφόρμα χρησιμοποιεί λογισμικό ανοικτού κώδικα, όπως είναι το Apache Kafka<sup>13</sup> και το Apache Flink<sup>14</sup> (Matsumoto et al., 2020; Onishi et al., 2020).

Πιο αναλυτικά, διαμέσου των πρόσθετων προγραμμάτων της πλατφόρμας *Dracena*, γίνεται εφικτή η σύνδεση με δυναμικό τρόπο σε ένα αντικείμενο των αναγκαίων λογικών επεξεργασίας δεδομένων. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός έχει αναδειχθεί από ερευνητές σε ζωτικής σημασίας, διότι δίνει στην ουσία τη δυνατότητα στο ψηφιακό δίδυμο να δρα ευέλικτα και να προσφέρει υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο, κάτι το οποίο για να γίνει εφικτό απαιτεί, με τη σειρά του, την επεξεργασία δεδομένων, τα οποία δέχεται το σύστημα σε μια ροή, δηλαδή σε πραγματικό χρόνο και συνεχόμενα (Yamaoka et al., 2019).

Από πλευράς κατασκευής και λειτουργίας, για να γίνει κάτι τέτοιο δυνατό, κάθε πρόσθετο πρόγραμμα παρακολουθεί και είναι υπεύθυνο για συγκεκριμένες καταστάσεις και η ενημέρωση αυτών των καταστάσεων είναι και αναγνωρίζεται ως ένα συμβάν, το οποίο ενεργοποιεί, με τη σειρά του, τη λογική του πρόσθετου προγράμματος. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η εκτέλεση της συγκεκριμένης λογικής και, τέλος, εξάγονται ορισμένα αποτελέσματα, τα οποία προέρχονται από την επεξεργασία της λογικής του πρόσθετου προγράμματος. Τα αποτελέσματα, τα οποία παράγονται, με τη σειρά τους, αποτελούν ενημέρωση μιας άλλης κατάστασης ή αποτελούν ένα πακέτο δεδομένων για ένα αντικείμενο που ακολουθεί, δηλαδή αποτελούν ένα συμβάν. Αυτό το συμβάν, εντός της πλατφόρμας *Dracena*, δύναται με τη σειρά του να επικαλεστεί άλλα πρόσθετα, δηλαδή η διαδικασία η οποία περιγράφεται, λειτουργεί με αναδρομικό τρόπο και, στην ουσία, διάφορα αντικείμενα συνδέονται με άλλα αντικείμενα διαμέσου των πρόσθετων προγραμμάτων της πλατφόρμας, με σκοπό την ομαλή και αποτελεσματική συνολική της λειτουργία (Yamaoka et al., 2019).

Η πλατφόρμα *Dracena* επιτρέπει να γίνονται δυναμικά προσθήκες ή αλλαγές σε προγράμματα επεξεργασίας δεδομένων, χωρίς να χρειάζεται να τερματιστούν οι διαδικτυακές υπηρεσίες και χωρίς να διακυβεύεται η επεκτάσιμη επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, η οποία ανέρχεται σε εκατομμύρια. Το Σχήμα 3.2 απεικονίζει διαγραμματικά τον τρόπο με τον οποίο εκτελούνται οι ενημερώσεις υπηρεσίας χωρίς διακοπή της λειτουργίας.<sup>15</sup> Όταν γίνεται αναβάθμιση ή τροποποίηση στο πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων, η κλάση Java του

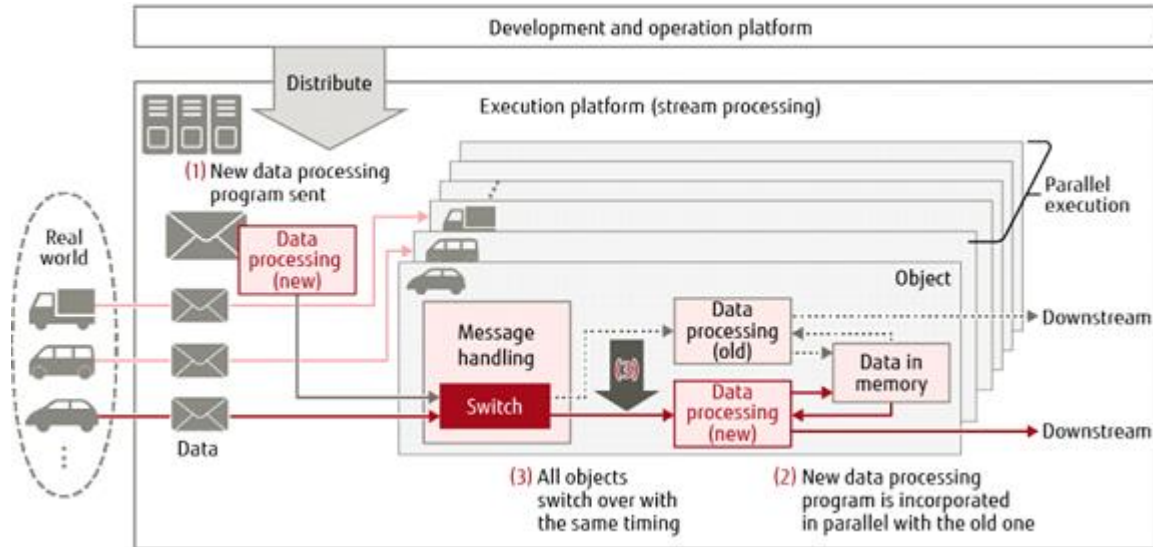
<sup>13</sup> <https://cutt.ly/OXz8N8k>, (12/08/2022).

<sup>14</sup> <https://cutt.ly/hXz807R>, (12/08/2022).

<sup>15</sup> βλ. σημείο (3) του διαγράμματος του Σχ. 4.2

προγράμματος διανέμεται στα αντικείμενα ως μήνυμα με τον ίδιο τρόπο ως γεγονός.<sup>16</sup> Στη συνέχεια, ο μηχανισμός ανάκλασης Java χρησιμοποιείται για να ενσωματώσει δυναμικά το νέο πρόγραμμα επεξεργασίας.<sup>17</sup> Τέλος, η ενημέρωση της υπηρεσίας ενεργοποιείται, συντονίζοντας το χρονοδιάγραμμα μετάβασης στο νέο πρόγραμμα επεξεργασίας.<sup>18</sup>

**Σχήμα 3.2:** Υλοποίηση ενημερώσεων υπηρεσίας χωρίς διακοπή λειτουργίας.



(Πηγή: <https://cutt.ly/mVzsNEb>)

Αναφορικά με τα πεδία εφαρμογής της εν λόγω πλατφόρμας, σημειώνεται ότι η πλατφόρμα *Dracena* της εταιρίας Fujitsu δύναται να χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα από τομείς, ένας εκ των οποίων είναι και η βιομηχανία: πιο αναλυτικά, η προαναφερθείσα πλατφόρμα δύναται να αξιοποιηθεί στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Πράγματι, η λήψη πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, η οποία είναι εφικτή διαμέσου της πλατφόρμας *Dracena*, για τις συνεχώς μεταβαλλόμενες πραγματικές συνθήκες μιας περιοχής δύναται να συνδράμει στην προαγωγή της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας της αλυσίδας ανεφοδιασμού. Ειδικότερα, η χρήση της συγκεκριμένης πλατφόρμας συμβάλλει στη γνώση της κατάστασης των εμπορευμάτων σε όλα τα στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού, αλλά και στην πρόοδο των εργασιών στα κέντρα διανομής και στις αποθήκες κατά μήκος της διαδρομής. Στο εγγύς μέλλον, τα εργαστήρια της εταιρίας Fujitsu

<sup>16</sup> βλ. σημείο (1) του διαγράμματος του Σχ. 4.2

<sup>17</sup> βλ. σημείο (2) του διαγράμματος του Σχ. 4.2

<sup>18</sup> βλ. σημείο (3) του διαγράμματος του Σχ. 4.2

έχουν θέσει ως σκοπό τους να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής της πλατφόρμας *Dracena*, ενώ επίσης επιδιώκουν να δημιουργήσουν την επόμενη γενιά ψηφιακών διδύμων, τα οποία να είναι σε θέση να ενσωματώνουν χαρακτηριστικά, όπως είναι η αυτόματη μάθηση για μοντέλα του πραγματικού κόσμου (Matsumoto et al., 2020).

Πράγματι, εν έτη 2022, η Fujitsu ξεκινάει την προσπάθεια να προωθήσει την λεγόμενη «κοινωνία εμπιστοσύνης» («*Trusted Society*»)<sup>19</sup>. Υπό τον συγκριμένο όρο, η εταιρία στοχεύει στην προώθηση μιας ασφαλούς και βιώσιμης κοινωνίας, με την εφαρμογή τεχνολογιών για την επίλυση κοινωνικών προβλημάτων με τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων μερών. Πιο αναλυτικά, η Fujitsu συγκεντρώνει του πόρους της, αναφορικά με τις IoT τεχνολογίες και τις τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων και ξεκινάει σχετική συνεργασία με την εταιρία Hexagon<sup>20</sup>. οι δύο εταιρείες θα συνδυάσουν τις τεχνολογίες και τις λύσεις ψηφιακού δίδυμου, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων IoT, της επεξεργασίας δεδομένων, της ανάλυσης τεχνητής νοημοσύνης και της προηγμένης οπτικοποίησης δεδομένων στο υπολογιστικό νέφος, καθώς και της υπολογιστικής υποδομής υψηλής απόδοσης, με σκοπό να επιτύχουν το βέλτιστο κοινό αποτέλεσμα.<sup>21</sup> Αναφορικά με την πλατφόρμα *Dracena*, τα εργαστήρια της εταιρίας Fujitsu θέτουν ως σκοπό τους να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής της πλατφόρμας, ενώ την ίδια στιγμή θα επιδιωχθεί η κατασκευή της επόμενης γενιάς ψηφιακών διδύμων, τα οποία θα είναι σε θέση να ενσωματώνουν χαρακτηριστικά, όπως είναι η αυτόματη μάθηση για μοντέλα του πραγματικού κόσμου.

### 3.3 General Electric

Πέρα από την Fujitsu, και άλλες μεγάλες εταιρίες, όπως είναι η General Electric (GE), η οποία μελετάται στην παρούσα ενότητα, αλλά και η Siemens, η οποία μελετάται στην επόμενη ενότητα, έχουν προσαρμόσει τις έννοιες και τις αρχές της Industry 4.0 στις λειτουργίες τους και έχουν ουσιαστικά ενσωματώσει τη φυσική παραγωγή και την γενική λειτουργία της επιχείρησης με το μοντέλο του ψηφιακού δίδυμου και την έξυπνη τεχνολογία, την τεχνητή νοημοσύνη και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων, πολλές φορές καινοτομώντας στο χώρο τους και όντας πρωτοπόροι στην αξιοποίηση τεχνολογικών λύσεων στον τομέα της βιομηχανίας. Όλα αυτά έχουν γίνει με

---

<sup>19</sup> <https://cutt.ly/rXz4UML>, (12/08/2022).

<sup>20</sup> <https://cutt.ly/yXz41Gr>, (12/08/2022).

<sup>21</sup> <https://cutt.ly/CXe2AcN>, (12/08/2022).

σκοπό την εξασφάλιση καλύτερης συνδεσιμότητας και την προαγωγή της παραγωγικότητας, της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας, με απώτερο σκοπό την επίτευξη ανταγωνιστικότητας (Marmolejo-Saucedo, 2020; Yasin et al., 2021).

Ένα πεδίο, το οποίο έχει απασχολήσει πολύ την GE, είναι εκείνο της διαχείρισης απόδοσης περιουσιακών στοιχείων (Asset Performance Management, APM), που με απλά λόγια αφορά σε μια σουίτα λογισμικού και υπηρεσιών, η οποία έχει σχεδιαστεί με σκοπό να συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των περιουσιακών στοιχείων, αλλά και της αποδοτικότητας της λειτουργίας και της διαχείρισης όλου του εξοπλισμού, ο οποίος χρησιμοποιείται από την GE, καθώς και ολόκληρου του εργοστασίου συνολικά. Η διαχείριση της απόδοσης των περιουσιακών στοιχείων από την GE είναι διαθέσιμη και ως υπηρεσία, η οποία παρέχεται διαμέσου του υπολογιστικού νέφους, αλλά και ως υπηρεσία, που συνίσταται σε λογισμικό, το οποίο βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της εταιρίας τοπικά και όχι στο υπολογιστικό νέφος. Στο πλαίσιο της προαγωγής της απόδοσης των περιουσιακών στοιχείων της εταιρίας, η GE προβαίνει στη χρήση ψηφιακών διδύμων. Διαμέσου της χρήσης των ψηφιακών διδύμων, η GE κατορθώνει να πραγματοποιήσει προηγμένες αναλύσεις βιομηχανικών δεδομένων με σκοπό την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης περιουσιακών στοιχείων και διεργασιών (Marmolejo-Saucedo, 2020; Yasin et al., 2021).

Ειδικότερα, η GE έχει υιοθετήσει το μοντέλο του ψηφιακού διδύμου, διότι έχει κρίνει ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία αποφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, με τα κυριότερα εκ των οποίων να είναι η αυξημένη αξιοπιστία, ο μειωμένος κίνδυνος, η συντήρηση, καθώς και ο ταχύτερος χρόνος απόδοσης. Μάλιστα, εν έτη 2021, η εταιρία ισχυρίστηκε ότι έχει εξοικονομήσει 1,6 δισεκατομμύρια δολάρια για τους πελάτες της μέσω δυνατοτήτων, οι οποίες προσφέρονται διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων (Yasin et al., 2021). Σημειώνεται ότι η χρήση ψηφιακών διδύμων από την GE δεν είναι κάτι καινούργιο· η συγκεκριμένη εταιρία έχει προβεί στη χρήση των ψηφιακών διδύμων κατά την παραγωγική της διαδικασία, αλλά και με σκοπό την παρακολούθηση και την διαχείριση του εξοπλισμού της, καθώς και τη γενικότερη λειτουργία της ήδη από το 2013 και, ως εταιρία, εκτιμά ότι τα ψηφιακά δίδυμα έχουν συμβάλλει στην αποφυγή ετήσιων απωλειών ύψους 1 δισεκατομμυρίου δολαρίων Αμερικής από τα περιουσιακά της στοιχεία, ενώ η ίδια εταιρία έχει ξεκινήσει να αξιοποιεί την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων και για τον τομέα της Υγείας και συγκεκριμένα στον τομέα της προσομοίωσης και της παρακολούθησης των λειτουργιών των νοσοκομείων (Saracco, 2019). Μάλιστα, ο Marmolejo-

Saucedo (2020) τονίζει ότι η GE αποτελεί καινοτόμο εταιρία αναφορικά με την χρήση ψηφιακών διδύμων: συγκεκριμένα, αποτελεί μια πρωτοπόρο εταιρία στην ανάπτυξη τεχνολογικών λύσεων, με σκοπό την κατανόηση, την πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης, προκειμένου να επιτευχθεί η βελτίωση των επιχειρηματικών αποτελεσμάτων.

Επισημαίνεται ότι η GE διαθέτει την IoT πλατφόρμα *Predix*<sup>22</sup>, η οποία διαθέτει μια ευρεία συλλογή εργαλείων, που δίνουν τη δυνατότητα στους χρήστες να αναπτύσσουν, να οπτικοποιούν, να αναλύουν και να διαχειρίζονται δεδομένα σε διακομιστές υπολογιστικού νέφους. Η πλατφόρμα *Predix* είναι μια εμπορική IoT πλατφόρμα, η οποία προσφέρεται ως υπηρεσία από την GE σε τρίτους. Ορισμένοι από τους διακομιστές νέφους, που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της πλατφόρμας *Predix* της εταιρίας GE, είναι οι Amazon Web Services (AWS)<sup>23</sup>, Microsoft Azure<sup>24</sup>, Google Cloud<sup>25</sup>, IBM Watson<sup>26</sup>, οι οποίες αφορούν σε εταιρίες, που διαθέτουν πλατφόρμες πολλαπλών χρήσεων, οι οποίες είναι πιο ευέλικτες (Chen et al., 2020). Ακόμη, η πλατφόρμα *Predix* προσφέρει, επιπροσθέτως, και κατανεμημένη υπολογιστική, εργαλεία ανάλυσης δεδομένων, πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης και συστήματα διαχείρισης δεδομένων και συσκευών. Η υπό εξέταση πλατφόρμα προσφέρει τη δυνατότητα της ενσωμάτωσης ιστορικών δεδομένων, δηλαδή δεδομένων που αφορούν μεγάλο παρελθοντικό χρονικό διάστημα, με δεδομένα τα οποία παράγοντα σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό τη δημιουργία μοντέλων, που θα προβλέπουν την φθορά των βιομηχανικών διαδικασιών και, εν συνεχεία, θα προτείνουν τροποποιήσεις προς βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας, αλλά και των στρατηγικών συντήρησης των μηχανημάτων. Οι εικονικές προσομοιώσεις, οι οποίες είναι δυνατές μέσα από την πλατφόρμα *Predix* της GE, προσφέρουν τη δυνατότητα της διεξαγωγής εκπαιδεύσεων και εύρεσης βέλτιστων βιομηχανικών λύσεων σε προβλήματα που ανακύπτουν (Chen et al., 2020).

Πιο αναλυτικά, στην GE η συνηθισμένη ανίχνευση ανωμαλιών στον κύκλο παραγωγής προϊόντων και υπηρεσιών δύναται να πραγματοποιήσει προβλέψεις, με χρονικό ορίζοντα είκοσι έως και τριάντα ημερών. Το τελευταίο αναμένεται να αλλάξει και να διαμορφωθεί στις εξήντα ημέρες και αυτή η βελτίωση είναι εφικτή διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων. Η συγκεκριμένη δυνατότητα των ψηφιακών διδύμων θα συνδράμει στον προγραμματισμό των

---

<sup>22</sup> <https://cutt.ly/IXz7DQj>, (12/08/2022).

<sup>23</sup> <https://cutt.ly/4Xz7B7t>, (12/08/2022).

<sup>24</sup> <https://cutt.ly/2Xz72D3>, (12/08/2022).

<sup>25</sup> <https://cutt.ly/uXz78JS>, (12/08/2022).

<sup>26</sup> <https://cutt.ly/6Xz5qpB>, (12/08/2022).



διορθωτικών μέτρων και μάλιστα προληπτικά, αφού θα διαθέτει και θα αξιοποιεί όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες, κάτι το οποίο με τη σειρά του οδηγεί τόσο στην κατανόηση όσο και στην πρόβλεψη των ενδεχόμενων μελλοντικών αστοχιών (General Electric Company, 2016).

Επιπροσθέτως, επειδή όπως σημειώθηκε, η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων έχει αναπτυχθεί μέσα στην πλατφόρμα *Predix*, όλοι οι εμπλεκόμενοι υπάλληλοι αλλά και συνεργάτες έχουν πρόσβαση σε αυτήν. Δηλαδή όλοι οι εταίροι της GE βρίσκονται εντός του *Predix*, δηλαδή έχουν πρόσβαση μέσα στο συγκεκριμένο οικοσύστημα των ψηφιακών διδύμων. Ένας από τους σημαντικότερους συνεργάτες της GE είναι η εταιρία Infosys<sup>27</sup>, η οποία υιοθέτησε την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων κατά το έτος 2015. Ο κυριότερος και πρωτεύων σκοπός αυτού του πρώιμου σταδίου υιοθέτησης της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων από την εταιρία Infosys ήταν να επιτρέψει τις έγκαιρες και έγκυρες προβλέψεις αστοχίας για μια πληθώρα βασικών στοιχείων, όπως είναι η προσγείωση σε μια πτήση, αλλά και να επιτρέψει, κατ' αυτόν τον τρόπο, την λήψη έγκαιρων προφυλάξεων απέναντι στις αστοχίες.

### 3.4 SIEMENS

Αναφορικά με τα ψηφιακά δίδυμα σήμερα, σύμφωνα πάντα με την Siemens (2020), το ενδιαφέρον έχει εστιάσει αφενός στον επιχειρησιακό τομέα, καθώς δίνεται η δυνατότητα στα ψηφιακά δίδυμα να προσαρμόζονται όταν το πραγματικό προϊόν υπόκειται σε αλλαγές και αφετέρου στις προσομοιώσεις, με απώτερο σκοπό την πρόβλεψη ειδικά ελέω της ανάγκης συντήρησης ή επισκευής των μηχανημάτων, ζητήματα τα οποία μελετήθηκαν σε προηγούμενες ενότητες. Σημειώνεται ότι ο συνδυασμός τεχνολογιών ML και AI, αλλά και προσομοίωσης, θα δώσει τη δυνατότητα για βελτίωση της ροής εργασιών, αλλά και δυνατότητες για τη δημιουργία διεπαφών χρήστη, οι οποίες, με τη σειρά τους, θα επιτρέπουν τη χρήση των εργαλείων όχι μόνο από τους ειδικούς, αλλά και από μη ειδικούς χρήστες. Μέχρι το 2030, αναμένεται για τα εργαλεία, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ψηφιακών διδύμων, να απλουστευτούν και να είναι διαθέσιμα και προσπελάσιμα για όλους (Siemens, 2020).

Η Siemens συμβάλλει με επιτυχία στην ψηφιοποίηση των κτιρίων, με βάση το ολοκληρωμένο χαρτοφυλάκιο της, τις τεχνολογίες αιχμής και τη βαθιά τεχνογνωσία της. Η

---

<sup>27</sup> <https://cutt.ly/nVcjkeX>, (22/09/2022).



μοναδική ικανότητα της Siemens να αναλύει ένα συνδυασμό στατικών και δυναμικών δεδομένων οδηγεί την ανάλυση δεδομένων και τις υπηρεσίες, που βασίζονται σε δεδομένα, στο επόμενο επίπεδο. Πιο αναλυτικά, η ίδια εταιρία δημιούργησε το λογισμικό *MindSphere*<sup>28</sup>, το οποίο δημιουργήθηκε και έγινε διαθέσιμο κατά το έτος 2017. Το λογισμικό *MindSphere* αφορά σε ένα λειτουργικό σύστημα IoT τεχνολογίας, το οποίο είναι ανοικτού κώδικα και, ως προς τη λειτουργία του, εδράζεται στο υπολογιστικό νέφος, ενώ δρα ως πάροχος των ανωτέρω υπηρεσιών, με έναν ανθρωποκεντρικό τρόπο και βάζοντας στο επίκεντρο συγκεκριμένα το χρήστη του συστήματος (Ivanov et al., 2020; Sepasgozar, 2021; Siemens, 2018; Taylor et al., 2020).

Ιδιαίτερα στον τομέα της βιομηχανίας, η εταιρία Siemens έχει υποστηρίξει κατά το έτος 2020 ότι οι εξελίξεις, οι οποίες πραγματοποιούνται στον τομέα των ψηφιακών διδύμων, αφορούν ουσιαστικά σε έναν καίριο παράγοντα αναφορικά με τα αυτόνομα συστήματα παραγωγής του μέλλοντος. Αναλυτικότερα, τα ψηφιακά δίδυμα οφείλουν να διαδραματίσουν έναν υποστηρικτικό ρόλο, συγκεντρώνοντας πληροφορίες σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του προϊόντος και καθιστώντας τις διαθέσιμες στα επόμενα στάδια του παραγωγικού συστήματος (Taylor et al., 2020). Πράγματι, τα ψηφιακά δίδυμα, τα οποία χρησιμοποιούνται από την εταιρία Siemens στον τομέα της βιομηχανίας, με σκοπό την παρακολούθηση των γραμμών παραγωγής, παραμένουν ενεργά και ενσωματωμένα σε όλες τις φάσεις της λειτουργίας και της συντήρησης του συστήματος (Zborowski, 2018).

Ειδικά η πλατφόρμα *MindSphere* της εταιρίας Siemens δύναται να αξιοποιηθεί και στον βιομηχανικό τομέα, αφού στοχεύει στο να δώσει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να ψηφιοποιήσουν τις διαδικασίες τους και να εφαρμόσουν λύσεις, οι οποίες παρέχονται διαμέσου της χρήσης ψηφιακών διδύμων (Taylor et al., 2020), όπως αναφέρθηκε και ανωτέρω. Μάλιστα, η Siemens έχει υποστηρίξει ότι οι εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας αποτελούν βασικό παράγοντα για τα αυτόνομα συστήματα παραγωγής του μέλλοντος, αφού τα ψηφιακά δίδυμα στην ουσία θα αποτελέσουν το κύριο μέσο λήψης και παροχής πληροφοριών στα διάφορα στάδια του συστήματος παραγωγής (Taylor et al., 2020).

Όσον αφορά στις δυνατότητες της πλατφόρμας *MindSphere*, αξίζει να τονιστεί ότι διαμέσου αυτής, καθίσταται δυνατή η σύνδεση φυσικών συσκευών με τον ψηφιακό κόσμο, η προσφορά εύκολης, αλλά και συνάμα ασφαλούς παροχής και μεταφοράς δεδομένων από μια πύλη

---

<sup>28</sup> <https://cutt.ly/AXz5nmn>, (12/08/2022).

IoT στο νέφος της πλατφόρμας (Ivanov et al., 2020). Η πλατφόρμα της Siemens προσφέρει τη δυνατότητα της αποθήκευσης επιχειρησιακών δεδομένων και, μάλιστα, αυτό είναι ένα από τα δυνατά σημεία της και μια από τις σημαντικότερες προσφορές της στον επιχειρησιακό κόσμο (Sepasgozar, 2021).

Την ίδια στιγμή, η συγκεκριμένη πλατφόρμα της Siemens επιτρέπει τις επιχειρηματικές συνεργασίες, καθώς οι προγραμματιστές δύνανται όχι μόνο να αναπτύσσουν και να εκτελούν εφαρμογές, αλλά ταυτόχρονα να τις μοιράζονται με άλλους προγραμματιστές εντός του εικονικού περιβάλλοντος της υπό εξέταση πλατφόρμας. Ακόμη, πέρα από το γεγονός ότι η πλατφόρμα *MindSphere* παρέχει εξειδικευμένες βιομηχανικές εφαρμογές και ψηφιακές υπηρεσίες, δίνει επιπροσθέτως τη δυνατότητα της υλοποίησης ψηφιακών δίδυμων, καθώς το λογισμικό της είναι εξαιρετικά προηγμένο και δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπρόσθετων λειτουργιών (Taylor et al., 2020).

Τέλος, σύμφωνα με τους Ivanov και συν. (2020), μερικά από τα πλεονεκτήματα της πλατφόρμας *MindSphere* είναι η γραφική διεπαφή της, η δυνατότητα μεταφόρτωσης συνόλων δεδομένων για μοντέλα ML πρόβλεψης, η δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων με άλλο λογισμικό της Siemens και η δυνατότητα ανάπτυξης εφαρμογών, ενώ οι ίδιοι επιστήμονες επεσήμαναν ως μειονέκτημα της υπό εξέταση πλατφόρμας την τιμολόγησή της, εννοώντας ότι είναι ακόμη ακριβή η απόκτησή της (Ivanov et al., 2020).

### 3.5 SAP

Οι τεχνολογίες, οι οποίες χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο του λογισμικού της SAP, είναι οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους, οι οποίες αξιοποιούνται κατά κύριο λόγο στη συνεργασία, τα συνδεδεμένα προϊόντα διαμέσου IoT τεχνολογίας και τεχνολογίας ψηφιακών διδύμων, και η ανάλυση δεδομένων με εργαλεία μηχανικής των δεδομένων και οπτικοποίησης των δεδομένων. Συγκεκριμένα, διαμέσου της χρήσης ψηφιακών διδύμων καθίσταται δυνατή η προσομοίωση και η αξιοποίηση εικονικών αισθητήρων.<sup>29</sup> Παρέχεται ακόμα και λογισμικό τριών διαστάσεων, στο πλαίσιο πάντα της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, η οποία παρέχεται στις επιχειρήσεις διαμέσου του λογισμικού της SAP, το οποίο επιτρέπει, εκτός των άλλων, και την πραγματοποίηση

---

<sup>29</sup> <https://cutt.ly/NVjkdKz>, (22/09/2022).

προβλέψεων, οι οποίες προάγουν τη λειτουργία της επιχείρησης, που θα επιλέξει να αγοράσει το συγκεκριμένο λογισμικό.<sup>30</sup>

Μάλιστα, η SAP αναγνωρίζει ότι τα ψηφιακά δίδυμα είναι το μέλλον της Industry 4.0 και είναι ιδιαίτερος σημαντικά για την εισαγωγή της καινοτομίας στις επιχειρήσεις, ωφελώντας ένα ευρύ φάσμα από τομείς και λειτουργίες της εκάστοτε επιχείρησης· από την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο μιας συνεχούς ροής δεδομένων χρήσης και επιδόσεων, τον συνδυασμό δεδομένων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των περιουσιακών στοιχείων και των προϊόντων της εκάστοτε επιχείρησης, την υποστήριξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων προϊόντος, έως και την προώθηση της καινοτομίας στην παραγωγή, την έρευνα και ανάπτυξη, την αλυσίδα εφοδιασμού, την διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, την εξυπηρέτηση και την εφοδιαστική αλυσίδα. Η SAP, πέρα από τα εργαλεία των ψηφιακών διδύμων, προσφέρει και την ανάλογη υποστήριξη στις επιχειρήσεις, οι οποίες επιθυμούν να αγοράσουν το λογισμικό της. Ειδικότερα, η SAP παρέχει συμβουλευτικές υπηρεσίες από εξειδικευμένους υπαλλήλους της, αναφορικά με τα αναγκαία βήματα, τα οποία χρειάζονται εκ μέρους μιας επιχείρησης, η οποία επιθυμεί να εκκινήσει τη χρήση του λογισμικού SAP, θέτοντας έτσι νέους επιχειρηματικούς στόχους και καινοτομώντας εντός του ψηφιακού πλέον κόσμου.<sup>31</sup> Τέλος, σημειώνεται ότι η SAP χρησιμοποιεί την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων και στη διαχείριση της εφοδιαστικής της αλυσίδας, για τους λόγους οι οποίοι έχουν ήδη αναλυθεί ανωτέρω, μερικοί εκ των οποίων είναι η μείωση του κόστους, η προβλεπτική συντήρηση, η βελτιωμένη αποδοτικότητα, καθώς και η ταχύτερη καινοτομία.<sup>32</sup>

Με τη χρήση του λογισμικού *SAP Predictive Engineering Insight*, η εταιρεία προσφέρει τη δυνατότητα στους χρήστες να αναλύουν δεδομένα πρόβλεψης συντήρησης με δυνατότητα IoT, ώστε να παρακολουθούν τη συμπεριφορά του εξοπλισμού από απόσταση και να αποκτήσουν μεγαλύτερη εικόνα μέσω προσομοιώσεων. Οι πληροφορίες παρέχονται από δεδομένα αισθητήρων και προσομοιώσεις μηχανής. Για να επιτευχθούν βέβαια τα παραπάνω, η SAP συνεργάζεται με την Ansys από το 2018, με την λύση *SAP Predictive Engineering Insights Enabled by Ansys*<sup>33</sup>, όπου η SAP χρησιμοποιεί το λογισμικό και τις ικανότητες του *Ansys Twin Builder* για την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων, που περιγράφεται σε παρακάτω ενότητα. Αυτή η λύση συνδυάζει τη

---

<sup>30</sup> <https://cutt.ly/8VjciG1>, (22/09/2022).

<sup>31</sup> <https://cutt.ly/FVjxGpF>, (22/09/2022).

<sup>32</sup> <https://cutt.ly/sVYI364>, (22/09/2022).

<sup>33</sup> <https://cutt.ly/fV7srWX>, (28/09/2022)

δύναμη των κορυφαίων δυνατοτήτων του *SAP Enterprise Asset Management* με τις καλύτερες δυνατότητες προσομοίωσης βιομηχανικών προτύπων σε βιομηχανικά συστήματα, και όχι μόνο, μεταφράζοντας πληροφορίες προσομοίωσης από ψηφιακά δίδυμα, σε ενέργειες για τη βελτιστοποίηση και την αποτελεσματικότητα της παραγωγής, τη συντήρηση των μηχανημάτων και την ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου μη λειτουργίας των μηχανημάτων. Πιο συγκεκριμένα, το *SAP Predictive Engineering Insights by Ansys* χρησιμοποιεί το *Ansys Twin Builder* για τη δημιουργία, επικύρωση και ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων, αφού το τελευταίο παρέχει δυνατότητες για την γρήγορη δημιουργία ακριβών εικονικών προτύπων φυσικών συστημάτων. Για τη σύνδεση του ψηφιακού διδύμου σε δεδομένα δοκιμής ή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, το λογισμικό της Ansys μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα με πλατφόρμες IoT. Μόλις συνδεθεί το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιήσει την τρέχουσα κατάσταση του προϊόντος για να προσομοιώσει μελλοντικές καταστάσεις, προβλέποντας μελλοντικά προβλήματα, που μπορεί να υπάρξουν, ώστε να αποφευχθούν και να συνδράμουν έτσι στη βέλτιστη αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.<sup>34</sup>

### 3.6 Autodesk

Η Autodesk είναι μια εταιρία, η οποία θέτει ως σκοπό της την αλλαγή του τρόπου με τον οποίο ο κόσμος είναι σχεδιασμένος και φτιαγμένος με γνώμονα τη βιωσιμότητα. Πιο αναλυτικά, από τα πιο πράσινα κτίρια μέχρι τα πιο έξυπνα προϊόντα, το λογισμικό της Autodesk βοηθά τους πελάτες της να σχεδιάσουν και να δημιουργήσουν έναν καλύτερο κόσμο για όλους.<sup>35</sup>

Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία, η οποία χρησιμοποιείται από την εταιρία Autodesk, καλύπτει τους τομείς της αρχιτεκτονικής, της μηχανικής και των κατασκευών, του σχεδιασμού και της κατασκευής προϊόντων, καθώς και των μέσων ενημέρωσης και της ψυχαγωγίας, δίνοντας τη δυνατότητα στους απανταχού καινοτόμους να επιλύουν μικρές και μεγάλες προκλήσεις κατά τη διάρκεια της επιχειρηματικής τους δραστηριότητας. Μάλιστα, η εταιρία Autodesk προμηθεύει τους πελάτες της με λογισμικό, το οποίο επιτρέπει στους τελευταίους να εργάζονται με ευελιξία, πέρα από τα στενά όρια του έργου, του κλάδου και της ίδιας της βιομηχανίας, στην οποία εντάσσονται. Ειδικά στον βιομηχανικό τομέα, αλλά και όχι μόνο σε αυτόν, κατά τις τελευταίες

---

<sup>34</sup> <https://cutt.ly/cVjbf61>, (28/09/2022)

<sup>35</sup> <https://cutt.ly/cVjbf5w>, (22/09/2022).

τέσσερις δεκαετίες, εκατομμύρια άνθρωποι έχουν εμπιστευτεί την τεχνολογία της εταιρίας Autodesk προκειμένου να αλλάξουν προς το καλύτερο τον τρόπο κατασκευής των προϊόντων τους. Στις μέρες μας, οι λύσεις οι οποίες προσφέρονται από την υπό εξέταση εταιρία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από κλάδους και δρουν ενισχυτικά στις καινοτόμες επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο, ενώ η Autodesk συνεχώς προσπαθεί να προάγει περαιτέρω το λογισμικό, το οποίο προσφέρει.<sup>36</sup>

Σημειώνεται ένα από τα σημαντικότερα προϊόντα, που έχει σχεδιαστεί από την εταιρία Autodesk και το οποίο βρίσκεται διαθέσιμο προς αγορά από τις επιχειρήσεις είναι το *Autodesk Tandem*, το οποίο βοηθά τις εταιρείες AEC να αξιοποιήσουν δεδομένα BIM (Building Information Modeling) καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου προκειμένου να δημιουργήσουν και να παραδώσουν ένα ψηφιακό δίδυμο. Πιο αναλυτικά, το *Autodesk Tandem* παρέχει ευέλικτα και διαμορφώσιμα δομικά στοιχεία, που θα επιτρέψουν στους πελάτες τους να δημιουργήσουν και να διαχειριστούν ψηφιακά δίδυμα πλούσια σε δεδομένα, τα οποία αντικατοπτρίζουν το δομημένο περιβάλλον, που αντιπροσωπεύουν, το οποίο στην περίπτωση της βιομηχανίας αφορά τα μηχανήματα, τα περιουσιακά στοιχεία και την γραμμή παραγωγής ή την αποτύπωση του εδάφους του εργοστασίου. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται μια πιο ολοκληρωμένη ροή εργασιών, όπου ο προσδιορισμός, η καταγραφή και η επαλήθευση των δεδομένων καθώς και η συνεργασία μεταξύ ιδιοκτητών και ομάδων έργου, θα βοηθήσει στην πρόγνωση μελλοντικών προβλημάτων και την επίλυσή τους πριν συμβούν, ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά λειτουργικά αποτελέσματα.

Επίσης, με το λογισμικό αυτό και βάσει των προτύπων των εγκαταστάσεων, καθορίζεται ο τρόπος οργάνωσης των περιουσιακών στοιχείων, των χώρων και των δεδομένων που απαιτούνται, προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Έπειτα, τα μέλη της ομάδας έργου μπορούν να συνεισφέρουν μέσα από έναν κοινό ψηφιακό κόμβο, συλλέγοντας και παραθέτοντας τα απαιτούμενα δεδομένα για μια ψηφιακή αποτύπωση, όπως δεδομένα σχεδιασμού εγκατάστασης και θέσης λειτουργίας, χώρου και προδιαγραφών μηχανημάτων, ώστε να υπάρχει πληρότητα και ακρίβεια δεδομένων. Με αυτά τα δεδομένα δημιουργείται ένα ψηφιακό αντίγραφο της εγκατάστασης, το οποίο παρακολουθεί κάθε αλλαγή που γίνεται, παρέχοντας ένα ψηφιακό νήμα πληροφοριών για κάθε στοιχείο και χώρο στην εγκατάσταση. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια επαναλαμβανόμενη διαδικασία συλλογής των δεδομένων σε ένα χαρτοφυλάκιο

---

<sup>36</sup> <https://cutt.ly/cVjbf5w>, (22/09/2022).

εγκαταστάσεων, οπότε οι επιχειρήσεις έχουν τη δυνατότητα να συγκεντρώνουν και να αναλύουν δεδομένα, όχι μόνο για μια μεμονωμένη εγκατάσταση, αλλά για ολόκληρο το χαρτοφυλάκιό τους.

Συμπερασματικά, το *Autodesk Tandem* παρακολουθεί κάθε αλλαγή που γίνεται στο ψηφιακό δίδυμο, ανεξάρτητα από το αν η αλλαγή προέρχεται από μια ενημέρωση μοντέλου, τις επεξεργασίες που έγιναν σε άλλη εφαρμογή ή απευθείας στην εφαρμογή *Autodesk Tandem*. Αυτό δίνει μια εικόνα για το ποιες αλλαγές γίνονται από ποιον, πότε έγιναν και τι επιπτώσεις έχουν. Συνεπώς, μπορεί να παραδοθεί ένα ψηφιακό αντίγραφο, που παρέχει όλα όσα χρειάζεται η βιομηχανική επιχείρηση για να επιταχύνει την παραγωγή με αποτελεσματικό τρόπο και μειωμένο κόστος μέσα από την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων.<sup>37</sup>

### 3.7 Ansys

Η εταιρία Ansys έχει αναπτύξει λογισμικό, το οποίο για παραπάνω από πενήντα έτη προσφέρει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις όλων των κλάδων να καινοτομήσουν, αλλά και παράλληλα να διευρύνουν τα όριά τους, διαμέσου της προβλεπτικής δύναμης της προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά, η εταιρία Ansys εμπνέεται από εφαρμογές και επιτεύγματα σε διάφορα πεδία: από την επίτευξη βιώσιμων μεταφορών και τη δημιουργία προηγμένων ημιαγωγών, έως και την ανάπτυξη δορυφορικών συστημάτων και ιατρικών συσκευών, οι οποίες σώζουν ζωές, η εταιρία Ansys πραγματοποιεί συνεχώς μεγάλα άλματα στην ανθρώπινη πρόοδο. Γνώμονας της λειτουργίας της συγκεκριμένης εταιρίας είναι η συνεργασία με τους συνεργάτες, διάμεσου της οποίας η εταιρία Ansys κατορθώνει τελικά να προωθήσει την καινοτομία, να επιταχύνει την ανάπτυξη και να προσφέρει αυτό που έχει σημασία για τους πελάτες της.<sup>38</sup>

Ειδικά στον τομέα της βιομηχανίας, σημειώνεται ότι η εταιρία Ansys έχει κατασκευάσει το Ansys Twin Builder, το οποίο αφορά σε μια λύση ανοικτού κώδικα, η οποία δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να δημιουργούν ψηφιακά δίδυμα με βάση την προσομοίωση, η οποία εδράζεται στην ανάλυση δεδομένων. Για την ακρίβεια, στο πλαίσιο του Ansys Twin Builder αναπτύσσονται ψηφιακά δίδυμα, με σκοπό, όπως προειπώθηκε, την προσομοίωση των περιουσιακών στοιχείων των επιχειρήσεων όταν αυτά βρίσκονται σε λειτουργία, δηλαδή σε πραγματικό χρόνο. Το

---

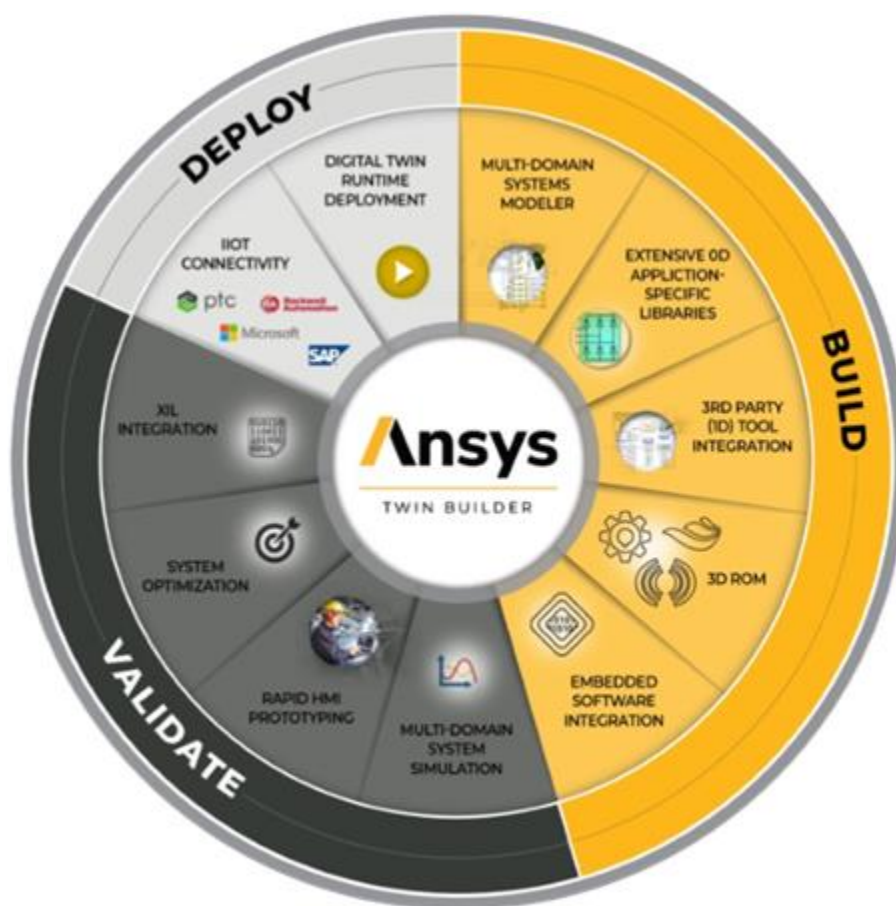
<sup>37</sup> <https://cutt.ly/cVwb75>, (28/09/2022)

<sup>38</sup> <https://cutt.ly/cVY7ppT>, (25/09/2022).



τελευταίο αντικατοπτρίζει ολόκληρο τον κύκλο ζωής, αλλά και την ίδια την λειτουργία του περιουσιακού στοιχείου. Τα ψηφιακά δίδυμα, τα οποία αναπτύσσονται από την εταιρία Ansys, στο πλαίσιο του Ansys Twin Builder, επιτρέπουν το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση συστημάτων, αλλά και την προληπτική συντήρηση, ενώ την ίδια στιγμή βελτιστοποιούν τη διαχείριση βιομηχανικών περιουσιακών στοιχείων. Με την εφαρμογή του Ansys Twin Builder, μία επιχείρηση δύναται να βελτιώσει τα έσοδά της, να διαχειριστεί το κόστος της, καθώς και να αποκτήσει, αλλά και να διατηρήσει ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.<sup>39</sup>

Σχήμα 3.3: Ansys Twin Builder.



(Πηγή: <https://cutt.ly/OV8QFxU>)

<sup>39</sup> <https://cutt.ly/7VzmpO6>, (25/09/2022).

Συμπερασματικά, πολλές εταιρίες έχουν προβεί στη χρήση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, μερικές εκ των οποίων αναφέρθηκαν παραπάνω και είναι η Fujitsu, η GE, η Siemens, η SAP, η Autodesk και η Ansys, αφού προσφέρουν μια πληθώρα από οφέλη, όπως π.χ. η επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ροής με υψηλή ταχύτητα και η πραγματοποίηση προσθηκών ή και αλλαγών στην επεξεργασία των δεδομένων χωρίς να είναι αναγκαία η διακοπή της λειτουργίας των συστημάτων (Kato et al., 2021; Matsumoto et al., 2020). Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

### 3.8 Κριτική σύνοψη κεφαλαίου

Πολλές εταιρίες έχουν προβεί στη χρήση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, μερικές εκ των οποίων είναι η Fujitsu, η GE, η Siemens, η SAP, η Autodesk και η ANSYS, αφού προσφέρουν μια πληθώρα από οφέλη, όπως π.χ. η επεξεργασία μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων ροής με υψηλή ταχύτητα και η πραγματοποίηση προσθηκών ή και αλλαγών στην επεξεργασία των δεδομένων χωρίς να είναι αναγκαία η διακοπή της λειτουργίας των συστημάτων.

Πιο αναλυτικά, η εταιρία Fujitsu ανέπτυξε, μέσα στα εργαστήριά της, μια ειδικά διαμορφωμένη πλατφόρμα, η οποία ονομάζεται *Dracena*, που στηρίζει την λειτουργία της σε μια δυναμικά επαναδιαμορφώσιμη ασύγχρονη πλατφόρμα, η οποία επεξεργάζεται με συνεπή τρόπο διαδικασίες, προκειμένου να αναπτύξει ευέλικτες υπηρεσίες, στηριζόμενη στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων. Η λειτουργία της πλατφόρμας *Dracena* εδράζεται στην ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ανανεώνει το σύστημα χωρίς να απαιτεί τη διακοπή της λειτουργίας του, ενώ επίσης απορροφάει τυχούσες καθυστερήσεις συμβάντων, προάγοντας έτσι την αποτελεσματικότητα της ανάπτυξης υπηρεσιών. Διαμέσου αυτών των δεδομένων, τα οποία αναλύονται μέσα στην υπό εξέταση πλατφόρμα, πραγματοποιείται και ο συντονισμός του πραγματικού με το εικονικό σύστημα στο πλαίσιο του ψηφιακού διδύμου που έχει αναπτυχθεί, ενώ οι πρόσθετοι μηχανισμοί, οι οποίοι μπορούν να προστεθούν στην πλατφόρμα, αλλά και η αξιοποίηση λογισμικού ανοικτού κώδικα, τελικά προάγουν τις δυνατότητες και το εύρος εφαρμογών της πλατφόρμας *Dracena*. Μια από τις εφαρμογές της πλατφόρμας *Dracena* της εταιρίας Fujitsu είναι και ο τομέας της βιομηχανίας και, συγκεκριμένα,



ο τομέας της παραγωγής προϊόντων, αλλά και της εφοδιαστικής αλυσίδας. Γενικά, πάντως, η εταιρία Fujitsu, εν έτη 2022, έχει προβεί στην προώθηση μιας ασφαλούς και βιώσιμης κοινωνίας, με την εφαρμογή τεχνολογιών για την επίλυση κοινωνικών προβλημάτων με τη συμμετοχή όλων των ενδιαφερόμενων μερών.

Η GE, επίσης, έχει προβεί στην αξιοποίηση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων με σκοπό την επίτευξη καλύτερης συνδεσιμότητας και την προαγωγή της παραγωγικότητας, της αποτελεσματικότητας και της αποδοτικότητας, με απώτερο σκοπό την επίτευξη ανταγωνιστικότητας. Ειδικότερα, η GE έχει αξιοποιήσει την υπολογιστική νέφους για την διαχείριση της απόδοσης των περιουσιακών στοιχείων και την τεχνολογία ψηφιακών διδύμων με σκοπό την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης περιουσιακών στοιχείων και διεργασιών. Προς τούτο, η GE δημιούργησε την IoT πλατφόρμα *Predix*, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα της ανάλυσης και της οπτικοποίησης δεδομένων σε διακομιστές υπολογιστικού νέφους. Ακόμη, η πλατφόρμα *Predix* προσφέρει, επιπροσθέτως, και κατανεμημένη υπολογιστική, εργαλεία ανάλυσης δεδομένων, τόσο ιστορικών όσο πραγματικού χρόνου, πρωτόκολλα αλληλεπίδρασης και συστήματα διαχείρισης δεδομένων και συσκευών, με σκοπό την προσομοίωση και την πρόβλεψη ενδεχόμενων μελλοντικών αστοχιών, καθώς και τη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων υπαλλήλων.

Αναφορικά με την Siemens, προβαίνει και αυτή στην ανάλυση στατικών και δυναμικών δεδομένων υψηλής διάστασης με τεχνικές AI και ML, προκειμένου να προάγει τις υπηρεσίες της, οι οποίες στηρίζονται σε δεδομένα και αναγνωρίζει την αξία των ψηφιακών διδύμων. Η συγκεκριμένη εταιρία ανέπτυξε το λογισμικό IoT τεχνολογίας εν ονόματι *MindSphere*, το οποίο είναι ανοικτού κώδικα και στηρίζεται στο υπολογιστικό νέφος, ενώ βάζει στο επίκεντρο το χρήστη του συστήματος, στηρίζει τη συνεργασία και στοχεύει στην αυτονομία των συστημάτων παραγωγής και στην παρακολούθηση των συστημάτων παραγωγής σε όλες τις φάσεις της λειτουργίας και της συντήρησής τους. Η γραφική διεπαφή της πλατφόρμας *MindSphere* είναι ένα από τα πλεονεκτήματά της, όπως και η δυνατότητά της να μεταφορτώνει δεδομένα για την εφαρμογή μοντέλων ML πρόβλεψης, ενώ η τιμολόγησή της είναι ακόμη το μελανό της σημείο.

Η SAP συνιστά έναν από τους ηγέτες της αγοράς, όσον αφορά το επιχειρηματικό λογισμικό, το οποίο δεν διέπεται από δαπανηρή ενσωμάτωση και επιτρέπει στην επιχείρηση, η οποία θα το επιλέξει να καινοτομήσει, να εισάγει τάχιστα νέα προϊόντα στην παραγωγή της, να

ψηφιοποιήσει την ανάπτυξή τους και καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους, προάγοντας την ποιότητά τους και μειώνοντας το συνολικό τους κόστος παραγωγής, αλλά και διάθεσής τους στην αγορά. Μια από τις τεχνολογίες, που αξιοποιείται στο λογισμικό της SAP, είναι η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων και, πιο συγκεκριμένα, αυτή καθίσταται αναγκαία για την προσομοίωση και την αξιοποίηση εικονικών αισθητήρων.

Από την άλλη πλευρά, η Autodesk είναι μια εταιρία, η οποία θέτει σαν σκοπό της την αλλαγή του τρόπου με τον οποίο ο κόσμος είναι σχεδιασμένος και φτιαγμένος με γνώμονα την βιωσιμότητα. Προς αυτόν τον σκοπό, δίνει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να προάγουν την επιχειρηματική τους δραστηριότητα διαμέσου της χρήσης καινοτόμου λογισμικού, παρέχοντας τη δυνατότητα σε μια επιχείρηση να παρουσιάσει τα προϊόντα της στην αγορά πιο γρήγορα, αλλά και να επηρεάσει την όλη διαδικασία μέσα από μια συνδεδεμένη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων, επωφελούμενη από την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων.

Τέλος, η εταιρία Ansys έχει αναπτύξει λογισμικό, το οποίο, για παραπάνω από πενήντα έτη, έχει δώσει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις όλων των κλάδων να καινοτομήσουν, αλλά και παράλληλα να διευρύνουν τα όριά τους, διαμέσου της προβλεπτικής δύναμης της προσομοίωσης. Διάμεσου της συνεργασίας με τους συνεργάτες της, η εταιρία Ansys κατορθώνει να προωθήσει την καινοτομία, να επιταχύνει την ανάπτυξη και να προσφέρει αυτό που έχει σημασία για τους πελάτες της. Ειδικά στον βιομηχανικό τομέα, η Ansys έχει δημιουργήσει το *Ansys Twin Builder*, μια λύση ανοικτού κώδικα, η οποία δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να δημιουργούν ψηφιακά δίδυμα με βάση την προσομοίωση, η οποία στηρίζεται στην ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος ή του συστήματος, συμβάλλοντας στην προληπτική συντήρηση και στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας της επιχείρησης.

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 4.1 Συμπεράσματα

Οι βιομηχανικές επαναστάσεις επέφεραν αλλαγές στις μεθόδους και στα πρότυπα, τα οποία χρησιμοποιούνταν στον τομέα της βιομηχανίας, με σημαντικές αλλαγές τόσο στην οικονομία όσο και στην κοινωνία. Μάλιστα, αυτή η έννοια της αλλαγής είναι εκείνη, που ορίζει μια χρονική περίοδο της Ιστορίας ως βιομηχανική επανάσταση. Η Industry 1.0 αφορούσε στη χρήση της ατμοηλεκτρικής ενέργειας και εκσυγχρόνισε τον τομέα της παραγωγής, ενώ η Industry 2.0 αφορούσε στη μαζική παραγωγή και στη χρήση του ηλεκτρισμού. Η Industry 3.0 ξεκίνησε την έννοια της αυτοματοποίησης στο χώρο του εργοστασίου και η Industry 4.0 συνδέθηκε άρρηκτα με τον ψηφιακό μετασχηματισμό στην βιομηχανία.

Ιδιαίτερη σημασία, κατά την Industry 4.0, κατέχει η αυτοματοποίηση και η ανταλλαγή πληθώρας δεδομένων εντός και εκτός της επιχείρησης. Η τελευταία βιομηχανική επανάσταση υπήρξε το αποτέλεσμα μιας εξελικτικής διαδικασίας και η σημασία της εδράζεται κυρίως στην σημερινή ύπαρξη ενός ευρέως φάσματος δεδομένων, τα οποία προέρχονται κυρίως από το διαδίκτυο και για τα οποία καθίσταται δύσκολη, αν όχι ακατόρθωτη, η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων και εν γένει αξίας από αυτά τα δεδομένα.

Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες, οι οποίες συνιστούν την Industry 4.0, πέρα από τα ανωτέρω, δύνανται να συμβάλλουν σε μια πιο βιώσιμη κοινωνία, ενώ για την ίδια την επιχείρηση οι τεχνολογίες της Industry 4.0 μπορούν να αυξήσουν την καινοτομία και την ανταγωνιστικότητά της στο κλάδο της. Ειδικά στον τομέα της βιομηχανίας, τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής χαρακτηρίζονται από αρνητικές οικολογικές επιπτώσεις, με ολέθριες συνέπειες για το περιβάλλον και τον πλανήτη γενικότερα.

Βέβαια, η υιοθέτηση των ανωτέρω τεχνολογιών από τις επιχειρήσεις απαιτεί την ανάλογη επένδυση τόσο σε εξοπλισμό όσο και σε εκπαίδευση ή επανεκπαίδευση προσωπικού. Αναφορικά με την ετοιμότητα των επιχειρήσεων να εφαρμόσουν στην πράξη τις επιταγές της Industry 4.0 δεν υπάρχει ακόμα μια σαφής εικόνα, ενώ οι νέες αυτές τεχνολογίες υιοθετούνται συνήθως από τις μεγάλες επιχειρήσεις στον τομέα της βιομηχανίας, μολονότι τα οφέλη τους είναι γνωστά στον συγκεκριμένο τομέα. Οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις εξάλλου, συχνά, έρχονται αντιμέτωπες με

εμπόδια όπως είναι ο περιορισμός σε πόρους, γνώση και τεχνολογική ευαισθητοποίηση, αλλά και η έλλειψη ψηφιακής στρατηγικής.

Αναφορικά με τις τεχνολογίες της Industry 4.0, σημειώνεται ότι οι τεχνολογίες IoT αποτελούν τον πυλώνα της Industry 4.0 και έχουν οδηγήσει σε νέες δυνατότητες, τόσο στην καθημερινότητα των σημερινών ανθρώπων όσο και στο χώρο των επιχειρήσεων. Ιδιαίτερη σημασία στον χώρο της βιομηχανίας κατέχει το IIoT, το οποίο αφορά στην ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση της παραδοσιακής βιομηχανικής παραγωγής, όπου εισάγεται και η βιώσιμη αλυσίδα εφοδιασμού. Διαμέσου αυτών των τεχνολογιών, πέρα από τα αυτονόητα οφέλη, αυξάνεται η αποδοτικότητα των διαδικασιών, ενώ ανοίγει ο δρόμος για την πραγματοποίηση προβλέψεων τόσο σε επίπεδο ανεφοδιασμού όσο και σε επίπεδο συντήρησης των μηχανών.

Η πληθώρα των δεδομένων, που συγκεντρώνονται διαμέσου των IoT συσκευών, αποθηκεύεται στο υπολογιστικό νέφος, το οποίο αποτελεί άλλη μια καινοτομία στο πλαίσιο της Industry 4.0, η οποία βασίζεται στην καταναμημένη αρχιτεκτονική υλικού και προσφέρει υπηρεσίες αποθήκευσης στους ενδιαφερόμενους χρήστες, καθώς και διάφορες εφαρμογές, οι οποίες είναι στοχευμένες και προσαρμοσμένες στις εκάστοτε ανάγκες των χρηστών. Η υπολογιστική νέφος εφαρμόστηκε και στον τομέα της βιομηχανίας, όπου και εμφανίστηκε ο όρος της βιομηχανίας νέφος, με σημαντικά οφέλη για τις επιχειρήσεις.

Βέβαια, με την έλευση των μεγάλων δεδομένων, πολλές φορές, η υπολογιστική νέφος καθίσταται παρωχημένη και εκεί αναδύεται η υπολογιστική παρυφής, η οποία χρησιμοποιεί μεθόδους AI, με σκοπό την γρήγορη ανάλυση των δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο και με αυξημένη ασφάλεια. Ειδικά στην βιομηχανία, δηλαδή στο IIoT, η υπολογιστική παρυφή επιλύει το ζήτημα της χαμηλής καθυστέρησης στην απόκριση και σε συνδυασμό με τις μεθόδους ML καθίσταται δυνατή η ολοένα και βελτιούμενη απόκριση των αλγορίθμων και άρα των συσκευών, με σκοπό την προαγωγή της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων, αλλά και στην επίτευξη μιας πιο βιώσιμης παραγωγής.

Ωστόσο, η έλευση των τεχνολογιών αυτών, λόγω της Industry 4.0, έχει επιφέρει ζητήματα κυβερνοασφάλειας για τις επιχειρήσεις, με αποτέλεσμα να τίθενται σε κίνδυνο η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται. Τα ζητήματα αυτά υπερκεράζονται διαμέσου της αγοράς προϊόντων κυβερνοασφάλειας και διαμέσου της επαρκούς και άρτιας σχετικής εκπαίδευσης του προσωπικού, ταυτόχρονα με την ταχεία και βέλτιστη απόκριση σε

περιπτώσεις παραβίασης και φυσικά διαμέσου της πρόληψης και της διενέργειας σχετικών ελέγχων.

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις στο χώρο της βιομηχανίας δεν επιτρέπουν σε ένα εργοστάσιο να αξιοποιήσει πλήρως τους πόρους του. Η προσθετική βιομηχανία, στο πλαίσιο της Industry 4.0, ωστόσο διέπεται από μειονεκτήματα, τα οποία υπερκεράζονται διαμέσου του ψηφιακού διδύμου και της έλευσης της έξυπνης βιομηχανίας, τα οποία εισάγουν καινοτομία και έλκουν το ενδιαφέρον των ειδικών, μολοντί δεν έχει καταστεί δυνατό να βρεθεί ένας κοινά αποδεκτός και ενιαίος ορισμός για αυτά, κάτι το οποίο πολλάκις προκαλεί σύγχυση.

Η υιοθέτηση των τεχνολογιών της Industry 4.0 στην βιομηχανία οδηγεί στην έλευση του έξυπνου εργοστασίου, το οποίο προσφέρει προηγμένες, καινοτόμες, βιώσιμες και ανταγωνιστικές λύσεις στην σημερινή ψηφιακή και απαιτητική πραγματικότητα, με εφαρμογές στη δημιουργία των έξυπνων πόλεων, στον τομέα της υγείας, στην βιομηχανία, στα logistics και στα βιομηχανικά προϊόντα, στην ενέργεια, στην επιστήμη των υλικών, αλλά και στο λιανικό ηλεκτρονικό εμπόριο.

Διαμέσου της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στον τομέα της βιομηχανίας, προσφέρεται η δυνατότητα της μοντελοποίησης πολύπλοκων συστημάτων και διαδικασιών και στην συνεχή ανάλυση δεδομένων, τα οποία συγκεντρώνονται διαμέσου αισθητήρων. Η χρήση των ψηφιακών διδύμων προσφέρει την παρακολούθηση, την ανάλυση και την προσομοίωση φυσικών περιουσιακών στοιχείων, αλλά και διαδικασιών, ειδικά με τη χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα, το οποίο προσφέρει ευελιξία και διαλειτουργικότητα των λύσεων, αλλά και προσαρμογή στις τρέχουσες κάθε φορά ανάγκες.

Πιο αναλυτικά, στο χώρο της βιομηχανίας, τα ψηφιακά δίδυμα αξιοποιούνται κατά κόρον στην προσομοίωση μηχανημάτων και στη μοντελοποίηση περιουσιακών στοιχείων. Εξάλλου, η προσομοίωση των μηχανημάτων, διαμέσου της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, προσδίδει στην επιχείρηση έναν ασφαλή και οικονομικά αποδοτικό τρόπο να ελέγξουν τις δυνατότητες των μηχανημάτων τους. Η εικονική μηχανή δίνει πληροφορίες για την κατάσταση της πραγματικής μηχανής, ειδικά σε περίπτωση δυσλειτουργίας ή βλάβης· το ποσοστό επιτυχίας της συγκεκριμένης διαδικασίας εξαρτάται από το πόσο αποτελεσματικά και ρεαλιστικά δύναται να κατασκευαστεί η εικονική μηχανή. Πέρα από την προσομοίωση των μηχανημάτων, σημειώνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν ψηφιακά δίδυμα για όλα τα περιουσιακά στοιχεία μιας επιχείρησης, προσθέτοντας νέες γνώσεις και αξία, ειδικά διαμέσου οπτικοποίησης συγκεκριμένων

δεδομένων σε συγκεκριμένους χρήστες. Τα αυτόνομα συστήματα είναι, επίσης, σημαντικές εφαρμογές της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων στην βιομηχανία, αφού δύνανται να λειτουργήσουν χωρίς να χρειάζονται πλήρη ανθρώπινο έλεγχο και λεπτομερή προγραμματισμό τους, ενώ παράλληλα είναι ευπροσάρμοστα σε αλλαγές.

Μια επιπρόσθετη βιομηχανική εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων είναι στο χώρο της παραγωγής. Πιο αναλυτικά, τα ψηφιακά δίδυμα συμβάλλουν σημαντικά στην συνεχή προαγωγή των έξυπνων και αυτόνομων συστημάτων παραγωγής. Διαμέσου της συγκεκριμένης τεχνολογίας, καθίσταται δυνατή η προσομοίωση ολόκληρης της λειτουργίας των συστημάτων παραγωγής, σε πραγματικό μάλιστα χρόνο, κάτι το οποίο βοηθάει την επιχείρηση να μειώσει τα έξοδα της σε κόστη π.χ. σε κατανάλωση ενέργειας, να αυξήσει την παραγωγικότητά της, να καταστήσει δυνατή την ψηφιακή ιχνηλασιμότητα των παραγόμενων προϊόντων, κάτι το οποίο προσφέρει βιωσιμότητα στις λειτουργίες της αλυσίδας ανεφοδιασμού, αλλά και μειώσει το κόστος διανομής των προϊόντων της και το συνολικό περιβαλλοντικό της αποτύπωμα.

Το ψηφιακό δίδυμο είναι διαθέσιμο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος παραγωγής και διασφαλίζει ότι σε κάθε βήμα η διαδικασία βρίσκεται σε συμφωνία με τις αρχικώς προσδιορισμένες απαιτήσεις και τελικώς οδηγεί στην επίτευξη του στόχου παραγωγής, που έχει οριστεί. Τα ψηφιακά δίδυμα στον τομέα της παραγωγής, πέρα από τα ανωτέρω, προσφέρουν ευκολία ενσωμάτωσης με άλλα συστήματα, ακρίβεια στις προσομοιώσεις, χρησιμοποιώντας τα μοντέλα συμπεριφοράς συστήματος, μοντελοποίηση σφαλμάτων, καθώς και χρήση τεχνικών ανάλυσης δεδομένων μεγάλης διάστασης, αξιοποιώντας αλγορίθμους και τεχνικές ενισχυτικής μάθησης, όπως είναι π.χ. ο EDiT αλγόριθμος.

Εταιρίες όπως είναι η Fujitsu, η General Electric, η Siemens, η SAP, η Autodesk και η Ansys χρησιμοποιούν λογισμικά που υπάγονται στην Industry 4.0 και πολλάκις υπάγονται στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων. Πιο αναλυτικά, η Fujitsu ανέπτυξε την πλατφόρμα *Dracena*, η οποία επεξεργάζεται με συνεχή τρόπο μεγάλες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και κατασκευαστικά χρησιμοποιεί πολλές τεχνολογίες της Industry 4.0 και συγκεκριμένα χρησιμοποιεί ψηφιακά δίδυμα, IoT συσκευές, λογισμικό ανοικτού κώδικα, πρόσθετα προγράμματα και προηγμένο σύστημα ανάλυσης δεδομένων. Βασικό χαρακτηριστικό της πλατφόρμας *Dracena* έγκειται στο ότι μπορεί διαχειριστεί προσθήκες και αλλαγές στο σύστημα χωρίς να διακοπεί η λειτουργία του συστήματος.

Σημειώνεται ότι η συγκεκριμένη πλατφόρμα αξιοποιείται στον τομέα της βιομηχανίας και η ίδια η εταιρία, εν έτη 2022, προβαίνει στην προώθηση της «κοινωνίας εμπιστοσύνης», με στόχο μια πιο ασφαλή και βιώσιμη κοινωνία. Επιπροσθέτως, General Electric έχει εφαρμόσει την τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου, εξοικονομώντας χρήματα τόσο για εκείνη όσο και για τους πελάτες της. Ειδικότερα, η συγκεκριμένη εταιρία έχει αναπτύξει την IoT πλατφόρμα *Predix*, που επιτρέπει την διαχείρισης δεδομένων σε διακομιστές υπολογιστικού νέφους.

Ακόμη, η Siemens συμβάλλει στην ψηφιοποίηση και στον αυτοματισμό και δημιούργησε το IoT λογισμικό *MindSphere*, το οποίο βασίζεται σε λογισμικό ανοικτού κώδικα, εδράζεται, επίσης, στο υπολογιστικό νέφος και προσφέρει υπηρεσίες ανάλυσης δεδομένων με ανθρωποκεντρικό τρόπο. Επίσης τονίζεται ότι και η πλατφόρμα *MindSphere* δύναται να αξιοποιηθεί στον βιομηχανικό τομέα, αφού προσφέρει λύσεις ψηφιακών διδύμων.

Επιπροσθέτως, η εταιρία SAP ανέπτυξε επιχειρηματικό λογισμικό IoT τεχνολογίας, όπου διαμέσου της χρήσης ψηφιακών διδύμων καθίσταται δυνατή η προσομοίωση και η αξιοποίηση εικονικών αισθητήρων. Τέλος, η εταιρία Ansys έχει δημιουργήσει το *Ansys Twin Builder*, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στους μηχανικούς να δημιουργούν ψηφιακά δίδυμα με βάση την προσομοίωση, συμβάλλοντας στην προληπτική συντήρηση και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της επιχείρησης.

## **4.2 Συνεισφορά εργασίας**

Η παρούσα εργασία επεδίωξε να αποσαφηνίσει όχι μόνο το χρονικό υπόβαθρο της Industry 4.0, αλλά και τις ακριβείς αλλαγές, τις οποίες επέφερε στον κόσμο των επιχειρήσεων και στην ευρύτερη κοινωνία και τους λόγους για τους οποίους τελικώς έλαβε τον όρο της «επανάστασης», ενώ στην ουσία ήταν το αποτέλεσμα μιας εξελικτικής πορείας και όχι η εισαγωγή κάτι εντελώς νέου πράγματος στον βιομηχανικό τομέα. Εκείνο δηλαδή που κατέστη κατανοητό, μέσα από την ανάλυση του πρώτου κεφαλαίου της εργασίας, ήταν ότι η συγκεκριμένη χρονική περίοδος ήταν όντως επαναστατική, κυρίως επειδή καθιέρωσε τον ψηφιακό μετασχηματισμό και τον αυτοματισμό στη βιομηχανία, και όχι μόνο φυσικά εκεί, αλλάζοντας άρδην τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι επιχειρήσεις, με γνώμονα μια πιο βιώσιμη κοινωνία και επιχειρηματικές και προσωπικές αποφάσεις, οι οποίες να στηρίζονται σε δεδομένα.

Πράγματι, κάτι το οποίο διασαφηνίστηκε μέσα από την ανάλυση του πρώτου κεφαλαίου της παρούσας εργασίας, ήταν επίσης ότι τα συμβατικά συστήματα παραγωγής έρχονται εντελώς σε αντίθεση με τα νέα συστήματα παραγωγής, τα οποία επιτάσσονται από τις τεχνολογίες της Industry 4.0 και, πιο συγκεκριμένα, κατέστη σαφές στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ότι τα νέα αυτά συστήματα παραγωγής, όχι μόνο στοχεύουν σε πιο βιώσιμες λύσεις, αλλά συνάμα αυξάνουν την αποδοτικότητα, την αποτελεσματικότητα και τα επίπεδα καινοτομίας των επιχειρήσεων, μειώνοντας τα κόστη τους και, τελικώς, προάγοντας την ποιότητα των προϊόντων τους και βελτιώνοντας την οργάνωση και τη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας από τον σχεδιασμό του προϊόντος μέχρι και την διανομή του. Όλα αυτά για να γίνουν δυνατά απαιτούν όχι μόνο επενδύσεις, αλλά και πολλή προσπάθεια και ευελιξία σε όλα τα επίπεδα από τις επιχειρήσεις, καθώς και την υπερκέραση ενός πλήθους από προκλήσεις.

Ακόμη μια συμβολή, αυτή του δευτέρου κεφαλαίου της εργασίας, ήταν η κατανόηση των βασικών χαρακτηριστικών και αρχών, οι οποίες διέπουν τα σημερινά έξυπνα εργοστάσια, τα οποία διαδέχονται τα συμβατικά εργοστάσια και λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, πιο αυτοματοποιημένα, στηριζόμενα σε δεδομένα και αξιοποιώντας τις τεχνολογίες, οι οποίες οδηγούν την Industry 4.0. Οι ίδιες οι τεχνολογίες, που οδηγούν την Industry 4.0, επίσης αναλύονται και εξηγούνται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, δίνοντας στον αναγνώστη μια αρκετά καλή εικόνα του υπό μελέτη ζητήματος. Ειδικά στον χώρο της βιομηχανίας, γίνεται μνεία για την ΠoT και για την τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, που αποτελούν και τον πυρήνα της εργασίας, αλλά και τον πυλώνα της Industry 4.0. Συγκεκριμένα, αναλύθηκαν τόσο τα οφέλη όσο και οι προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων και αναφέρθηκαν μερικές από τις εφαρμογές τους στους διάφορους τομείς γενικά, ενώ έπειτα εστιάζει η μελέτη στον τομέα της βιομηχανίας.

Επίσης, η παρούσα εργασία συνέβαλε στο να γίνει κατανοητό ότι ολοένα και περισσότερες βιομηχανικές επιχειρήσεις τείνουν να υιοθετήσουν τα ψηφιακά δίδυμα στην επιχειρηματική τους λειτουργία και να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα, τα οποία προσφέρουν, ενώ επίσης η παρούσα εργασία επεσήμανε και τις προκλήσεις που καλούνται οι βιομηχανικές επιχειρήσεις να ξεπεράσουν προκειμένου να σταθούν στο ύψος των περιστάσεων, μιας και η γνώση, η εκπαίδευση των εργαζομένων για την νέα αυτή τεχνολογία σε συνδυασμό με την οικονομική αστάθεια των περισσότερων χωρών και την ελλιπή στήριξη των βιομηχανικών επιχειρήσεων από το κράτος για την αγορά και την εκμάθηση της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων, διαδραματίζουν καταλυτικό παράγοντα στην καθυστερημένη υιοθέτηση των πλεονεκτημάτων αυτής της σημαντικής



ανακάλυψης. Ειδικά στον τομέα της βιομηχανίας, η συγκεκριμένη εργασία συνέβαλε στο να καταστεί σαφές πού μπορεί να βοηθήσει το ψηφιακό δίδυμο στον τομέα της προσομοίωσης μηχανών και περιουσιακών στοιχείων, αλλά και στον τομέα της προσομοίωσης γραμμών παραγωγής, προσφέροντας ευελιξία παραγωγής, αλλά και μείωση κόστους και χρόνου της τελευταίας, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητά της και την αξιοπιστία τόσο των προϊόντων της επιχείρησης, όσο και της εικόνας της ως προς τους πελάτες, που προμηθεύονται από αυτήν.

Επιπλέον, όσον αφορά τον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας, η εισαγωγή τεχνολογιών μαζί σε ένα πλήρες ψηφιακό δίδυμο και η εφαρμογή τους είναι πολύπλοκη και δύσκολη και αποτελεί πρόκληση. Η ευαίσθητη, από πλευράς κόστους, φύση πολλών συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να εξηγήσει γιατί λίγες εταιρείες είναι πρόθυμες να προχωρήσουν στις αναγκαίες επενδύσεις. Η επένδυση στη διερεύνηση της χρήσης των ψηφιακών διδύμων στον χώρο της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι σχεδόν επιτακτική, καθώς το κόστος των νέων αυτών τεχνολογιών μειώνεται και η εμπιστοσύνη στην τεχνολογία αυξάνεται συνεχώς.

Η παρούσα εργασία συνέβαλε και στο να βοηθήσει τους μελλοντικούς μελετητές να κατανοήσουν την αξία της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων και της σημαντικότητας υιοθέτησής της στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής (προσομοίωση μηχανημάτων, περιουσιακών στοιχείων, γραμμών παραγωγής), αφού το προσωπικό στις επιχειρήσεις και οι μηχανικοί παραγωγής πλέον μπορούν να έχουν, ανεξαρτήτως της τοποθεσίας του εξοπλισμού παραγωγής, την ακριβή εικόνα της κατάστασής του και να ελέγχουν με αυτόν τον τρόπο την ροή της παραγωγής σε πραγματικό χρόνο, να αποφεύγουν βλάβες μηχανημάτων και προβλήματα της παραγωγής που ενδέχεται να οδηγήσουν ακόμη και σε διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας, μέσω της πρόβλεψης, και επιδιόρθωσης πριν συμβούν, που προσφέρει η προσομοίωση, με τη χρήση των ψηφιακών διδύμων και την συνεχή ανατροφοδότησή τους με αισθητηριακά δεδομένα. Επίσης, γίνεται κατανοητό ότι δίνεται η δυνατότητα δοκιμής καινοτόμων αλλαγών στο προσομοιωμένο εικονικό μηχάνημα/ γραμμή παραγωγής, εντοπίζοντας τις πιο αποδοτικές αλλαγές που θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην πιο αποδοτική λειτουργία του φυσικού μηχανήματος/ γραμμής παραγωγής που προσομοιώνεται.

Από την παρούσα εργασία γίνεται, λοιπόν, κατανοητό στους μελετητές ότι η σημαντικότητα του ψηφιακού διδύμου και των άλλων τεχνολογιών της Industry 4.0 είναι τεράστια και η υιοθέτησή τους από τις βιομηχανικές επιχειρήσεις αλλά και άλλους τομείς εφαρμογής, που

έχουν παρουσιαστεί γίνεται με τον καιρό επιτακτική για την βιώσιμη λειτουργία και ανάπτυξη τους καθώς και την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητάς τους.

Τέλος, η εργασία αυτή συνέβαλε στο να αποκτηθεί μια αρκετά ευρεία εικόνα των λογισμικών, τα οποία χρησιμοποιούνται από τις εταιρίες Fujitsu, General Electric, Siemens, SAP, Autodesk και Ansys και τα οποία στηρίζονται, ως προς τη λειτουργία τους, στις τεχνολογίες της Industry 4.0 και κατά κύριο λόγο στην τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων και δίνουν έμφαση στην πρόγνωση, στον εντοπισμό των ατελειών, αστοχιών και λαθών, στη συνεργασία των ενδιαφερόμενων μερών, στην αποτελεσματικότητα και στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, στη μείωση του κόστους, αλλά και την βιωσιμότητα.

Η επιλογή του καλύτερου λογισμικού ψηφιακών διδύμων δεν είναι δύσκολο έργο όταν υπάρχουν όλες οι λεπτομέρειες και απαιτήσεις της βιομηχανίας. Τα περισσότερα από τα προαναφερθέντα λογισμικά ψηφιακών διδύμων έχουν εντυπωσιακά και φιλικά προς το χρήστη χαρακτηριστικά. Ωστόσο, εξαρτάται από την κάθε επιχείρηση ποιο λογισμικό θα επιλέξει και που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της. Πρέπει, επομένως να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα και η αποδοτικότητα κάθε λογισμικού ψηφιακού διδύμου, συμπεριλαμβανομένων των χαρακτηριστικών και των δυνατοτήτων του, καθώς και να αξιολογηθούν οι στόχοι, οι απαιτούμενες λειτουργίες και ο προϋπολογισμός της κάθε επιχείρησης πριν επιλέξει το σωστό λογισμικό, που να καλύπτει τις ανάγκες της.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- 1) Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>
- 2) Alouffi, B., Hasnain, M., Alharbi, A., Alosaimi, W., Alyami, H., & Ayaz, M. (2021). A Systematic Literature Review on Cloud Computing Security: Threats and Mitigation Strategies. *IEEE Access*, 9, 57792-57807. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3073203>
- 3) Assad Neto, A., Ribeiro da Silva, E., Deschamps, F., & Pinheiro de Lima, E. (2021). Digital twins in manufacturing: An assessment of key features. *Procedia CIRP*, 97, 178-183. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.222>
- 4) Autiosalo, J., Ala-Laurinaho, R., Mattila, J., Valtonen, M., Peltoranta, V., & Tammi, K. (2021). Towards Integrated Digital Twins for Industrial Products: Case Study on an Overhead Crane. *Applied Sciences*, 11(2), 683. <https://doi.org/10.3390/app11020683>
- 5) Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- 6) Baotong, C., Jiafu, W., Antonio, C., Di, L., Haider, A., & Qin, Zh. (2018). Edge Computing in IoT-Based Manufacturing. *IEEE Communications Magazine*, 56(9), 103-109. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1701231>
- 7) Bashar, A. (2019). Intelligent development of big data analytics for manufacturing industry in cloud computing. *Journal of Ubiquitous Computing and Communication Technologies*, 1 (1), 13-22. <https://doi.org/10.36548/jucct.2019.1.002>
- 8) Bassi, L. (2017). Industry 4.0: hope, hype or revolution? *IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI), IEEE*, 1-6, <https://doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065927>
- 9) Björnsson, B., Borrebaeck, C., Elander, N., Gasslander, T., Gawel, R., Gustafsson, M., Jörnsten, R., Lee, J., Li, X., Lilja, S., Martínez-Enguita, D., Matussek, A., Sandström, P., Schäfer, S., Stenmarker, M., Sun, F., Sysoev, O., Zhang, H., & Benson, M. (2020). Digital twins to personalize medicine. *Genome Medicine*, 12(4). <https://doi.org/10.1186/s13073-019-0701-3>
- 10) Biesinger, F., & Weyrich, M. (2019). The Facets of Digital Twins in Production and the Automotive Industry. *23<sup>rd</sup> International Conference on Mechatronics Technology (ICMT)*, Italy. 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICMECT.2019.8932101>
- 11) Boulos, K., & Zhang, P. (2021). Digital Twins: From Personalised Medicine to Precision Public Health. *Journal of Personalized Medicine*, 11(8), 745. <https://doi.org/10.3390/jpm11080745>

- 12) Braun, M. (2021). Represent me: please! Towards an ethics of digital twins in medicine. *Journal of Medical Ethics*, 47, 394-400. <https://doi.org/10.1136/medethics-2020-106134>
- 13) Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119790>
- 14) Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. WW Norton & Company. <https://cutt.ly/0LP3KcY>
- 15) Cai, Y., Starly, B., Cohen, P., & Lee, Y.-Sh. (2017). Sensor Data and Information Fusion to Construct Digital-twins Virtual Machine Tools for Cyber-physical Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 10, 1031-1042. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094>
- 16) Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An Overview on Edge Computing Research. *IEEE Access*, 8, 85714-85728. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2991734>
- 17) Caprari, G. (2022). Digital Twin for Urban Planning in the Green Deal Era: A State of the Art and Future Perspectives. *Sustainability*, 14(10), 6263. <https://doi.org/10.3390/su14106263>
- 18) Catarci, T., Firmani, D., Leotta, F., Mandreoli, F., Mecella, M., & Sapio, F. (2019). A Conceptual Architecture and Model for Smart Manufacturing Relying on Service-Based Digital Twins. *IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*, 18957442. <https://doi.org/10.1109/icws.2019.00047>
- 19) Chen, J., & Ran, X. (2019). Deep Learning With Edge Computing: A Review. *Proceedings of the IEEE*, 107(8), 1655-1674. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2019.2921977>
- 20) Chen, Y., Yang, O., Sampat, C., Bhalode, P., Ramachandran, R., & Ierapetritou, M. (2020). Digital Twins in Pharmaceutical and Biopharmaceutical Manufacturing: A Literature Review. *Processes*, 8(9), 1088. <https://doi.org/10.3390/pr8091088>
- 21) Cioffi, R., Travaglioni, M., Piscitelli, G., Petrillo, A., & De Felice, F. (2020). Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Smart Production: Progress, Trends, and Directions. *Sustainability*, 12(2), 492. <https://doi.org/10.3390/su12020492>
- 22) Corallo, A., Lazoi, M., & Lezzi, M. (2020). Cybersecurity in the context of industry 4.0: A structured classification of critical assets and business impacts. *Computers in Industry*, 114, 103165. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103165>
- 23) Corallo, A., Lazoi, M., Lezzi, M., Pontrandolfo, P. (2021). Cybersecurity Challenges for Manufacturing Systems 4.0: Assessment of the Business Impact Level. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 1-21. <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3084687>
- 24) Cronrath, C., Aderiani, R., & Lennartson, B. (2019). Enhancing Digital Twins through Reinforcement Learning. *IEEE 2019 IEEE 15<sup>th</sup> International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) – Vancouver, BC, Canada*, 293-298. <https://doi.org/10.1109/coase.2019.8842888>

- 25) Dalenogare, L., Benitez, G., Ayala, N., Frank, A. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- 26) Damjanovic-Behrendt, V., & Behrendt, W. (2019). An open source approach to the design and implementation of Digital Twins for Smart Manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(4-5), 366-384. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599436>
- 27) Dembski, F., Wössner, U., Letzgus, M., Ruddat, M., & Yamu, Cl. (2020). Urban Digital Twins for Smart Cities and Citizens: The Case Study of Herrenberg, Germany. *Sustainability*, 12(6), 2307. <https://doi.org/10.3390/su12062307>
- 28) Deren, L., Wenbo, Y., & Zhenfeng, S. (2021). Smart city based on digital twins. *Computational Urban Science*, 1(4). <https://doi.org/10.1007/s43762-021-00005-y>
- 29) Dian, J., Vahidnia, R., & Rahmati, A. (2020). Wearables and the Internet of Things (IoT), Applications, Opportunities, and Challenges: A Survey. *IEEE Access*, 8, 69200-69211. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986329>
- 30) Dixit, P., & Silakari, S. (2021). Deep Learning Algorithms for Cybersecurity Applications: A Technological and Status Review. *Computer Science Review*, 39, 100317. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100317>
- 31) Du, J., Zhu, Q., Shi, Y., Wang, Q., Lin, Y., & Zhao, D. (2020). Cognition Digital Twins for Personalized Information Systems of Smart Cities: Proof of Concept. *American Society of Civil Engineers*, 36(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000740](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000740)
- 32) El Saddik, A. (2018). Digital Twins: The Convergence of Multimedia Technologies. *IEEE MultiMedia*, 25(2), 87-92. <https://doi.org/10.1109/MMUL.2018.023121167>
- 33) Fahle, S., Prinz, C., & Kuhlentötter, B. (2020). Systematic review on machine learning (ML) methods for manufacturing processes – Identifying artificial intelligence (AI) methods for field application. *Procedia CIRP*, 93, 413-418. <https://cutt.ly/SZX9kp8>
- 34) Frick, N., & Metternich, J. (2022). The Digital Value Stream Twin. *Systems*, 10(4), 102. <https://doi.org/10.3390/systems10040102>
- 35) Friederich, J., Francis, D., Lazarova-Molnar, S., & Mohamed, N. (2022). A framework for data-driven digital twins of smart manufacturing systems. *Computers in Industry*, 136, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103586>
- 36) Fuller, A., Fan, Zh., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, 108952-108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- 37) Gayialis, S., Kechagias, E., Papadopoulos, G., & Masouras, D. (2022a). A Review and Classification Framework of Traceability Approaches for Identifying Product Supply Chain Counterfeiting. *Sustainability*, 14(1), 6666. <https://doi.org/10.3390/su14116666>

- 38) Gayialis, S., Kechagias, E., Konstantakopoulos, G., & Papadopoulos, G. (2022b) A Predictive Maintenance System for Reverse Supply Chain Operations. *Logistics*, 6(1), 4. <https://doi.org/10.3390/logistics6010004>
- 39) General Electric Company (2016). *GE Digital Twin: Analytic Engine for the Digital Power Plant*. <https://cutt.ly/RVzQRLR>
- 40) Ghobakhloo, M. (2019). Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- 41) Grieves, M. (2014). *Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication*. <https://cutt.ly/2ZXDWzj>
- 42) Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 85-113. <https://cutt.ly/CZXDKx7>
- 43) Hassani, H., Huang, X., & MacFeely, S. (2022). Impactful Digital Twin in the Healthcare Revolution. *Big Data and Cognitive Computing*, 6(3), 83. <https://doi.org/10.3390/bdcc6030083>
- 44) Helm, M., Swiergosz, A., Haeberle, H., Karnuta, J., Schaffer, J., Krebs, V., Spitzer, A., & Ramkumar, P. (2020). Machine Learning and Artificial Intelligence: Definitions, Applications, and Future Directions. *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 13(1), 69-76. <https://doi.org/10.1007/s12178-020-09600-8>
- 45) Holdowsky, J., Mahto, M., Raynor, E., & Cotteleer M. (2015). *Inside the Internet of Things (IoT): A Primer on the Technologies Building the IoT*. Deloitte University Press. <https://cutt.ly/IZXD2kG>
- 46) Intizar Ali, M., Patel, P., Breslin, J., Harik, R., Sheth, A., & Sheth, A. (2021). Cognitive Digital Twins for Smart Manufacturing. *IEEE Intelligent Systems*, 36(2), 96-100. <https://doi.org/10.1109/MIS.2021.3062437>
- 47) Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., & Perakovic, D. (2020). Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. *Proceedings of the 3rd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2020*, June 9-12, 2020, Kharkiv, Ukraine – Volume 1: Manufacturing and Materials Engineering. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7>
- 48) Jaensch, F., Csiszar, A., Scheifele, C., & Verl, A. (2018). Digital Twins of Manufacturing Systems as a Base for Machine Learning. *IEEE 25<sup>th</sup> International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP) - Stuttgart, Germany*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2018.8600844>
- 49) Jakhar, D., & Kaur, I. (2020). Artificial intelligence, machine learning and deep learning: definitions and differences. *Clinical and Experimental Dermatology*, 45(1), 131-132. <https://doi.org/10.1111/ced.14029>

- 50) Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29(A), 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- 51) Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*. <https://cutt.ly/0LP373O>
- 52) Kalsoom, T., Ramzan, N., Shehzad, A., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0. *Sensors*, 20(23), 6783. <https://doi.org/10.3390/s20236783>
- 53) Katoh, M., Kubota, T., Yasuie, T., Watanabe, Y., & Nomura, Y. (2021). Proposal of Management Agent for Delay Sensitive IoT Communication. *International Conference on Information Networking (ICOIN)*. <https://doi.org/10.1109/icoin50884.2021.9334001>
- 54) Kaznah, A., Beach, T., & Rezgui, Y. (2021). Cybersecurity for digital twins in the built environment: current research and future directions. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 26, 159-173. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.010>
- 55) Keng-Boon, O., Voon-Hsien, L., Garry Wei-Han, T., Teck-Soon, H., & Jun-Jie, H. (2017). Cloud computing in manufacturing: The next industrial revolution in Malaysia?. *Expert Systems With Applications*, 93, 376-394. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.10.009>
- 56) Kholopov, V., Antonov, S., Kurnasov, E., & Kashirskaya, E. (2019). Digital Twins in Manufacturing. *Russian Engineering Research*, 39(12), 1014-1020. <https://doi.org/10.3103/S1068798X19120104>
- 57) Kim, W., Lee, G., Son, H., Choi, H., & Youn, B. (2022). Estimation of fatigue crack initiation and growth in engineering product development using a digital twin approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 226, 108721. <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108721>
- 58) Klingenberg, C., Borges, M., & do Vale Antunes Jr, J. (2022). Industry 4.0: What makes it a revolution? A historical framework to understand the phenomenon. *Technology in Society*, 70, 102009. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102009>
- 59) Konstantakopoulos, G., Gayialis, S., Kechagias, E., Papadopoulos, G., & Tatsiopoulos, I. (2021). An algorithmic approach for Sustainable and collaborative logistics: a case study in Greece. *International Journal of Information Management Data Insights*, 1(1), 100010. <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2021.100010>
- 60) Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- 61) Kumar, N., & Siddharthan, N. (2013). *Technology, Market Structure and Internationalization: Issues and Policies for Developing Countries*. London: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203769904>



- 62) Lampropoulos, G., Siakas, K., & Anastasiadis, T. (2019). Internet of Things in the Context of Industry 4.0: An Overview. *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, 7(1), 4-19. <https://doi.org/10.2478/ijek-2019-0001>
- 63) Leng, J., Chen, Z., Sha, W., Lin Z., Lin, J., & Liu, Q. (2022). Digital twins-based flexible operating of open architecture production line for individualized manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101676. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101676>
- 64) Lezzi, M., Lazoi, M., & Corallo, A. (2018). Cybersecurity for Industry 4.0 in the current literature: A reference framework. *Computers in Industry*, 103, 97-110. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.09.004>
- 65) Li, Ch., Zheng, P., Li, Sh., Pang, Y., & Lee, C. (2022 $\alpha$ ). AR-assisted digital twin-enabled robot collaborative manufacturing system with human-in-the-loop. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 76, 102321. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102321>
- 66) Li, Y., Tao, Zh., Wang, L., Du, B., Guo, J., & Pang, Sh. (2022 $\beta$ ). Digital twin-based job shop anomaly detection and dynamic scheduling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, 102443. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102443>
- 67) Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58(B), 346-361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>
- 68) Longo F., Padovano A., Nicoletti L., Elbasheer M., & Diaz R. (2021). Digital twins for manufacturing and logistics systems: is simulation practice ready? *Proceedings of the 33rd European Modeling & Simulation Symposium (EMSS 2021)*, 435-442. <https://doi.org/10.46354/i3m.2021.emss.062>
- 69) Lu, Y., & Da Xu, L. (2018). Internet of Things (IoT) Cybersecurity Research: A Review of Current Research Topics. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 2103-21151. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2869847>
- 70) Mabkhot, M., Al-Ahmari, A., Salah, B., & Alkhalefah, H. (2018). Requirements of the Smart Factory System: A Survey and Perspective. *Machines*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/machines6020023>
- 71) Mahdavifar, S., & Ghorbani, A. (2019). Application of Deep Learning to Cybersecurity: A Survey. *Neurocomputing*, 347, 149-176. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.02.056>
- 72) Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2018). A review of Internet of Things (IoT) embedded Sustainable Supply Chain for Industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925-953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- 73) Marmolejo-Saucedo, J.-A. (2020). Design and Development of Digital Twins: a Case Study in Supply Chains. *Mobile Networks and Applications*, 25, 2141-2160. <https://doi.org/10.1007/s11036-020-01557-9>



- 74) Masood, T., & Sonntag, P. (2020). Industry 4.0: Adoption challenges and benefits for SMEs. *Computers in Industry*, 121, 103261. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103261>
- 75) Matsumoto, T., Matsui, K., Morimatsu, E., Ueki, M., Ohno, T., & Kanemasa, Y. (2020). *Dracena: Real-Time Digital Twin Platform*. Fujitsu Technical Review. <https://cutt.ly/2Xlzbhr>
- 76) Morgado, J., Ghedini, E., Goldbeck, G., Hashibon, A., Schmitz, G., Friis, J., & de Baas, A. (2020). Mechanical Testing Ontology for Digital-Twins: a roadmap based on EMMO. *International Workshop on Semantic Digital Twins, SeDiT 2020*. <https://cutt.ly/YV3czv1>
- 77) Mullet, V., Sondi, P., & Ramat, E. (2021). A Review of Cybersecurity Guidelines for Manufacturing Factories in Industry 4.0. *IEEE Access*, 9, 23235-23263. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056650>
- 78) Mussomeli, A., Gish, D., & Laaper, S. (2016). *The Rise of the Digital Supply Network. Industry 4.0 enables the digital transformation of supply chains*. Deloitte University Press. <https://cutt.ly/rZXHKSP>
- 79) Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C. & Munoz, L. (2021). Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. *IEEE Access*, 9, 143222-143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>
- 80) Najmul, H., Saira, G., Ejaz, A., Ibrar, Y., & Muhammad, I. (2018). The Role of Edge Computing in Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 56(11), 110-115. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700906>
- 81) Nain, G., Pattnaik, K., & Sharma, G. (2022). Towards edge computing in intelligent manufacturing: Past, present and future. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 588-611. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.01.010>
- 82) Nižetić, S., Solic, P., & Lopez-de-Ipina Gonzalez-de-Artaza, D. (2020). Internet of Things (IoT): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122877. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122877>
- 83) Noor, M., & Wan Haslina, H. (2018). Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey. *Computer Networks*, 148, 283-294. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.025>
- 84) Onishi, T., Michaelis, J., & Kanemasa, Y. (2020). Recovery-Conscious Adaptive Watermark Generation for Time-Order Event Stream Processing. *IEEE/ACM Fifth International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI) - Sydney, Australia*, 66-78. <https://doi.org/10.1109/IoTDI49375.2020.00014>
- 85) Osterrieder, P., Budde, L., & Friedli, T. (2019). The Smart Factory as a key construct of Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, 221, 107476. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.011>
- 86) Pech, M., Vrchota, J., & Bednář, J. (2021). Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review. *Sensors*, 21(4), 1470. <https://doi.org/10.3390/s21041470>

- 87) Priyanka, M., Tiwari, A., Jin, C., Kumar, P., Reddy, N., Bukkapatnam, S., Gupta, N., & Karri, R. (2020). A Survey of Cybersecurity of Digital Manufacturing. *Proceedings of the IEEE*, 104(4), 495-516. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3032074>
- 88) Radziwon, A., Bilberg, A., Bogers, M., & Skov Madsen, E. (2014). The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering*, 69, 1184-1190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>
- 89) Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., Lopes de Sousa J., Ana B., & Rajak, S. (2019). Barriers to the Adoption of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing Sector: An Inter-Country Comparative Perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, 107546. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>
- 90) Rassõlkin, A., Orosz, T., Demidova, G., Kuts, V., Rjabtšikov, V., Vaimann, T., & Kallaste, A. (2021). Implementation of Digital Twins for electrical energy conversion systems in selected case studies. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 70(1), 19-39. <https://doi.org/10.3176/proc.2021.1.03>
- 91) Raut, R., Gardas, B., Narkhede, B., & Narwane, V. (2019). To investigate the determinants of cloud computing adoption in the manufacturing micro, small and medium enterprises: A DEMATEL-based approach. *Benchmarking: An International Journal*, 26(3), 990-1019. <https://doi.org/10.1108/BIJ-03-2018-0060>
- 92) Resman, M., Protner, J., Simic, M., & Herakovic, N. (2021). A Five-Step Approach to Planning Data-Driven Digital Twins for Discrete Manufacturing Systems. *Applied Sciences*, 11(8), 3639. <https://doi.org/10.3390/app11083639>
- 93) Rosen, R., von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- 94) Sadeeq, M., Abdulkareem, N., Zeebaree, S., Ahmed, D., Sami, A., & Zebari, R., (2021). IoT and Cloud Computing Issues, Challenges and Opportunities: A Review. *Qubahan Academic Journal*, 1(2), 1-7. <https://doi.org/10.48161/qaj.v1n2a36>
- 95) Salem, T., & Dragomir, M. (2022). Options for and Challenges of Employing Digital Twins in Construction Management. *Applied Sciences*, 12(6), 2928. <https://doi.org/10.3390/app12062928>
- 96) Saracco, R. (2019). Digital Twins: Bridging Physical Space and Cyberspace. *Journals & Magazines*, 52(12), 58-64. <https://doi.org/10.1109/MC.2019.2942803>
- 97) Scheer, A. (2015). *Whitepaper - Industry 4.0: From vision to implementation*. <https://cutt.ly/ELP8LQ2>
- 98) Schleich, B., Answer, N., Mathieu, & L. Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 66(1), 141-144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>

- 99) Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, 103469. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2021.103469>
- 100) Sepasgozar, S. (2021). Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*, 11(4), 151. <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>
- 101) Sharma, A., Kaur, J., & Singh, I. (2020). Internet of Things (IoT) in Pharmaceutical Manufacturing, Warehousing, and Supply Chain Management. *SN Computer Science*, 1(232). <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00248-2>
- 102) Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., & Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607-617. <https://doi.org/10.1002/sres.2704>
- 103) Siemens (2018). *Digital twin – Driving business value throughout the building life cycle*. Building Technologies Division International Headquarters. <https://cutt.ly/TXobyHG>
- 104) Siemens (2020). *Simulation & Digital Twin*. Siemens Corporation Corporate Technology 755 College Road East, Princeton, NJ 08540. <https://cutt.ly/bXoc6O9>
- 105) Sony, M., & Naik, S. (2019). Key ingredients for evaluating Industry 4.0 readiness for organizations: a literature review. *Benchmarking: An International Journal*, 27(7), 2213-2232. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2018-0284>
- 106) Stark, R., Fresemann, C., & Lindow, K. (2019). Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 68(1), 129-132. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.024>
- 107) Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2020). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. *Production Planning & Control*, 32(10), 811-828. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>
- 108) Stoyanova, M., Nikoloudakis, Y., Panagiotakis, S., Pallis, E., & Markakis, E.K. (2020). A Survey on the Internet of Things (IoT) Forensics: Challenges, Approaches and Open Issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(2), 1191-1221. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2962586>
- 109) Tahiri, I., Philippot, A., Carré-Ménétrier, V., & Tajer, A. (2022). A Fault-Tolerant and a Reconfigurable Control Framework: Application to a Real Manufacturing System. *Processes*, 10(7), 1266. <https://doi.org/10.3390/pr10071266>
- 110) Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer London, 94(9-12), 3563- 3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>

- 111) Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. (2019). Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- 112) Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418- 20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- 113) Taylor, N., Human, C., Kruger, K., Bekker, A., & Basson, A. (2020). Comparison of Digital Twin Development in Manufacturing and Maritime Domains. *Studies in Computational Intelligence*, 853, 158-170. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_12)
- 114) Teng, S., Tous, M., Leong, W., How, B., Lam, H., & Masa, V. (2021). Recent advances on industrial data-driven energy savings: Digital twins and infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110208. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110208>
- 115) Tu, N., Sherali, Z., & Abhijith, V. (2022). Cyber-Physical Cloud Manufacturing Systems with Digital-Twins. *IEEE Internet Computing*, 26(3), 15-21. <https://doi.org/10.1109/mic.2021.3058921>
- 116) Vancea, D., & Nemirschi, A. (2020). Challenges in Using AI in Online Commerce. “Ovidius” *University Annals, Economic Sciences Series*, XX(2). <https://cutt.ly/fV1jJh6>
- 117) Wan, J., Li, J., Imran, M., Li, D., & e-Amin, F. (2019). A Blockchain-Based Solution for Enhancing Security and Privacy in Smart Factory. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(6), 3652-3660. <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2894573>
- 118) Wu, D., Ren, A., Zhang, W., Fan, F., Liu, P., Fu, X., & Terpenney, J. (2018). Cybersecurity for digital manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 48(C) 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.006>
- 119) Yamaoka, H., Itakura, K., Takahashi, E., Nakagawa, G., Michaelis, J., Kanemasa, Y., Ueki, M., Matsumoto, T., Take, R., Tanie, S., & Inoue, D. (2019). Dracena: A Real-Time IoT Service Platform Based on Flexible Composition of Data Streams. *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) – Paris, France*, 596-601. <https://doi.org/10.1109/SII.2019.8700465>
- 120) Yasin, A., Pang, T., Cheng, C.-T., & Miletic, M. (2021). A Roadmap to Integrate Digital Twins for Small and Medium-Sized Enterprises. *Applied Sciences*, 11(20), 9479. <https://doi.org/10.3390/app11209479>
- 121) Yu, W., Patros, Π., Young, B., Klinac, E., & Walmsley, T. (2022). Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161, 112407. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407>

- 122) Zhang, L., Chen, X., Zhou, W., Cheng, T., Chen, L., Guo, Z., Han, B., & Lu, L. (2020). Digital Twins for Additive Manufacturing: A State-of-the-Art Review. *Applied Sciences*, 10(23), 8350. <https://doi.org/10.3390/app10238350>
- 123) Zborowski, M. (2018). Finding Meaning, Application for the Much-Discussed Digital Twin. *Society of Petroleum Engineers. Reprinted from the Journal of Petroleum Technology with permission*, 26-32. <https://cutt.ly/PXoUrek>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Κατηγοριοποίηση τελικών ερευνών βάσει του έτους δημοσίευσης, του αντικειμένου και του κλάδου εφαρμογής (όπου αυτό είναι εφικτό).

Συγγραφείς	Έτος	Αντικείμενο/Θέμα	Κλάδος εφαρμογής
Klingenberg et al.	2022	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
Ghobakhloo	2019	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
Stentoft et al.	2020	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
		Ετοιμότητα των επιχειρήσεων	
Büchi et al.	2020	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
		Έξυπνο εργοστάσιο	
		AI/ML	
Sony & Naik	2019	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
		Προκλήσεις της Industry 4.0	
		Ετοιμότητα των επιχειρήσεων	
Bassi	2017	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
Mabkhot et al.	2018	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
		Έξυπνο εργοστάσιο	
		AI/ML	
Scheer	2015	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
Bashar	2019	Ιστορικό πλαίσιο για την Industry 4.0	
		AI/ML	
Bai et al.	2020	Πλεονεκτήματα της Industry 4.0	
Dalenogare et al.	2018	Προκλήσεις της Industry 4.0	
Kumar & Siddharthan	2013	Προκλήσεις της Industry 4.0	
Brynjolfsson & McAfee	2014	Προκλήσεις της Industry 4.0	
Kagermann et al.	2013	Προκλήσεις της Industry 4.0	
Shi et al.	2020	Προκλήσεις της Industry 4.0	
		Έξυπνο εργοστάσιο	
Masood & Sonntag	2020	Ετοιμότητα των επιχειρήσεων	
Raj et al.	2019	Προκλήσεις της Industry 4.0	

		Ετοιμότητα των επιχειρήσεων	
Lampropoulos et al.	2019	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
Sharma et al.	2020		
Alouffi et al.	2021	Υπολογιστικό νέφος	
		Κυβερνοασφάλεια	
Cao et al.	2020	Υπολογιστική παρυφή	
Chen & Ran	2019	Υπολογιστική παρυφή	
Nain et al.	2022	Υπολογιστική παρυφή	
Corallo et al.	2020	Κυβερνοασφάλεια	
Corallo et al.	2021	Κυβερνοασφάλεια	
Lu & Da Xu	2018	Κυβερνοασφάλεια	
Nizetić et al.	2020	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
Stoyanova et al.	2020	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
Dian et al.	2020	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
Noor & Wan Haslina	2018	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
Manavalan & Jayakrishna	2018	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
Sadeeq et al.	2021	Διαδίκτυο των πραγμάτων	
		Υπολογιστικό νέφος	
Keng-Boon et al.	2017	Υπολογιστικό νέφος	
Raut et al.	2019	Υπολογιστικό νέφος	
Najmul et al.	2018	Υπολογιστική παρυφή	
Baotong et al.	2018	Υπολογιστική παρυφή	
Jakhar & Kaur	2020	AI/ML	
Helm et al.	2020	AI/ML	
Cioffi et al.	2020	AI/ML	
Fahle et al.	2020	AI/ML	
Mullet et al.	2021	Κυβερνοασφάλεια	
Dixit & Silakari	2021	Κυβερνοασφάλεια	
Mahdavifar & Ghorbani	2019	Κυβερνοασφάλεια	
Priyanka et al.	2020	Κυβερνοασφάλεια	
Lezzi et al.	2018	Κυβερνοασφάλεια	
Wu et al.	2018	Κυβερνοασφάλεια	
Tu et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	
Zhang et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	
Tao et al.	2019	Ψηφιακό δίδυμο	
Kritzinger et al.	2018	Ψηφιακό δίδυμο	
Fuller et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Stark et al.	2019	Ψηφιακό δίδυμο	
Kalsoom et al.	2020	Έξυπνο εργοστάσιο	
Wan et al.	2019	Έξυπνο εργοστάσιο	
Radziwon et al.	2014	Έξυπνο εργοστάσιο	
		AI/ML	
Pech et al.	2021	Έξυπνο εργοστάσιο	
Gayialis et al.	2022b	Έξυπνο εργοστάσιο	
		AI/ML	
Osterrieder et al.	2019	Έξυπνο εργοστάσιο	
Biesinger & Weyrich	2019	Ψηφιακό δίδυμο	
Grieves & Vickers	2016	Ψηφιακό δίδυμο	
Deren et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Έξυπνες πόλεις

Jones et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	
Kaznah et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Έξυπνες πόλεις
Liu et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	
Mylonas et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Έξυπνες πόλεις
Schleich et al.	2017	Ψηφιακό δίδυμο	
Boulos & Zhang	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Υγεία
Grieves	2014	Ψηφιακό δίδυμο	
El Saddik	2018	Ψηφιακό δίδυμο	
Holdowsky et al.	2015	Ψηφιακό δίδυμο	
Tao & Zhang	2017	Ψηφιακό δίδυμο	
Mussomeli et al.	2016	Ψηφιακό δίδυμο	
Hassani et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	
Caprari	2022	Ψηφιακό δίδυμο	
Longo et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	
Yu et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	
Du et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Έξυπνες πόλεις
Dembski et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Έξυπνες πόλεις
Björnsson et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Υγεία
Braun	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Υγεία
Kholopov et al.	2019	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Resman et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Intizar Ali et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Damjanovic-Behrendt & Behrendt	2019	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Jaensch et al.	2018	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
		AI/ML	
Friederich et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Assad Neto et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Catarci et al.	2019	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Cai et al.	2017	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Rosen et al.	2015	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Cronrath et al.	2019	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
		AI/ML	
Gayialis et al.	2022a	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
		Προκλήσεις της Industry 4.0	
Konstantakopoulos et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Frick & Metternich	2022	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Kim et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Leng et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Li et al.	2022a	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Tahiri et al.	2022	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Salem & Dragomir	2022	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Katoh et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	
Matsumoto et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
		AI/ML	
Onishi et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Yamaoka et al.	2019	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Marmolejo-Saucedo	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Yasin et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Saracco	2019	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Chen et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία



Ivanov et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Taylor et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Zborowski	2018	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Sepasgozar	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία
Morgado et al.	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Επιστήμη των υλικών
Rassólkin et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Ενέργεια
Teng et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Ενέργεια
Vancea & Nemirschi	2020	Ψηφιακό δίδυμο	Λιανικό και ηλεκτρονικό εμπόριο
Autiosalo et al.	2021	Ψηφιακό δίδυμο	Βιομηχανία