



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ  
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Δυνατότητες και προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων για το  
σχεδιασμό και την παραγωγή προϊόντων στη Βιομηχανία 4.0**

**Συγγραφέας**

**Κατσογιάννη Ελπίδα**

**ΑΜ: 18389220**

**Επιβλέπων: Μιχαήλ Παπουτσιδάκης**

**Συνεπιβλέπουσα: Ελένη Συμεωνάκη**

**Αθήνα, Ιούλιος 2023**



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

**Diploma Thesis**

**Potentials and challenges of digital twins for product design and  
production in Industry 4.0**

**Student:**

**Elpida Katsogianni**

**Registration Number: 18389220**

**Supervisor: Michail Papoutsidakis**

**Co-Supervisor: Eleni Symeonaki**

**Athens, July 2023**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**

**Δυνατότητες και προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων για το σχεδιασμό και την παραγωγή προϊόντων στη Βιομηχανία 4.0**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

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

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

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Κατσογιάννη Ελπίδα του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 18389220 φοιτητήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες της Διπλωματικής μου Εργασίας, κ.κ Μιχαήλ Παπουτσιδάκη (Καθηγητής) και Ελένη Συμεωνάκη (ΕΔΙΠ Α'), για την ανεκτίμητη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές του Πανεπιστημίου μου για την ποιοτική διδασκαλία τους που με εφοδίασε με τις γνώσεις και τις δεξιότητες που απαιτούνταν για αυτήν την προσπάθεια. Τέλος, με χαρά θα ήθελα να εκφράσω τις ευγνωμοσύνες μου προς τους αγαπημένους μου ανθρώπους που με στήριξαν και με εμπύχωσαν καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας. Οι λόγοι επιτυχίας μου είναι χάρη σε εσάς όλους!

## Περίληψη

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων προσφέρει μεγάλες δυνατότητες σε διάφορους τομείς της διαδικασίας παραγωγής προϊόντων. Ωστόσο, οι τρέχουσες προσεγγίσεις για τη χρήση των ψηφιακών διδύμων επικεντρώνονται μόνο σε μεμονωμένους κλάδους. Σε αντίθεση με αυτό, αναμένεται ότι η ολιστική χρήση ψηφιακών δίδυμων μοντέλων στην ανάπτυξη και παραγωγή προϊόντων θα κυριαρχήσει στις μελλοντικές γενιές προϊόντων, επειδή επιτρέπουν τη δημιουργία ανταγωνιστικών προϊόντων υψηλής απόδοσης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνώνται οι σημαντικές προκλήσεις και μελλοντικές δυνατότητες των ψηφιακών διδύμων και της Βιομηχανίας 4.0 (Industry 4.0) για την απρόσκοπτη ενοποίηση των προδιαγραφών και της παραγωγής του προϊόντος. Από αυτή την άποψη, οι προσεγγίσεις για τη σύνδεση των ψηφιακών διδύμων με άλλους τομείς ανοίγουν νέες δυνατότητες για την ενοποίηση της παραγωγής. Έτσι, επιτυγχάνονται πιο αποδοτικές προδιαγραφές των προϊόντων από τεχνική και οικονομική άποψη για τον κατασκευαστή. Επιπλέον, η συνδεσιμότητα της Βιομηχανίας 4.0 διευρύνει το πεδίο εφαρμογής και επιτρέπει την αξιολόγηση εναλλακτικών προσεγγίσεων στο σχεδιασμό και τον έλεγχο της παραγωγής. Προσεγγίσεις σε οργανωτικό επίπεδο, λειτουργίες προϊόντων με προδιαγραφές πέρα από τα τεχνολογικά όρια και στρατηγικές ελέγχου παραγωγής (π.χ. αποστολή παραγγελιών) διασφαλίζουν λειτουργίες υψηλής απόδοσης.

*Λέξεις κλειδιά : τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων, μελλοντικές γενιές, προκλήσεις και μελλοντικές δυνατότητες, αποδοτικές προδιαγραφές , λειτουργίες υψηλής απόδοσης.*

## **Abstract**

The technology of digital twins offers great potential in various areas of the production process. However, current approaches to the use of digital twins focus only on specific sectors. In contrast, it is expected that the holistic use of digital twin models in product development and production will dominate future generations of products, as they enable the creation of high-performance competitive products. This thesis explores the significant challenges and future possibilities of digital twins and Industry 4.0 for the seamless integration of product specifications and production. From this perspective, approaches to connecting digital twins with other fields open up new possibilities for production integration. Thus, more efficient product specifications are achieved from a technical and economic perspective for the manufacturer. Furthermore, the connectivity of Industry 4.0 expands the scope of application and allows for the evaluation of alternative approaches in design and production control. Organizational approaches, product functions with specifications beyond technological limits, and production control strategies (e.g., order dispatch) ensure high-performance operations.

*Key words : technology of digital twins , future generations , challenges and future possibilities , efficient product specifications , high-performance operations .*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	5
Περίληψη .....	6
Abstract.....	7
Κατάλογος Εικόνων.....	11
Κατάλογος Πινάκων.....	12
Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 1 Βιομηχανία 4.0.....	16
1.1 Προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις.....	16
1.2 Τεχνολογικά επιτεύγματα.....	17
1.3 Οικονομικοί θεσμοί .....	19
1.4 Κοινωνική δομή .....	21
1.5 Βιομηχανία 4.0: Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση.....	23
Κεφάλαιο 2 Ψηφιακά δίδυμα.....	30
2.1 Βιομηχανικό Κυβερνο-Φυσικό Σύστημα (CPS).....	30
2.2 Ψηφιακά δίδυμα.....	31
2.3 Έννοια του Φυσικού και Εικονικού Μοντέλου του Ψηφιακού διδύμου .....	37
2.4 Επίδραση των ψηφιακών διδύμων στις βιομηχανίες - Βιομηχανία 4.0 .....	39
Κεφάλαιο 3 Ψηφιακά δίδυμα και Βιομηχανία 4.0.....	41
3.1. Ο ρόλος των ψηφιακών διδύμων στην εποχή της βιομηχανίας 4.0 .....	41
3.2. Τι είναι το ψηφιακό δίδυμο.....	42
3.3. Πώς λειτουργεί ένα ψηφιακό δίδυμο .....	42
3.4. Γιατί είναι σημαντική η ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία.....	43
3.5. Οφέλη των ψηφιακών διδύμων .....	44
3.6. Προκλήσεις ασφαλείας με ψηφιακά δίδυμα .....	46
3.7. Το μέλλον του ψηφιακού διδύμου.....	47
3.8. Βιομηχανία 4.0 και ψηφιακά δίδυμα .....	48
3.9. Ramī 4.0 .....	50
3.10. Ψηφιακό δίδυμο.....	52
3.11. Διεθνείς χώροι δεδομένων .....	54
3.12. Ψηφιακό δίδυμο που βασίζεται σε AAS: σχετική εργασία .....	56



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	57
Σχεδιασμός και ανάπτυξη Προϊόντων στην βιομηχανία των Ψηφιακών διδύμων.....	57
4.1 Δυνατότητες των Ψηφιακών δίδυμων στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων.....	57
4.2 Στάδια σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων με βάση τα ψηφιακά δίδυμα .....	59
4.2.1 Εννοιολογικός Σχεδιασμός.....	59
4.2.2 Λεπτομερής σχεδιασμός.....	60
4.2.3 Επαλήθευση σχεδιασμού .....	61
4.2.4 Επανασχεδιασμός.....	61
4.3. Προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων στον σχεδιασμό & ανάπτυξη προϊόντων.....	62
4.4. Η δόμηση των ψηφιακών διδύμων για τον σχεδιασμό προϊόντων. ....	63
4.4.1. Οι φυσικές οντότητες. ....	64
4.4.2. Το εικονικό αντίγραφο.....	64
4.4.3. Σύνδεση.....	65
4.4.4. Περιβάλλον προσομοίωσης:.....	65
4.4.5 Δεδομένα .....	65
Κεφάλαιο 5 .....	67
Δυνατότητες και έρευνα στην εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου .....	67
5.1. Υποδομή Πληροφορικής.....	67
5.2. Δεδομένα .....	68
5.3 Απόρρητο και ασφάλεια.....	68
5.4 Εμπιστοσύνη .....	69
5.5. Προσδοκίες .....	69
5.6. Δεδομένα, Απόρρητο, Ασφάλεια και Εμπιστοσύνη στο ΙoT.....	70
4.6.1. Υποδομή.....	71
5.6.2. Συνδεσιμότητα.....	71
5.6.3. Προσδοκίες .....	72
5.7. Προκλήσεις Ψηφιακών Διδύμων.....	73
5.7.1. Υποδομή Πληροφορικής.....	73
5.7.2. Χρήσιμα Δεδομένα .....	73
5.7.3. Απόρρητο και ασφάλεια.....	74
5.7.4. Εμπιστοσύνη .....	74
5.7.5. Προσδοκίες .....	75
5.7.6. Τυποποιημένη Μοντελοποίηση .....	75

5.7.7. Μοντελοποίηση τομέα .....	76
Κεφάλαιο 6 Ψηφιακές εφαρμογές που συνδέουν διαφορετικούς τομείς .....	77
6.1. Έξυπνες πόλεις.....	77
6.2. Βιομηχανοποίηση .....	79
6.3. Φροντίδα υγείας.....	81
6.4. Ψηφιακά δίδυμα στη βιομηχανία .....	83
6.5. Ψηφιακά δίδυμα στην κατασκευή .....	85
6.6. Κοινές Ανάγκες Και Συγκεκριμένα Ευρήματα.....	86
6.6.1. Μοντέλα Δεδομένων .....	86
6.6.2. Ετερογενή Συστήματα.....	87
6.6.3. Τεχνητή Νοημοσύνη (AI).....	87
6.6.4. Ασφάλεια .....	87
6.6.5. Ανταλλαγή δεδομένων .....	88
6.6.6. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	88
Κεφάλαιο 7 Μελλοντικές Προκλήσεις Έρευνας του Ψηφιακού Διδύμου.....	89
7.1. Πολυεπιστημονικότητα .....	89
7.2. Τυποποίηση .....	89
7.3. Παγκόσμιες Πρόοδοι .....	89
Συμπεράσματα.....	91
Βιβλιογραφία .....	95

## Κατάλογος Εικόνων

<b>Εικόνα 1</b> Πλαίσιο με τα στοιχεία για τον χαρακτηρισμό των βιομηχανικών επαναστάσεων. ....	23
<b>Εικόνα 2</b> Ψηφιακός μετασχηματισμός των βιομηχανιών .....	24
<b>Εικόνα 3</b> Ψηφιακός μετασχηματισμός διαφόρων φυσικών συστημάτων. ....	35
<b>Εικόνα 4</b> Έννοια του φυσικού και εικονικού μοντέλου του ψηφιακού διδύμου .....	37
<b>Εικόνα 5.</b> Μεθοδολογία λειτουργίας ψηφιακού διδύμου .....	43
<b>Εικόνα 6.</b> Αντανάκλαση από τον ψηφιακό στον φυσικό κόσμο και το αντίστροφο .....	46
<b>Εικόνα 7.</b> Μοντέλο αρχιτεκτονικής αναφοράς για τη βιομηχανία 4.0 .....	51
<b>Εικόνα 8.</b> Αλληλεπιδράσεις στοιχείων IDS σύμφωνα με την IDS-RAM .....	55
<b>Εικόνα 9.</b> Παράδειγμα δημιουργίας σχεδιασμού φυσικού πρότυπου (UPP) με ψηφιακά δίδυμα	

## **Κατάλογος Πινάκων**

<b>Πίνακας 1</b> Ορισμοί των ψηφιακών διδύμων (DT) .....	<b>31</b>
--	-----------

## Εισαγωγή

«Η βιομηχανική επανάσταση σηματοδοτεί την πιο θεμελιώδη μεταμόρφωση της ανθρώπινης ζωής στην ιστορία του κόσμου που καταγράφεται σε γραπτά έγγραφα».

«Μια βιομηχανική επανάσταση συνεπάγεται βαθιές κοινωνικές αλλά και οικονομικές αλλαγές και η πρώτη βιομηχανική επανάσταση βρήκε την κοινωνία απροετοίμαστη για τα προβλήματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της αναταραχής» [1].

Στην ιστορία, διαφορετικές βιομηχανικές επαναστάσεις άλλαξαν το πρότυπο παραγωγής και, πέρα από τις βιομηχανίες, επηρέασαν τον τρόπο ζωής. Οι συζητήσεις για μια νέα βιομηχανική επανάσταση είναι παντού: από τον ακαδημαϊκό κόσμο μέχρι τις επιχειρήσεις, τις κυβερνήσεις, τις μη κυβερνητικές οργανώσεις, ακόμη και τις τηλεοπτικές εκπομπές. Το βουητό γύρω από το θέμα δικαιολογείται καλά όταν διαβάζουμε δηλώσεις όπως οι δύο που παρουσιάστηκαν παραπάνω. μια βαθιά μεταμόρφωση σημαίνει προβλήματα και, παρόλο που δεν αναφέρεται στα εισαγωγικά, ευκαιρίες. Πράγματι, η εκτεταμένη εφαρμογή της τεχνολογίας της πληροφορίας σε όλες σχεδόν τις δραστηριότητες της ζωής μας αλλάζει ήδη τον τρόπο που εργαζόμαστε, αγοράζουμε, σχετιζόμαστε και μαθαίνουμε. Αλλάζει επίσης τον τρόπο επιχειρηματικής δραστηριότητας. Υπάρχει η πεποίθηση ότι αυτές οι αλλαγές σημαίνουν το σπάσιμο της τρέχουσας πορείας και την έναρξη ενός νέου παραδείγματος της βιομηχανικής εποχής.

Το 2011, η Γερμανία επινόησε την έκφραση «Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0-I4.0)» για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της μεταποίησης, μια νύξη εκ των προτέρων σε μια τέταρτη βιομηχανική επανάσταση [2]. Παρά τη δημοτικότητα του όρου, δεν μπορεί κανείς να βρει μια συστηματική προσέγγιση που να εξηγεί τι κάνει την Βιομηχανία 4.0 επανάσταση. Ως εκ τούτου, φαίνεται να υπάρχει κάποιος σκεπτικισμός σχετικά με τη Βιομηχανία 4.0 και οι συζητήσεις σχετικά με το εάν πραγματικά αντιμετωπίζουμε μια νέα βιομηχανική επανάσταση είναι συχνές. Πιστεύουμε ότι μια βαθύτερη ανάλυση του φαινομένου είναι απαραίτητη για να ληφθεί πιο σοβαρά η έννοια.

Μια βιομηχανική επανάσταση είναι ένα σύνθετο φαινόμενο που δεν μπορεί να οριστεί μόνο από τις τεχνολογίες της. απαιτεί ένα πλαίσιο, που σημαίνει «τις επιρροές και τα γεγονότα που σχετίζονται με ένα συγκεκριμένο γεγονός ή κατάσταση» [3]. Οι επιρροές και τα σχετικά γεγονότα είναι σημαντικά για την κατανόηση ενός φαινομένου βαθιάς μεταμόρφωσης. Οι συζητήσεις σχετικά με τις προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις,

ειδικά η πρώτη και η δεύτερη, διαθέτουν πολλά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τα πλαίσια στα οποία συνέβησαν οι αλλαγές, αλλά δεν μπορεί κανείς να βρει παρόμοια προσέγγιση για τη Βιομηχανία 4.0.

Τα ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins) ενσωματώνουν φυσικά και εικονικά δεδομένα σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να υπάρχει κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων, από τις αρχικές ιδέες έως τα στάδια σχεδιασμού. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να εκτελεστούν προσομοιώσεις πριν από την κατασκευή του τελικού προϊόντος, διευκολύνοντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την αξιολόγηση της ποιότητας. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα δημιουργεί μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος, γνωστό ως φυσικό δίδυμο.

Το ψηφιακό δίδυμο ενός φυσικού συστήματος του φυσικού κόσμου μπορεί να προσομοιώσει τους κύκλους ζωής του συστήματος και να αντανakλά τη συγχρονισμένη δράση του εικονικού και του φυσικού δίδυμου, συνδέοντας τον εικονικό και τον πραγματικό κόσμο [4]. Έτσι, ο κύκλος ζωής του προϊόντος είναι μια ενέργεια στον φυσικό κόσμο που αντιπροσωπεύεται από έναν συνδυασμό της διαδικασίας, των δεδομένων και των στοιχείων του συστήματος. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αναπαράγει την κατάσταση των φυσικών οντοτήτων μέσω φυσικών μοντέλων. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να ενημερώνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, έτσι ώστε τα εικονικά μοντέλα να μπορούν να βελτιώνονται συνεχώς μέσω ενημερώσεων δεδομένων από φυσικά στοιχεία.

Τα συστήματα έχουν σημαντικές βελτιώσεις στην ευελιξία, την αυτονομία και την αποτελεσματικότητα [5]. Έχουν χαρακτηριστικά όπως ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο, η τακτική ανταλλαγή δεδομένων και η διασύνδεση της επικοινωνίας μεταξύ όλων των αντικειμένων του συστήματος. Ωστόσο, έχουμε τα λεγόμενα συστήματα παλαιού τύπου που, μεταξύ των ορισμών τους, μπορούμε να πούμε ότι είναι μια παλιά εφαρμογή ή σύστημα που μπορεί να βασίζεται σε ξεπερασμένες τεχνολογίες, αλλά είναι θεμελιώδες για τις καθημερινές λειτουργίες.

Λαμβάνοντας υπόψη τις διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούν τα ψηφιακά δίδυμα, έχουμε ένα πολλά υποσχόμενο σενάριο για περαιτέρω έρευνα στην αρχιτεκτονική του ψηφιακού δίδυμου, τις εφαρμογές και τις έννοιες της Βιομηχανίας 4.0, τις αναβαθμίσεις συστημάτων παλαιού τύπου, τα έξυπνα συστήματα και άλλα. Αυτές οι τεχνολογίες συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης και στην επίλυση προβλημάτων στον σύγχρονο

κόσμο. Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα εργασία στοχεύει να συνοψίσει την έρευνα για τα ψηφιακά δίδυμα και τα κύρια χαρακτηριστικά τους με ορισμούς προοπτικών και παρουσιάζει τις κύριες προκλήσεις και τάσεις μεταξύ τους και τη δυνατότητα σχεδιασμού και παραγωγής προϊόντων στη Βιομηχανία 4.0.

Η εργασία οργανώνεται ως εξής: Η Ενότητα 1 πραγματεύεται τον ορισμό και τα επιτεύγματα της Βιομηχανίας 4.0. Η Ενότητα 2 παρουσιάζει τα ψηφιακά δίδυμα και την επίδρασή τους στις βιομηχανίες - Βιομηχανία 4.0. Στην Ενότητα 3, δίνεται η έμφαση στη μόχλευση του ψηφιακού διδύμου στη Βιομηχανία 4.0 μέσω της αρχιτεκτονικής και των αναπαραστάσεων μοντέλων ενός ψηφιακού δίδυμου. Τέλος, η Ενότητα 4 παρέχει τις δυνατότητες και την έρευνα στην εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου και η Ενότητα 5 επικεντρώνεται σε ψηφιακές εφαρμογές που συνδέουν διαφορετικούς τομείς για το σχεδιασμό και την παραγωγή προϊόντος.

## Κεφάλαιο 1 Βιομηχανία 4.0

### 1.1 Προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις

Η δημοσίευση, το 1884, των διαλέξεων του Arnold Toynbee σχετικά με τις αλλαγές στην περίοδο από το 1760 έως το 1840 έκανε δημοφιλή τον όρο «βιομηχανική επανάσταση» (αν και ορισμένοι Γερμανοί και Γάλλοι συγγραφείς τον είχαν ήδη χρησιμοποιήσει στις αρχές του δέκατου όγδοου αιώνα). Από τότε, πολλοί ιστορικοί, οικονομολόγοι και μελετητές το έχουν χρησιμοποιήσει για να ορίσουν περιόδους τεχνολογικής αλλαγής με υψηλό αντίκτυπο στην κοινωνία [6]. Για περισσότερα από 200 χρόνια, έχουν αναδυθεί ιδέες για μια σειρά βιομηχανικών επαναστάσεων. Ωστόσο, ο αριθμός είναι ανακριβής και κάθε επανάσταση δεν έχει ξεκάθαρη αρχή και τέλος. Πώς λοιπόν μπορεί κανείς να χαρακτηρίσει μια βιομηχανική επανάσταση; Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι το κύριο χαρακτηριστικό είναι οι επιπτώσεις του, δηλαδή οι επιπτώσεις στην οικονομία και την κοινωνία. Ακόμη και ο όρος «επανάσταση» ορίζεται ως «μια ξαφνική και μεγάλη αλλαγή», και η έκφραση «βιομηχανική επανάσταση» σημαίνει «μια περίοδο κατά την οποία η ανάπτυξη των μηχανημάτων οδηγεί σε μεγάλες αλλαγές στη γεωργία, τη βιομηχανία, τις μεταφορές, και κοινωνικές συνθήκες...», που φέρνουν και τα δύο την ιδέα μιας σχέσης πριν/μετά [7]. Λόγω της πολυπλοκότητάς της, ακόμη και αν κοιτάξουμε τα αποτελέσματα, μπορεί να είναι δύσκολο να εξασφαλιστεί μια περίοδος επανάστασης· χωρίς αυτές, το καθήκον είναι Για λόγους αντικειμενικότητας, αυτή η εργασία χρησιμοποιεί την προσέγγιση Acatech, η οποία ορίζει τις τρεις προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις: την πρώτη (1784–1870), τη δεύτερη (1870–1969), την τρίτη (1969 έως σήμερα). και το τέταρτο, που ονομάστηκε *ex-ante*, από σήμερα στις επόμενες δεκαετίες [2].

Μερικές φορές μια κεντρική τεχνολογία χρησιμοποιείται ως ο ορισμός κάθε επανάστασης. Στα τέλη του 18ου αιώνα, η πρώτη βιομηχανική επανάσταση σχετιζόταν με την ατμοηλεκτρική ενέργεια, η οποία επέτρεψε πολλές εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Η δεύτερη βιομηχανική επανάσταση, στις αρχές του 20ου αιώνα, συνδέθηκε με την ηλεκτρική ενέργεια και τη μαζική παραγωγή, η οποία είχε επιπτώσεις σε πολλές βιομηχανίες: σιδηρόδρομοι, χάλυβας, χημικά και καταναλωτικά αγαθά [8]. Οι τεχνολογίες της πληροφορίας και τα ηλεκτρονικά ήταν υπεύθυνα για την τρίτη βιομηχανική επανάσταση στη δεκαετία του 1970, φέρνοντας την αυτοματοποίηση στο εργοστάσιο και αλλάζοντας μια σειρά από δραστηριότητες που προηγουμένως εκτελούνταν με το χέρι.



Φυσικά, η τεχνολογία αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο αυτών των φαινομένων, καθώς είναι ευρέως αποδεκτό ότι η τεχνολογική πρόοδος μπορεί να φέρει οικονομική ανάπτυξη. Ωστόσο, δεν έχει καταλήξει κάθε νέα τεχνολογία σε βιομηχανική επανάσταση και σχεδόν ποτέ στην πρώτη της εφαρμογή [9]. Ο αντίκτυπος στην οικονομία και την κοινωνία, ή η «επανάσταση», εξαρτάται από πολλά στοιχεία. Πέρα από τις τεχνολογίες, πρέπει να ληφθεί υπόψη η διαδικασία διάχυσης. Η διάχυση τεχνολογίας είναι μια δυναμική διαδικασία που περιλαμβάνει στοιχεία που εξαρτώνται από το περιβάλλον. Ως εκ τούτου, η εξέταση της ιστορίας είναι ένας τρόπος μάθησης για το παρόν ή ακόμα και το μέλλον. Με αυτή την έννοια, εντοπίσαμε τρία στοιχεία που χαρακτηρίζουν τις επιρροές και τα γεγονότα προηγούμενων επαναστάσεων και τα χρησιμοποιούμε ως φακό για την ανάλυση της Βιομηχανίας 4.0 και πρόκειται για τα τεχνολογικά επιτεύγματα, τους οικονομικούς θεσμούς και την κοινωνική δομή [10].

## **1.2 Τεχνολογικά επιτεύγματα**

Σύμφωνα με τον Rosenberg, τα τεχνολογικά επιτεύγματα - η σωρευτική πτυχή των μικρών βελτιώσεων και των διατομεακών σχέσεων - οδηγούν σε σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις [11]. Ο Newcomen χρησιμοποίησε την ατμομηχανή σε ανθρακωρυχεία στις αρχές του 18ου αιώνα, αλλά χρειάστηκε λίγος χρόνος μέχρι ο Watt βελτίωσε τη μηχανή για πιο αποτελεσματικούς εμπορικούς σκοπούς το 1776, και ακόμη περισσότερος χρόνος έως ότου επηρέασε σημαντικά την οικονομία. Η μαζική παραγωγή προκάλεσε βαθιές επιπτώσεις στην προσφορά και τη ζήτηση τον 20ο αιώνα, αλλά αναπτύχθηκε από τεχνολογίες που υπήρχαν εκατό χρόνια πριν [12]. Η ηλεκτρική ενέργεια είχε μακρά ιστορία ανακαλύψεων και βελτιώσεων μέχρι που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή και να αλλάξει τη ζωή τροφοδοτώντας τα σπίτια. Οι υπολογιστές και τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα είχαν μακρά πορεία ανάπτυξης τον 20ο αιώνα, αλλά ο αντίκτυπός τους στην οικονομία δεν ήταν άμεσος [13].

Οι Bresnahan και Trajtenberg αποκαλούν «τεχνολογίες γενικού σκοπού» εκείνες που επιτρέπουν πολλές τελικές λύσεις. Τα κύρια χαρακτηριστικά μιας τεχνολογίας γενικής χρήσης είναι (1) η διεισδυτικότητα, που σημαίνει ότι χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς (2) η βελτίωση, καθώς η ποιότητά της αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου και (3) η δημιουργία καινοτομίας, επειδή διευκολύνει τις νέες δημιουργίες [14]. Μπορεί κανείς να

δει όλα αυτά τα χαρακτηριστικά στις κορυφαίες τεχνολογίες των βιομηχανικών επαναστάσεων.

Στην πρώτη βιομηχανική επανάσταση, ο Newcomen ανέπτυξε την ατμομηχανή ως μηχανή για την άντληση νερού από τα ανθρακωρυχεία, αλλά οι βελτιώσεις που έγιναν από τον Watt ήταν καθοριστικές. «[...] άνοιξαν το δρόμο για συνεχείς προόδους στην απόδοση που τελικά έφεραν την ατμομηχανή κοντά σε όλους τους κλάδους της οικονομίας και την έκαναν παγκόσμιο πρωταρχικό κινητήριο μοχλό» [15].

Η δεύτερη βιομηχανική επανάσταση είχε δύο κεντρικές τεχνολογίες, την ηλεκτρική ενέργεια και τη μαζική παραγωγή [16]. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταμόρφωσε τις διαδικασίες παραγωγής και την αγορά, καθώς χρησίμευσε ως έναυσμα για πολλές άλλες καινοτομίες. Ταυτόχρονα, οι έννοιες της μαζικής παραγωγής εφαρμόστηκαν και σε διάφορους τομείς, βελτιώνοντας την παραγωγικότητα, μειώνοντας τις τιμές των αγαθών και μεταμορφώνοντας τον τρόπο ζωής. Αυτές οι τεχνολογίες αναπτύχθηκαν επίσης από πολλές συνεισφορές που έχουν τελικά επιδράσει στην οικονομία [12].

Οι τεχνολογίες πληροφορικής και ηλεκτρονικών υπολογιστών χαρακτήρισαν την τρίτη βιομηχανική επανάσταση. Αν και η δεκαετία του εβδομήντα θεωρείται η αρχή της, ο πρώτος ηλεκτρονικός υπολογιστής – ENIAC – είχε εφευρεθεί τριάντα χρόνια πριν, για στρατιωτικές εφαρμογές [17]. Στη συνέχεια, στη δεκαετία του ογδόντα, οι υπολογιστές εφαρμόστηκαν στη διαδικασία παραγωγής, τις λεγόμενες τεχνολογίες υποβοηθούμενης από υπολογιστή (CAD, CAE, CAPP, CAM) και την ολοκληρωμένη κατασκευή υπολογιστών (CIM). Παρά τις μεγάλες υποσχέσεις, αυτές οι τεχνολογίες αρχικά δεν προωθούσαν την παραγωγή. Απαιτούσαν χρόνο και πολλές βελτιώσεις για να επιφέρουν τον αναμενόμενο αντίκτυπο [8]. Αν και σήμερα οι υπολογιστές είναι πανταχού παρόντες, επιτρέποντας την καινοτομία σε πολλούς τομείς, η τρίτη βιομηχανική επανάσταση δεν εκπλήρωσε όλες τις υποσχέσεις της και συχνά είναι υπεύθυνη για κάποιο σκεπτικισμό που σχετίζεται με την Βιομηχανία 4.0. Οι Swink και Nair δηλώνουν ότι οι προσεγγίσεις έκτακτης ανάγκης είναι επαρκείς για την αντιμετώπιση του ζητήματος, επειδή πολλοί παράγοντες επηρεάζουν τα αποτελέσματα της υιοθέτησης προηγμένων τεχνολογιών παραγωγής [18].

### 1.3 Οικονομικοί θεσμοί

Οι κύριες καινοτομίες κάθε επανάστασης χρειάστηκαν λίγο χρόνο για να γίνουν ευρέως διαδεδομένες. Επειδή η εφαρμογή νέων τεχνολογιών απαιτεί προσαρμογή ή αντικατάσταση υπαρχόντων μηχανών, οργανωτικής δομής και ανθρώπων, η διάδοσή της εξαρτάται από διάφορες ρυθμίσεις που διαμορφώνουν την οικονομική συμπεριφορά [20]. Ο Rosenberg έθεσε «ότι η διάδοση των εφευρέσεων είναι ένα ουσιαστικά οικονομικό φαινόμενο, η χρονική στιγμή του οποίου μπορεί να εξηγηθεί σε μεγάλο βαθμό από τα αναμενόμενα κέρδη, έχει πλέον καθιερωθεί». Υποστηρίζουμε ότι, εκτός από τις προσδοκίες για τα κέρδη, η ένταση του ανταγωνισμού, το ρυθμιστικό σύστημα και η οικονομική διαθεσιμότητα οδηγούν τον ρυθμό της διάδοσης. Επειδή κάθε χώρα έχει τους τοπικούς θεσμούς της, δεν είναι εύκολο να γενικεύσουμε αυτές τις πτυχές. Ως εκ τούτου, αναλύουμε τις δομές των ηγετικών χωρών όπου έλαβαν χώρα για πρώτη φορά οι διαφορετικές επαναστάσεις [21].

Όπως περιγράφεται από τον Hobsbawm, 200 χρόνια σχεδόν αδιάκοπης ανάπτυξης έκαναν τη Βρετανία γόνιμο έδαφος για την πρώτη βιομηχανική επανάσταση. Έγινε μια από τις πιο ανεπτυγμένες οικονομίες στον κόσμο [22]. Το σύστημα απόσβεσης δημιούργησε ένα δίκτυο αγροτικής παραγωγής, το οποίο προώθησε τα αγαθά και τη νομισματική ροή σε όλη τη χώρα [23]. Αυτό το σενάριο, που συνδέεται με πολλές αναδυόμενες καινοτομίες, δημιούργησε μια προσδοκία υψηλού κέρδους μεταξύ των πολιτών γενικά, και των εμπορικών τάξεων και των γαιοκτημόνων ειδικότερα. Ο ανταγωνισμός μεταξύ των επιχειρήσεων δεν ήταν έντονος και υπήρχε μεγάλη ζήτηση για προϊόντα, που οδήγησε σε ευκαιρίες. Το ρυθμιστικό σύστημα ήταν επιεικό καθώς οι επιχειρήσεις διέπονταν κυρίως από άτυπους κώδικες [24]. Ωστόσο, το σύστημα διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας υπήρχε και συνέβαλε στη διάδοση των τεχνολογιών, καθώς μείωσε την αβεβαιότητα και έδωσε στους εφευρέτες την προοπτική να κερδίσουν πολλά χρήματα [25]. Καθώς οι κύριες τεχνολογίες αυτής της επανάστασης δεν ήταν ούτε εξελιγμένες ούτε ακριβές, δεν απαιτούσαν μεγάλες επενδύσεις και συχνά οι επιχειρηματίες επένδυαν τα δικά τους χρήματα, τα χρήματα της οικογένειας ή των φίλων τους. Παρόλο που το χρηματοπιστωτικό σύστημα της πρώτης βιομηχανικής επανάστασης είναι ένα θέμα που δεν έχει ερευνηθεί επαρκώς, η υπόθεση ότι ο ρόλος των τραπεζών ήταν περιορισμένος σε αυτήν την περίοδο είναι ευρέως αποδεκτή. Ο

βασικός ρόλος των τραπεζών ήταν να παρέχουν κυκλοφορούν κεφάλαια, καθώς επικεντρώνονταν σε βραχυπρόθεσμα δάνεια [26].

Η περίοδος της δεύτερης βιομηχανικής επανάστασης είχε πολλά σκαμπανεβάσματα, όχι μόνο λόγω κάποιων οξειών κρίσεων (π.χ., η «Μεγάλη Ύφεση» το 1893 και το «Κραχ» του 1930), αλλά και λόγω των δύο Παγκοσμίων Πολέμων. Από τα μέσα του 19ου αιώνα, η διάχυση της εκβιομηχάνισης σε όλη την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες εντάθηκε, με αυξημένο αριθμό εργοστασίων. Με την άνθηση νέων τεχνικών που επέτρεψαν πρωτοφανείς οικονομίες κλίμακας, οι προσδοκίες για τα κέρδη παρέμειναν υψηλές [27]. Τελικά, ο ανταγωνισμός για την εφαρμογή πιο παραγωγικών τεχνολογιών οδήγησε σε πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα. Στη συνέχεια, ένα κίνημα συγκέντρωσης δημιούργησε μεγάλες εταιρείες: πρώτα με το σχηματισμό μονοπωλίων. αργότερα με καθετοποίηση. Το ρυθμιστικό σύστημα εξελίχθηκε για να διασφαλίσει ότι ο ρυθμός της καινοτομίας θα συνεχιστεί. Καθώς οι περισσότερες βελτιώσεις στην τεχνολογία αφορούσαν συστήματα (επικοινωνίες, μεταφορές, ηλεκτροκίνηση), χρειαζόταν συντονισμός, απαιτώντας από τις κυβερνήσεις και άλλους θεσμούς να παρέμβουν και να θεσπίσουν κανόνες και πρότυπα [24]. Επίσης, προέκυψε νομοθεσία κατά των μονοπωλίων και των ανταγωνιστικών πρακτικών. Το μέγεθος και η φύση των κυρίαρχων βιομηχανιών (σιδηρόδρομοι, χάλυβας, χημικά, πετρέλαιο, αυτοκίνητα) κατέστησαν πιο απαραίτητες την επιστημονική γνώση και τις επενδύσεις και, ως εκ τούτου, πολλές εταιρείες δημιούργησαν τμήματα E&A. Αυτές οι εταιρείες και η επενδυτική αγορά παρείχαν τους απαραίτητους οικονομικούς πόρους για αυτήν την επανάσταση [28].

Οι νέες τεχνολογίες εμφανίστηκαν στην τρίτη βιομηχανική επανάσταση, όπως οι υπολογιστές, τα ρομπότ, τα τσιπ και το Διαδίκτυο, φέρνοντας μια νέα αίσθηση ευκαιρίας στους επιχειρηματίες. Και πάλι, οι προσδοκίες για τα κέρδη ήταν υψηλές λόγω των υποσχέσεων παραγωγικότητας αυτού του νέου κλάδου [29]. Ο ανταγωνισμός αυξήθηκε και η παγκοσμιοποίηση εντάθηκε, λόγω της εξοικονόμησης κόστους και της δυνατότητας από τις νέες τεχνολογίες πληροφοριών. Υπήρξε μια κίνηση προς την απορρύθμιση πολλών βιομηχανιών, όπως οι τηλεπικοινωνίες και τα χρηματοοικονομικά, επιτρέποντας καινοτομίες σε προϊόντα, διαδικασίες και επιχειρηματικά μοντέλα [30]. Οι επιστημονικές και τεχνολογικές εξελίξεις απαιτούσαν τεράστιες επενδύσεις στην E&A από κυβερνήσεις και πανεπιστήμια, πρώτα για λόγους ασφαλείας και μετά για εμπορικούς σκοπούς. Οι

επενδυτές επιχειρηματικών κεφαλαίων συνέβαλαν επίσης στη διάδοση, χρηματοδοτώντας την έναρξη και την επέκταση κερδοφόρων επιχειρήσεων [31].

#### **1.4 Κοινωνική δομή**

Η κοινωνική δομή έπαιξε επίσης ουσιαστικό ρόλο στις βιομηχανικές επαναστάσεις. Εξετάζοντας συγκεκριμένα το μέγεθος του πληθυσμού, την ηλικία και την κοινωνική διαστρωμάτωση, υποστηρίζεται ότι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν τη ζήτηση για νέα προϊόντα και υπηρεσίες, την προσφορά εργασίας και τη στάση απέναντι στις νέες τεχνολογίες. Η ζήτηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, αλλά δεν είναι υπερβολή να πούμε ότι σχετίζεται με τον αριθμό των ατόμων και την αγοραστική δύναμη [28]. Η προσφορά εργασίας συνδέεται με τον αριθμό και τα προσόντα των εργαζομένων. Ενώ ένα άφθονο εργατικό δυναμικό μπορεί να επιβραδύνει τον ρυθμό της καινοτομίας –όσο χαμηλότεροι είναι οι μισθοί, τόσο μικρότερα τα κίνητρα για υιοθέτηση τεχνολογίας– σε ορισμένες περιπτώσεις, περισσότεροι εργαζόμενοι μπορούν να αυξήσουν τον ρυθμό. Οι στάσεις περιλαμβάνουν πίστη και εμπιστοσύνη στις τεχνολογίες. Υπονοούν την αντίληψη για το πώς ωφελούνται διαφορετικά κοινωνικά στρώματα από τις εξελίξεις που επηρεάζουν τη συμπεριφορά ανάληψης κινδύνου [9].

Κατά την πρώτη επανάσταση, όχι μόνο η εσωτερική ζήτηση, αλλά και αυτή στο εξωτερικό, δημιούργησε συνθήκες για εργοστάσια εγκατάστασης και ανάπτυξης. Ενώ το ισχυρό θαλάσσιο εμπόριο εξασφάλιζε την πρόσβαση στις εξωτερικές αγορές, το εσωτερικό εμπόριο επεκτάθηκε μέσω καλών οικονομικών συνθηκών και αύξησης του πληθυσμού. Ο ταχέως αναπτυσσόμενος πληθυσμός δημιούργησε ζήτηση και, μέσα σε μερικές δεκαετίες, αύξησε την προσφορά εργασίας [27]. Ο Landes θέτει ότι «η σπάνια εργασία φαίνεται να ενθάρρυνε την εμβάθυνση του κεφαλαίου στη Βρετανία του δέκατου όγδοου αιώνα. ενώ μια πιο άφθονη προσφορά διευκόλυνε τη διεύρυνση τις επόμενες δεκαετίες» [31]. Την ίδια στιγμή, η μεγάλη μεσαία τάξη στη Βρετανία, που αποτελείται από εμπόρους, τεχνίτες, αγρότες και μηχανικούς, πίστευε στην καινοτομία ως τρόπο βελτίωσης της ζωής [32].

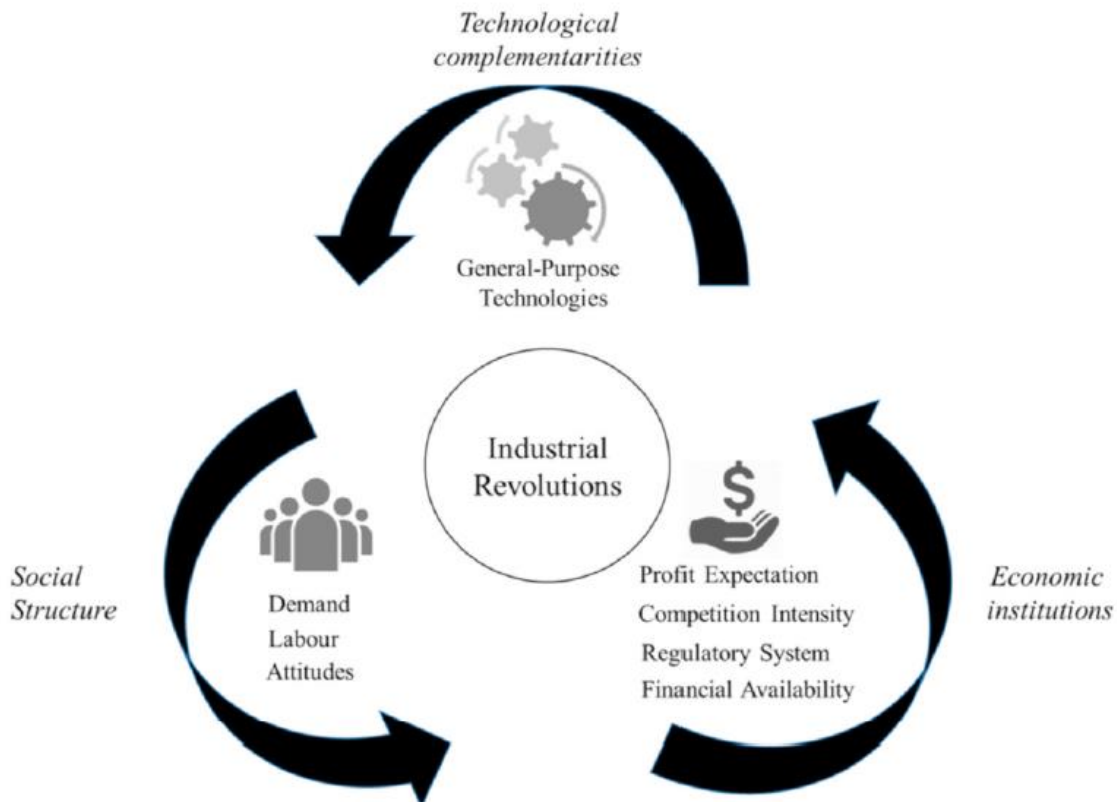
Στη δεύτερη βιομηχανική επανάσταση, η ανάπτυξη της βιομηχανικής δραστηριότητας που σχετίζεται με τη μαζική παραγωγή δημιούργησε την ανάγκη για ανειδίκευτη εργασία. Ορισμένες χώρες πρόσφεραν κίνητρα για την προσέλκυση εργαζομένων από το εξωτερικό, καθώς η μετανάστευση εργατικού δυναμικού ήταν ελεύθερη μέχρι τον Α Παγκόσμιο Πόλεμο και τη μεταπολεμική περίοδο [12]. Ο γηγενής πληθυσμός συνέχισε να αυξάνεται γρήγορα, αυξάνοντας σταθερά τη ζήτηση. Στις αρχές του 20ου αιώνα, ο παγκόσμιος πληθυσμός ήταν 1,65 δισεκατομμύρια. τη δεκαετία του 1960, έφτασε τα 3 δισεκατομμύρια [33]. Το εισόδημα αυξήθηκε σημαντικά κατά την περίοδο, ειδικά μετά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, και τα διαρκή καταναλωτικά αγαθά έγιναν προσιτά σε μεγάλο μέρος του πληθυσμού, ενδεικτικό του βελτιωμένου βιοτικού του επιπέδου. Η αυξανόμενη μεσαία τάξη στην Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες πίστευε στην κοινωνική κινητικότητα, διευκολύνοντας την υιοθέτηση της τεχνολογίας και την επιχειρηματικότητα [3].

Κατά τη διάρκεια της τρίτης βιομηχανικής επανάστασης, παρά τις πολλές κρίσεις, η ζήτηση, σε συνάρτηση με τον αριθμό των ανθρώπων, συνέχισε να αυξάνεται: από το 1970 έως το 2016, ο παγκόσμιος πληθυσμός διπλασιάστηκε. Σε αυτήν την περίοδο, 3,6 δισεκατομμύρια άνθρωποι προστέθηκαν στον πλανήτη, εκ των οποίων τα 2,3 δισεκατομμύρια ήταν στην Ασία [34]. Αυτό εξηγεί τη διαθεσιμότητα φθηνού εργατικού δυναμικού σε αυτήν την περιοχή και δικαιολογεί το κίνημα των offshoring στις δεκαετίες του 1980 και του 1990. Την ίδια περίοδο, οι εταιρείες παγκοσμιοποιήθηκαν. Από τη μία πλευρά, η μετακίνηση των παραγωγικών δραστηριοτήτων σε χώρες με χαμηλούς μισθούς μπορεί να έχει επιβραδύνει την ταχύτητα των τεχνολογιών αυτοματισμού, επειδή η ανθρώπινη εργασία ήταν φθηνότερη από τις νέες αυτοματοποιημένες μηχανές [35]. Από την άλλη, το offshoring επιτάχυνε τον ρυθμό διάδοσης της τεχνολογίας της πληροφορίας, επειδή όσο περισσότερες εταιρείες μετακινούνταν στο εξωτερικό, τόσο μεγαλύτερη ήταν η ανάγκη διατήρησης του ελέγχου των λειτουργιών και βελτίωσης της επικοινωνίας. Τα υψηλά επίπεδα κοινωνικής κινητικότητας, από γενιά σε γενιά, που προκαλούνται από την ταχεία οικονομική ανάπτυξη, οδήγησαν σε θετική στάση απέναντι στις νέες τεχνολογίες [2].

Πολλά άλλα στοιχεία έδρασαν ως μεσολαβητές για να πραγματοποιηθούν οι προηγούμενες βιομηχανικές επαναστάσεις, αλλά θεωρείται ότι τα τεχνολογικά

επιτεύγματα, οι οικονομικοί θεσμοί και η κοινωνική δομή μας δίνουν ένα εύλογο πλαίσιο για να δούμε τη λεγόμενη τέταρτη βιομηχανική επανάσταση [36]. Η Εικόνα 1 απεικονίζει το πλαίσιο με τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν τις βιομηχανικές επαναστάσεις.

Τα τρία στοιχεία συνθέτουν το πλαίσιο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει κανείς και να συζητήσει τη Βιομηχανία 4.0 ως μια νέα βιομηχανική επανάσταση.



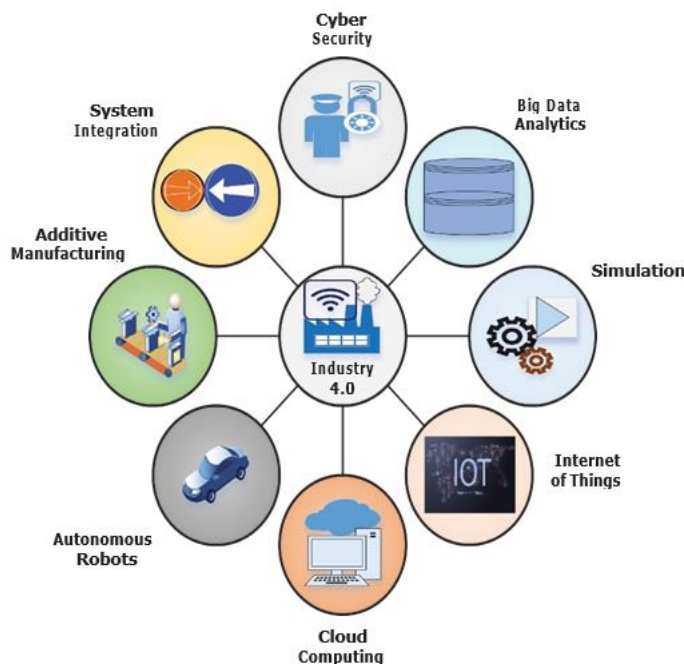
**Εικόνα 1** Πλαίσιο με τα στοιχεία για τον χαρακτηρισμό των βιομηχανικών επαναστάσεων.

### 1.5 Βιομηχανία 4.0: Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση

Ο παγκόσμιος ανταγωνισμός και η ανάγκη γρήγορης προσαρμογής της παραγωγής στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς οδηγούν τώρα τη βιομηχανική παραγωγή. Μόνο οι επαναστατικές εξελίξεις στη σύγχρονη τεχνολογία κατασκευής θα ικανοποιήσουν αυτές τις απαιτήσεις. Η Βιομηχανία 4.0 είναι μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική που επικεντρώνεται στον μετασχηματισμό της βιομηχανίας και των

διαδικασιών παραγωγής και στην προσθήκη όλων των επενδυτών στην αλυσίδα αξίας της εταιρείας (προμηθευτές και πελάτες) [37].

Η Εικόνα 2 εξηγεί τον ψηφιακό μετασχηματισμό των βιομηχανιών. Η εφαρμογή των ιδεών των προτύπων cyber-physical systems (CPS) και IIoT σε συστήματα βιομηχανικής παραγωγής χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση τεχνικών πτυχών αυτών των απαιτήσεων. Κατά συνέπεια, η «διαδικασία εκτέλεσης» της Βιομηχανίας 4.0 βασίζεται σε συνδέσεις δομικών στοιχείων CPS [38]. Η βιομηχανική ανάπτυξη καθοδηγείται πλέον από τον παγκόσμιο ανταγωνισμό και την ανάγκη ταχείας προσαρμογής της παραγωγής στις συνεχώς μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς. Επιπλέον, για την απρόσκοπτη ενοποίηση των παραγωγικών και επιχειρηματικών διαδικασιών, απαιτείται ολοκληρωμένη τεχνολογική υποστήριξη που βασίζεται σε αποκεντρωμένες και προσαρμοσμένες εκδόσεις συστημάτων εκτέλεσης παραγωγής και προγραμματισμού πόρων της επιχείρησης [36]. Η επεξεργασία τεράστιου όγκου δεδομένων από συστήματα, υπολογιστές και αγαθά είναι ο τρίτος σημαντικός παράγοντας. Συνήθως, τα δεδομένα αποθηκεύονται στο cloud [39].



**Εικόνα 2** Ψηφιακός μετασχηματισμός των βιομηχανιών

Αν και βρισκόμαστε ακόμη εν μέσω της τρίτης βιομηχανικής επανάστασης, ένα νέο σύνολο τεχνολογιών αναδύεται, που υπόσχεται σημαντικές αλλαγές στην κοινωνία και



δικαιολογεί τον εκ των προτέρων ορισμό της τέταρτης. Η Βιομηχανία 4.0 είναι μια έκφραση διαφημιστικής εκστρατείας και εξακολουθεί να μην έχει ακριβή ορισμό [1]. Ο όρος, που επινοήθηκε κατά τη διάρκεια μιας συνέντευξης στην Έκθεση του Ανόβερου το 2011 ως όρος-ομπρέλα για τις εξελίξεις στις τεχνολογίες κατασκευής, συγκεντρώνει αρκετές γερμανικές πρωτοβουλίες, ιδιαίτερα το SmartFactory KL, που ιδρύθηκε το 2005 [2].

Στις συστάσεις για την υλοποίηση της στρατηγικής πρωτοβουλίας Industrie 4.0, μια έκθεση που δημοσιεύθηκε από την Acatech το 2013, επισημαίνονται τρία βασικά χαρακτηριστικά: «οριζόντια ολοκλήρωση μέσω δικτύων αξίας, ψηφιακή ολοκλήρωση από άκρο σε άκρο της μηχανικής και κάθετη ολοκλήρωση και δικτυωμένη κατασκευή» [34]. Η οριζόντια ολοκλήρωση αναφέρεται στην ενσωμάτωση όλων των δραστηριοτήτων που προσθέτουν αξία σε ένα προϊόν ή μια υπηρεσία πέρα από τα όρια της εταιρείας, με τη συμμετοχή όλων των συμμετεχόντων στη διαδικασία. Ενσωμάτωση από άκρο σε άκρο της μηχανικής σημαίνει διαφάνεια σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας, επιτρέποντας καλύτερες αποφάσεις σχεδιασμού [34]. Η κάθετη ολοκλήρωση ενσωματώνει τα διάφορα επίπεδα των συστημάτων ενός οργανισμού, που κυμαίνονται από συλλέκτες δεδομένων στον χώρο του καταστήματος και ενδιάμεσα συστήματα έως συστήματα διαχείρισης επιχειρήσεων [24].

Η Plattform Industrie 4.0, ένας γερμανικός όμιλος συνεργασίας για την ανάπτυξη της Βιομηχανίας 4.0 με πανεπιστήμια, ενώσεις, εταιρείες και κυβερνητικά μέλη, υποστηρίζει ότι «το Industrie 4.0 συνδυάζει μεθόδους παραγωγής με τεχνολογία πληροφόρησης και επικοινωνίας αιχμής» [9]. Επειδή χρειαζόταν πιο ακριβής ορισμός, το 2015, οι Hermann, Pentek και Otto πραγματοποίησαν μια εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση και όρισαν την Βιομηχανία 4.0 ως εξής [3]:

«Το Industrie 4.0 είναι ένας συλλογικός όρος για τεχνολογίες και έννοιες οργάνωσης της αλυσίδας αξίας. Μέσα στα αρθρωτά δομημένα Smart Factories of Industrie 4.0, το CPS παρακολουθεί τις φυσικές διεργασίες, δημιουργεί ένα εικονικό αντίγραφο του φυσικού κόσμου και λαμβάνει αποκεντρωμένες αποφάσεις[36]. Μέσω του Διαδικτύου των πραγμάτων, τα CPS επικοινωνούν και συνεργάζονται μεταξύ τους και με τους ανθρώπους σε πραγματικό χρόνο. Μέσω του Διαδικτύου των Υπηρεσιών, προσφέρονται

και χρησιμοποιούνται τόσο εσωτερικές όσο και διοργανωτικές υπηρεσίες από συμμετέχοντες στην αλυσίδα αξίας» [35].

Αυτός ο ορισμός υπογραμμίζει το CPS, τον πυρήνα της τεχνολογίας Βιομηχανίας 4.0. Η έκφραση επινοήθηκε το 2006 από την Helen Gill, Διευθύντρια του Προγράμματος Ενσωματωμένων και Υβριδικών Συστημάτων του Εθνικού Ιδρύματος Επιστημών. ΗΠΑ. Αν και βασίζεται σε υπάρχουσες τεχνολογίες, το CPS καθεαυτό είναι μια νέα τεχνολογία επειδή τις συνδυάζει σε ένα σύστημα [18].

Αρχικά, η ιδέα της Βιομηχανίας 4.0 σχετιζόταν με την ψηφιοποίηση του περιβάλλοντος παραγωγής. Τώρα χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση του ψηφιακού μετασχηματισμού σε πολλούς τομείς ή ως συνώνυμο της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης.[31] Ο Kovacs ισχυρίζεται ότι το φαινόμενο εξελίσσεται «σε ένα ανοιχτό, προσαρμοστικό, περίπλοκο οικοσύστημα κοινωνικο-οικονομικής καινοτομίας που χαρακτηρίζεται από μη γραμμικές ανατροφοδοτήσεις», προτείνοντας μια επαναστατική προσέγγιση [9].

Ωστόσο, είναι η Βιομηχανία 4.0 μια νέα βιομηχανική επανάσταση; Για να απαντήσουμε σε αυτό το ερώτημα, χρησιμοποιούμε το πλαίσιο που προσδιορίσαμε στις προηγούμενες επαναστάσεις: τεχνολογικά επιτεύγματα, οικονομικοί θεσμοί και κοινωνική δομή [14].

Μεμονωμένα, οι εξελίξεις στις τεχνολογίες Βιομηχανίας 4.0 δεν προκαλούν αναστάτωση. έχουν προκύψει από μια εξελικτική διαδικασία. Ωστόσο, λόγω της τεχνολογικής συμπληρωματικότητας, μπορεί να αντιπροσωπεύουν μια διάσπαση και να δικαιολογούν τον όρο επανάσταση[31]. Το CPS είναι ένα σύστημα που αποτελείται από πολλά στοιχεία όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές, τεχνολογίες οπτικοποίησης, δίκτυα επικοινωνίας και αναλυτικά στοιχεία μεγάλων δεδομένων. Αυτές οι τεχνολογίες δεν είναι νέες. έχουν εξελιχθεί τις τελευταίες δεκαετίες. Πράγματι, ορισμένα από τα στοιχεία της Βιομηχανίας 4.0 υπήρχαν ήδη πριν από 30 χρόνια [13]. Ωστόσο, μόνο από τώρα και στο εξής, με την υψηλότερη ωριμότητα των τεχνολογιών πληροφοριών και επικοινωνιών και χαμηλότερο κόστος υλικού και λογισμικού, αυτό το παράδειγμα θα καταστεί βιώσιμο. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα τομέων [16]. Με το CPS, η νοημοσύνη κατανέμεται σε δικτυωμένες διαδικασίες, οι οποίες, ταυτόχρονα, προσδίδουν μεγαλύτερη σταθερότητα και μεγαλύτερη ευελιξία στις λειτουργίες, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα. Παρά την άποψη του Schumpeter ότι οι βιομηχανικές επαναστάσεις δεν βασίστηκαν σε μια στοίβα τεχνολογιών, υποστηρίζουμε ότι αυτές οι

συμπληρωματικότητες δημιουργούν έναν ποιοτικό μετασχηματισμό της οικονομίας, ο οποίος για τον Schumpeter είναι κεντρικός σε μια βιομηχανική επανάσταση [40].

Αν και αναγνωρίζουμε την καινοτομία που φέρνει η Βιομηχανία 4.0, «η διαθεσιμότητα της τεχνολογίας από μόνη της δεν σημαίνει ότι η χρήση της μπορεί να δικαιολογηθεί εμπορικά»[41]. Ο ρυθμός διάδοσης της τεχνολογίας αυξάνεται και οι τεχνολογίες εξελίσσονται ταχύτερα από ποτέ, υποδεικνύοντας αλλαγές σε μικρότερες περιόδους. Αν και οι τιμές αυτών των τεχνολογιών μειώνονται σταθερά, άλλα κόστη που σχετίζονται με την υποκατάσταση εξοπλισμού, την υποδομή, την εκπαίδευση και την επανεκπαίδευση, θα αποτελούν μέρος του συνόλου των επενδύσεων. Αυτό σημαίνει ότι η εφαρμογή της Βιομηχανίας 4.0 θα απαιτήσει επενδύσεις, όχι μόνο σε εταιρικό επίπεδο, αλλά και σε κυβερνητικό επίπεδο. Ο ρυθμός διάδοσης της Βιομηχανίας 4.0 εξαρτάται εν μέρει από τους οικονομικούς θεσμούς [42].

Εξετάζοντας τα οφέλη που έχουν οι μελετητές, οι κυβερνήσεις και οι εταιρείες συμβούλων που σχετίζονται με την Βιομηχανία 4.0, μπορούμε να πούμε ότι η προσδοκία κέρδους είναι υψηλή. Μερικά από αυτά τα οφέλη είναι η ταχεία ανάπτυξη προϊόντων, η πιο ευέλικτη και αποτελεσματική παραγωγή και το μειωμένο κόστος [43]. Πέρα από τη βελτίωση του συστήματος παραγωγής, αυτές οι νέες τεχνολογίες επιτρέπουν την καινοτομία, αναζητώντας νέες πηγές εσόδων. Εκτός από τα αναμενόμενα οφέλη από την εφαρμογή, οι εταιρείες αντιμετωπίζουν απειλές από ένα μεταβαλλόμενο ανταγωνιστικό τοπίο, πράγμα που σημαίνει ότι οι εταιρείες που δεν ασπάζονται το νέο παράδειγμα ενδέχεται να μείνουν πίσω. Ωστόσο, η αυταπάτη σχετικά με προηγούμενες τεχνολογίες αυτοματισμού θα μπορούσε να οδηγήσει σε μέτριο ρυθμό διάχυσης [45].

Η ένταση του ανταγωνισμού σε αυτόν τον αιώνα μπορεί να οριστεί ως πολύ υψηλή, και εδώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί η έννοια του υπερανταγωνισμού D'Aveni, που σημαίνει ότι το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα γίνεται προσωρινό και οι εταιρείες πρέπει να προσαρμόζονται συνεχώς [46]. Ο αγώνας για την καινοτομία έχει δημιουργήσει μια δυναμική αγορά όπου οι καταναλωτές έχουν πολλές επιλογές που δεν περιορίζονται τοπικά, επειδή μπορούν να αγοράσουν ηλεκτρονικά. Σε αυτόν τον τομέα, οι επιχειρήσεις αγωνίζονται να φέρουν περισσότερη αξία στον πελάτη, προσπαθώντας να αναπτύξουν εξατομικευμένες λύσεις, χωρίς να αυξάνουν τις τιμές. Η πιο εξελιγμένη ζήτηση έχει προκαλέσει τις εταιρείες να διαφοροποιήσουν την προσφορά τους [39]. Ο Anderson

(2006) επικαλείται τη στατιστική έννοια της «μακράς ουράς» για να εξηγήσει το φαινόμενο στο οποίο μπορούν να εξυπηρετηθούν μικρές θέσεις ή ακόμη και μεμονωμένοι καταναλωτές, επειδή το οριακό κόστος της αύξησης του πεδίου εφαρμογής είναι αμελητέο. Η Βιομηχανία 4.0 παρέχει λύσεις σε αυτήν την πρόκληση, μειώνοντας το χρόνο για την αγορά και επιτρέποντας την παραγωγή εξατομικευμένων αγαθών με χαμηλές τιμές, καθιστώντας δυνατό το κέρδος σε μικρές αγορές [47]. Η ικανότητα προσαρμογής είναι απαραίτητη για να είμαστε ανταγωνιστικοί σε αυτό το σενάριο. Εμφανίζονται νέα επιχειρηματικά μοντέλα και οι ψηφιακές πλατφόρμες είναι η κυρίαρχη οργανωτική μορφή, εγείροντας ανησυχίες σχετικά με την ανταγωνιστικότητα [3]. Συχνά είναι τόσο ισχυρές όσο οι μεγάλες εταιρείες της δεύτερης βιομηχανικής επανάστασης.

Υπό αυτή την έννοια, η ρύθμιση αναμένεται να αυξηθεί. Οι κίνδυνοι να γίνουν μονοπώλια οι ψηφιακές πλατφόρμες συζητούνται όλο και πιο έντονα. Δεν είναι ακόμη σαφές εάν η ρύθμιση θα δώσει κίνητρα ή θα αποθαρρύνει τη διάδοση των τεχνολογιών. Πέρα από τη ρύθμιση των αγορών, οι εταιρείες θα αντιμετωπίσουν ένα αυξανόμενο περιβαλλοντικό ρυθμιστικό πλαίσιο [48]. Αν και οι τεχνολογίες Βιομηχανίας 4.0 επιτρέπουν βιώσιμες λειτουργίες, δεν αποτελούν «ασημένια σφαίρα». Πρέπει να γίνουν και άλλες επενδύσεις για να ανταποκρίνονται στις περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Αυτό μπορεί ακόμη και να καθυστερήσει τον ρυθμό της διάδοσης της Βιομηχανίας 4.0 [46].

Εκτός από τον ανταγωνισμό, η συνεργασία γίνεται πιο κρίσιμη για την καινοτομία και τη λειτουργία. Ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη, η παραγωγή και η παράδοση ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας πραγματοποιούνται από πολλούς οργανισμούς ταυτόχρονα και διαδραστικά [11]. Εκτός από τις μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας που χρηματοδοτούν την ανάπτυξή τους, επενδύουν επίσης στην ανοιχτή καινοτομία. Εντοπίζονται επίσης ιδιωτικά κεφάλαια, επιχειρηματικά κεφάλαια και στρατηγικές συμμαχίες που επενδύουν σε πρωτοβουλίες Βιομηχανία 4.0 [49]. Κυβερνητικά κίνητρα υπάρχουν επίσης σε πολλές χώρες. Η οικονομική διαθεσιμότητα φαίνεται να λειτουργεί υπέρ της διάχυσης [50].

Η κοινωνική δομή σε αυτή την επανάσταση έχει διαφορετικό ρόλο. ο πληθυσμός εξακολουθεί να αυξάνεται, αλλά όχι τόσο γρήγορα όσο στην τρίτη. Σημαίνει ότι η ηλικιακή δομή της κοινωνίας αλλάζει: επί του παρόντος, τα άτομα ηλικίας 60 ετών και άνω αντιπροσωπεύουν το 13% του πληθυσμού, αλλά το 2050, όταν ο πληθυσμός αναμένεται να φτάσει περίπου τα 9,8 δισεκατομμύρια, «όλες οι περιοχές του κόσμου εκτός από την

Αφρική θα έχουν σχεδόν το ένα τέταρτο ή περισσότερους του πληθυσμού τους σε ηλικίες 60 ετών και άνω» [51]. Οι περιοχές με υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης είναι η Ασία και η Αφρική. Αυτά τα γεγονότα έχουν πολλές επιπτώσεις στη ζήτηση για προϊόντα και υπηρεσίες και στην προσφορά εργασίας. Από τη μία πλευρά, η ζήτηση αλλάζει ποιοτικά λόγω της γήρανσης και της εμφάνισης νέων αγορών [35]. Οι ηλικιωμένοι χρειάζονται διαφορετικά προϊόντα και υπηρεσίες. Τα άτομα άνω των 64 τείνουν να ξοδεύουν λιγότερα σε όλους τους τομείς εκτός από την υγεία [3]. Οι νέες αγορές στην Ασία και την Αφρική έχουν διαφορετικές κουλτούρες και καταναλωτικά πρότυπα. Από την άλλη πλευρά, η ζήτηση αλλάζει ποσοτικά, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση του πληθυσμού σε συγκεκριμένες περιοχές. Η προσφορά εργασίας υπόκειται επίσης σε αλλαγές [16]. Στις βιομηχανικές χώρες, ο πληθυσμός σε ηλικία εργασίας μειώνεται από το 2011, ενώ ακόμη και στην Κίνα κορυφώθηκε το 2014. Με την πάροδο του χρόνου σημαίνει έλλειψη εργατικού δυναμικού και αύξηση των μισθών. Πράγματι, η διαφορά στο κόστος εργασίας μεταξύ των αναδυόμενων και των ανεπτυγμένων χωρών έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια. Αυτή η στροφή οδηγεί ήδη σε αυξημένη εγκατάσταση κεφαλαίων στις βιομηχανικές οικονομίες [52]. Καθώς αυτή η αντικατάσταση εντείνεται, η ανεργία θα αυξηθεί και οι αυξανόμενες εντάσεις θα μπορούσαν να καθυστερήσουν ορισμένες πρωτοβουλίες [48]. Η κοινωνική κινητικότητα γίνεται ολοένα και πιο δύσκολη. Η ανισότητα αυξάνεται, επηρεάζοντας την εμπιστοσύνη στους θεσμούς και την τεχνολογία. Αυτό οδηγεί σε κοινωνική και πολιτική αστάθεια, η οποία υπονομεύει σημαντικά τη στάση ανάληψης κινδύνων [51].

## **Κεφάλαιο 2 Ψηφιακά δίδυμα**

### **2.1 Βιομηχανικό Κυβερνο-Φυσικό Σύστημα (CPS)**

Το CPS μπορεί να θεωρηθεί ως η βάση της Βιομηχανίας 4.0, το οποίο επιτρέπει τον συνδυασμό στοιχείων λογισμικού με μηχανικά ή ηλεκτρονικά μέρη μηχανών. Η τεχνική ενσωμάτωση όλων των στοιχείων CPS στην παραγωγή και τον προγραμματισμό επεξεργάζεται με τη χρήση βιομηχανικών προσεγγίσεων IoT [53]. Εδώ, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν μέσω διαφορετικών τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων ψηφιακών συνδρομητικών γραμμών (DSL), ισχυρών ασύρματων μεθόδων ή διασυνδέσεων υψηλής ταχύτητας. Αυτή η ολοκλήρωση αντιπροσωπεύει μια αναδυόμενη τάση στην τεχνολογία και τη μηχανική [54].

Το CPS αναφέρεται σε ένα σύστημα που ενσωματώνει σύγχρονες τεχνολογίες υπολογιστών και επικοινωνιών και έννοιες του κυβερνοχώρου και φυσικών στοιχείων μέσω αισθητήρων, ενεργοποιητών, δικτύων επικοινωνιών και άλλων τεχνολογιών [7]. Έτσι, ένα CPS μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύνολο φυσικών συστημάτων συνδεδεμένων σε ένα δίκτυο (ενσωματωμένα συστήματα και διαδίκτυο) που έχουν ανώτερο επίπεδο ολοκλήρωσης μεταξύ προϊόντων και διαδικασιών, όπου τα στοιχεία της αλυσίδας παραγωγής έχουν το χαρακτηριστικό «έξυπνο» ως προαπαιτούμενο [53].

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι η προέλευση των κυβερνοφυσικών συστημάτων CPS που είναι υπεύθυνα για την εκτέλεση συγκεκριμένων υπολογιστικών λειτουργιών και τη σύνδεση μηχανικών και ηλεκτρικών στοιχείων. Μπορεί να περιγραφεί ως φυσικές υπολογιστικές συσκευές ή εξοπλισμός που αλληλεπιδρούν με τον εικονικό χώρο μέσω ενός δικτύου δεδομένων, στοιχείων συστήματος και δομής [46]. Έτσι, είναι δυνατή η καταχώρηση των πληροφοριών κατάστασης του φυσικού στοιχείου και η διασφάλιση ότι είναι ασφαλές και λειτουργεί αποτελεσματικά, με αποτέλεσμα την έξυπνη λειτουργία των φυσικών συσκευών [48].

Σε ένα κυβερνο-φυσικό ψηφιακό δίδυμο (DT), τα εικονικά μοντέλα αναπτύσσονται στον κυβερνοχώρο για να αντικατοπτρίζουν τις συμπεριφορές των αντίστοιχων φυσικών αντικειμένων τους στον πραγματικό κόσμο [31]. Το κυβερνο-φυσικό ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ έχει μια ξεχωριστή προσομοιωμένη οντότητα ενός λειτουργικού μοντέλου για να παρέχει ένα ψηφιακό αποτύπωμα των λειτουργικών διαδικασιών και χαρακτηριστικών, όπως η

διαλειτουργικότητα, η δυνατότητα διαμόρφωσης και ο προγραμματισμός, κατά την εφαρμογή προγνωστικών συστημάτων συντήρησης και διαχείρισης ποιότητας. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές και εξυπηρετεί στόχους σε επίπεδο εγκατάστασης, επίπεδο καταστήματος και επίπεδο προϊόντος [33].

## 2.2 Ψηφιακά δίδυμα

Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να θεωρηθεί μια ουσιαστική πρόοδος στον τομέα της τεχνολογίας. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί του ψηφιακού διδύμου. Άρχισε να ορίζεται όταν η NASA προσπάθησε να αυξήσει τη γνώση σχετικά με την έννοια του συστήματος καθρέφτη με στόχο τη μείωση του κόστους και των πόρων. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η NASA άρχισε να ερευνά και να αναπτύσσει το ψηφιακό δίδυμο για τα διαστημικά πλεονεκτήματα της. Αυτοί οι ορισμοί είναι ακόμη ένα έργο σε εξέλιξη [53]. Διάφορες έννοιες και έννοιες που προτάθηκαν πρόσφατα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, ο οποίος δείχνει προσεγγίσεις ψηφιακού διδύμου που σχετίζονται με οχήματα, προϊόντα, διαγνωστικά και προγνωστικά περιουσιακών στοιχείων, ψηφιακή αναπαράσταση διαφορετικών στοιχείων και προσομοιώσεις.

**Πίνακας 1** Ορισμοί των ψηφιακών διδύμων (DT)

<b>Ορισμός του ψηφιακού διδύμου</b>	<b>Αναφορά</b>
"Υπερυψηλής πιστότητας φυσικά μοντέλα των υλικών και των δομών που ελέγχουν τη διάρκεια ζωής ενός οχήματος."	[36]
"Προϊόν ψηφιακό αντίστοιχο ενός φυσικού προϊόντος."	[45]
«Εικονικά υποκατάστατα αντικειμένων του πραγματικού κόσμου που αποτελούνται από εικονικές αναπαραστάσεις και δυνατότητες επικοινωνίας που συνθέτουν έξυπνα αντικείμενα που λειτουργούν ως έξυπνοι κόμβοι μέσα στο διαδίκτυο των πραγμάτων και των υπηρεσιών».	[55]
"Ψηφιακή αναπαράσταση ενός αντικειμένου του πραγματικού κόσμου με εστίαση στο ίδιο το αντικείμενο."	[45]

<p>"Η προσομοίωση του ίδιου του φυσικού αντικειμένου για την πρόβλεψη μελλοντικών καταστάσεων του συστήματος."</p>	<p>[56]</p>
<p>"Εικονική αναπαράσταση ενός πραγματικού προϊόντος στο πλαίσιο των Κυβερνοφυσικών Συστημάτων."</p>	<p>[57]</p>
<p>Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος σε όλο τον κύκλο ζωής του, χρησιμοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να καταστεί δυνατή η κατανόηση, η μάθηση και η συλλογιστική».</p>	<p>[8]</p>
<p>«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος—αλλά είναι κάτι πολύ περισσότερο από ένα όμοιο με υψηλής τεχνολογίας. Τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούν δεδομένα, μηχανική μάθηση και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) για να βοηθήσουν τις εταιρείες να βελτιστοποιήσουν, να καινοτομήσουν, και να προσφέρει νέες υπηρεσίες».</p>	<p>[28]</p>
<p>Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση μιας φυσικής οντότητας ή συστήματος. Το ψηφιακό δίδυμο είναι κάτι πολύ περισσότερο από μια εικόνα, σχεδιάγραμμα ή σχηματικό: Είναι μια δυναμική, προσομοιωμένη άποψη ενός φυσικού προϊόντος που ενημερώνεται συνεχώς σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας. Το ψηφιακό δίδυμο και το αντίστοιχο φυσικό του αντικείμενο υπάρχουν παράλληλα και εξελίσσονται μαζί καθώς το φυσικό προϊόν προχωρά και ωριμάζει».</p>	<p>[28]</p>
<p>Μια ψηφιακή διπλή εφαρμογή για την παρακολούθηση του CPS με στόχο την υποστήριξη πτυχών όπως η</p>	<p>[45]</p>



επαλήθευση και η επικύρωση της λειτουργίας πολύπλοκων συστημάτων μέσω προσομοίωσης.»	
«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος—αλλά είναι πολύ περισσότερο από ένα όμοιο με υψηλής τεχνολογίας. Τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούν δεδομένα, μηχανική μάθηση και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) για να βοηθήσουν τις εταιρείες να βελτιστοποιήσουν, να καινοτομήσουν και να προσφέρουν νέες υπηρεσίες».	[58]

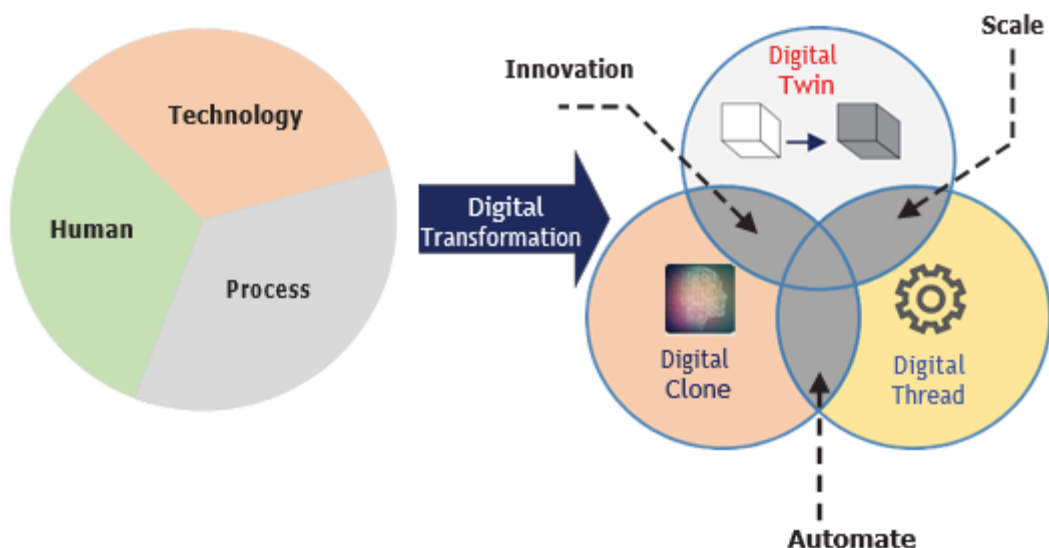
Πολλά χαρακτηριστικά συνοψίζονται στον Πίνακα 1, η ενότητα των οποίων θεωρείται σαφής ορισμός. Συγκεκριμένα, μια πρακτική μπορεί να αντιμετωπιστεί ως τεχνική ψηφιακού διδύμου εάν έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο λειτουργικό κόστος, αυξημένη ασφάλεια σε επικίνδυνες διαδικασίες, αυξημένη αποτελεσματικότητα προϊόντων και συστημάτων, πρόβλεψη προβλημάτων και κινδύνων, βελτιστοποίηση τεχνικών και στρατηγικών και άλλα.

Οι κύκλοι ζωής του φυσικού συστήματος αντικατοπτρίζονται στο ψηφιακό δίδυμο με τη λήψη δεδομένων από το σύστημα, το οποίο με τη σειρά του αναπαράγει τη λειτουργία του μοντέλου με τα δεδομένα, τις λειτουργίες και τις δυνατότητες επικοινωνίας του στον ψηφιακό χώρο. Συνήθως, εάν πραγματοποιηθούν αλλαγές στο φυσικό σύστημα, τα μοντέλα ενημερώνονται αυτόματα για να αναπαραγάγουν το ίδιο συμβάν [45].

Έτσι, το ψηφιακό δίδυμο αναφέρεται σε ένα ψηφιακό αντίγραφο φυσικών περιουσιακών στοιχείων (φυσικό δίδυμο), σε αυτήν την περίπτωση, το οποίο ακολουθεί τον κύκλο ζωής για την παρακολούθηση, τον έλεγχο ή τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών. Επιπλέον, ένα ευφυές ψηφιακό δίδυμο αποτελείται από ένα ψηφιακό δίδυμο με όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά και πρόσθετους αλγόριθμους για την εφαρμογή λύσεων τεχνητής νοημοσύνης που εισάγονται ως μέρος της διαδικασίας [39].

Η τεχνολογία ψηφιακού διδύμου είναι μια εικονική βεβαιότητα που θα βοηθούσε πρωτίστως τις εταιρείες όσον αφορά την παραγωγικότητα και το ανταγωνιστικό

πλεονέκτημα. Ο κόσμος κινείται προς πιο έξυπνες λύσεις και το ψηφιακό δίδυμο ικανοποιεί την ανάγκη για πληροφορίες και έρευνα. Αυτή η τεχνολογία θα συνεχιστεί καθώς ωριμάζει και αναπτύσσει το μοντέλο της. Τα οφέλη του ψηφιακού διδύμου διαφέρουν ανάλογα με το πώς και πού χρησιμοποιείται [12]. Η χρήση ενός ψηφιακού διδύμου για την παρακολούθηση των επί του παρόντος αντικειμένων όπως μια ανεμογεννήτρια ή ένας αγωγός πετρελαίου, για παράδειγμα, θα εξοικονομήσει εκατομμύρια δολάρια σε κόστος συντήρησης. Η δημιουργία πρωτοτύπων πριν από την κατασκευή με ψηφιακό δίδυμο θα βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων του προϊόντος και θα συντομεύσει το χρόνο διάθεσης στην αγορά. Οι βελτιώσεις της μεθόδου περιλαμβάνουν τη μέτρηση σταδίων στελέχωσης που αντιτίθενται στην παραγωγή ή την τοποθέτηση μιας αλυσίδας εφοδιασμού με βιομηχανικές προδιαγραφές ή προδιαγραφές συντήρησης [59]. Η χρήση εποπτείας και προσομοίωσης για τη βελτίωση των επιτευγμάτων θα οδηγήσει σε βελτιωμένη αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία. Μπορούν επίσης να μειώσουν το κόστος συντήρησης προβλέποντας την αστοχία πριν συμβεί και να διασφαλίσουν ότι η διεύθυνση της συντήρησης, επισκευής και ανταλλακτικών δεν παρεμβαίνει στους στόχους ανάπτυξης [60]. Μέσω της εξέτασης μοντέλων προσαρμογής και της εκτέλεσης παρακολούθησης απόδοσης σε πραγματικό χρόνο, το ψηφιακό δίδυμο θα παρέχει συνεχείς βελτιώσεις και θα διασφαλίζει τη συνέπεια του προϊόντος. Η Εικόνα 3 δείχνει τον ψηφιακό μετασχηματισμό διαφόρων φυσικών συστημάτων.



### **Εικόνα 3** Ψηφιακός μετασχηματισμός διαφόρων φυσικών συστημάτων.

Υπάρχει μια εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου σε ένα κατασκευαστικό πλαίσιο που προτείνει ένα μοντέλο με τρεις τύπους εφαρμογών στο κατάστημα, ο ένας εστιάζεται στο προϊόν, ο άλλος στη διαδικασία και ο τελευταίος στη λειτουργία [61].

- Product Digital Twins—σχετικά με το αποτέλεσμα της παραγωγικής διαδικασίας.
- Process Digital Twins—δομή που περιγράφεται σε βήματα που αντιπροσωπεύουν τον τρόπο λειτουργίας της διαδικασίας.
- Operation Digital Twins—μια επιχειρησιακή διαδικασία που ρυθμίζει τον τρόπο λειτουργίας κάθε μέρους της διαδικασίας.

Το ψηφιακό δίδυμο παρέχει ένα μοντέλο υψηλής πιστότητας και ενημερώνει τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Έτσι, το σύστημα ψηφιακού διδύμου μπορεί να αναπαράγει την τρέχουσα κατάσταση ενός φυσικού αντικειμένου στον εικονικό κόσμο με δεδομένα, έτσι ώστε κάθε φορά που προστίθενται πληροφορίες, το μοντέλο ψηφιακού διδύμου να βελτιώνεται. Στην εργασία των Sharif Ullah, (2019), υπάρχει μια πρόταση για τη δημιουργία υπολογίσιμων εικονικών αφαιρέσεων σύνθετων κατασκευαστικών ρυθμίσεων που δηλώνονται ως δίδυμα φαινόμενα για την ανάπτυξη του CPS που απαιτείται για την εργασία στη Βιομηχανία 4.0 [62].

Σε αυτό το πλαίσιο, η προσομοίωση ψηφιακού διδύμου μπορεί να μειώσει τις απρόβλεπτες και ανεπιθύμητες καταστάσεις που προκαλούνται από διάφορους παράγοντες όπως το σφάλμα επικοινωνίας, η αποτυχία δικτύου, οι ψευδείς ανθρώπινες αλληλεπιδράσεις και άλλοι. Αυτή η ικανότητα εξηγείται από το γεγονός ότι το ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ συλλαμβάνει και επεξεργάζεται τις τρέχουσες πληροφορίες σχετικά με το λειτουργικό σύστημα για να προβλέψει αυτές τις συνθήκες [63]. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να επεξεργάζεται δεδομένα για την υλοποίηση εργασιών διάγνωσης, βελτιστοποίησης και πρόβλεψης. Ωστόσο, είναι δύσκολο να προβλεφθούν με ακρίβεια δομικά πολύπλοκα συστήματα, επειδή απαιτείται σημαντική ροή δεδομένων για την παροχή κατάλληλης αναπαράστασης δεδομένων [64].

Ορισμένες πολύπλοκες περιπτώσεις συνδέονται με τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος ανάλογα με την εφαρμογή ή τη διαδικασία (διαχείριση κατασκευής, μεταξύ

άλλων). Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τον εντοπισμό της πόρτας σε πραγματικό χρόνο, ο οποίος εξακολουθεί να αποτελεί σημαντικό πρόβλημα σε διάφορες εφαρμογές. Υπό αυτή την έννοια, τέτοιες καταστάσεις έχουν επιταχύνει την υλοποίηση της ευφυΐας αιχμής στο βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IIoT) και πρότεινε μια λύση που βελτιώνει την αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος και διαμόρφωσε μια βελτιστοποίηση για συσχέτιση ακμών χρησιμοποιώντας το ψηφιακό δίδυμο [6].

Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να μάθει και να ενημερώνεται από διάφορες πηγές για να αντιπροσωπεύει την κατάσταση, την κατάσταση λειτουργίας ή τη θέση του σε πραγματικό χρόνο. Όσο πιο εξελιγμένο είναι το ψηφιακό δίδυμο, τόσο μεγαλύτερη είναι η ζήτηση για αυξημένη συνδεσιμότητα, η οποία είναι επίσης απαραίτητη για την επέκταση της προσβασιμότητας του δικτύου σε εσωτερικά περιβάλλοντα και την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων σε διακριτές φάσεις του κύκλου ζωής του προϊόντος [66].

Η έξυπνη κατασκευή συγχωνεύει τον εικονικό και τον φυσικό κόσμο μέσω του CPS και του IoT, κοινές έννοιες στη Βιομηχανία 4.0, το οποίο πρότεινε την έξυπνη κατασκευή επόμενης γενιάς για να επιτύχει υψηλή προσαρμοστικότητα, γρήγορες αλλαγές στο σχεδιασμό, ψηφιακή τεχνολογία πληροφοριών και πιο ευέλικτη επεξεργασία, διαδικασία. Σύμφωνα με τους Ashtari Talkhestani et al. (2019), οι ορισμοί του ψηφιακού διδύμου περιλαμβάνουν τρία μέρη στη βιβλιογραφία: μοντέλα και δεδομένα, διασύνδεση και προσομοίωση [7].

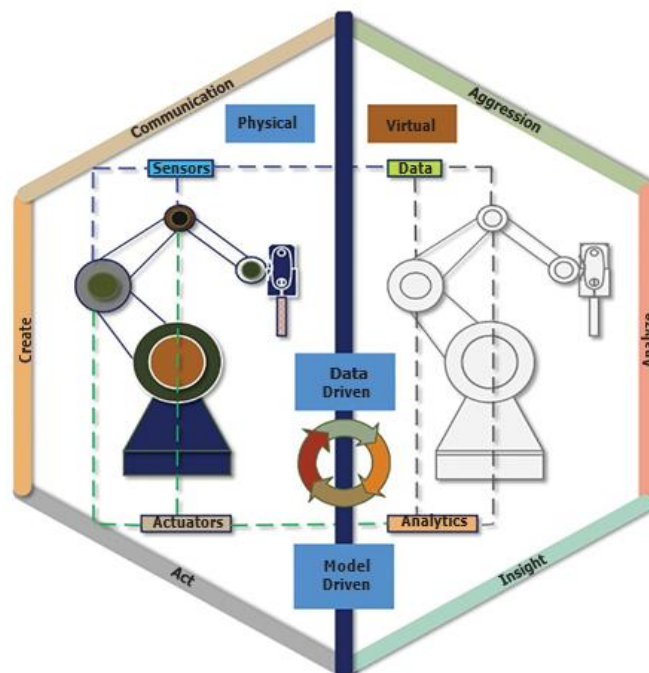
Παρά τις διαφορετικές εφαρμογές και την ιδιαιτερότητα κάθε μελέτης, σημειώνουμε ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αναπαραστήσει, να προσομοιώσει και να ερμηνεύσει συλλεγμένα δεδομένα. Σε πολλές περιπτώσεις, υπάρχει επικοινωνία με άλλα ψηφιακά δίδυμα και συστήματα για την επισημοποίηση και την επικύρωση των απαιτήσεων [61]. Είναι επίσης σύνηθες να χρησιμοποιούνται IoT, CPS και τεχνητή νοημοσύνη (AI) ή μηχανική μάθηση για την προεπεξεργασία και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος [23].

Επιπλέον, οι μεθοδολογίες AI υποστηρίζουν βασικές λειτουργίες του συστήματος. Παρέχει, σε ορισμένες περιπτώσεις, τη δυνατότητα μάθησης από μόνο του, χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα περιβάλλοντος και διεργασίας που αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος [40]. Ως εκ τούτου, ο χειριστής αναλύει και ερμηνεύει αυτά τα δεδομένα, όπως μηχανικούς, τεχνικούς ή ειδικούς με βαθιά

και σχετική γνώση του τομέα διεργασίας των συσκευών και των μηχανημάτων από παρόμοιες βιομηχανικές δομές. Στη συνέχεια, αυτή η εμπειρία και η τεχνογνωσία εφαρμόζονται για τη βελτίωση παραγόντων που σχετίζονται με την παραγωγή, τη διαχείριση της ζήτησης και τη μείωση του κόστους [66].

### 2.3 Έννοια του Φυσικού και Εικονικού Μοντέλου του Ψηφιακού διδύμου

Η έννοια του ψηφιακού διδύμου προσελκύει επί του παρόντος περισσότερη προσοχή στην έρευνα και στους επαγγελματίες λόγω της τεράστιας σειράς τομέων εφαρμογής τους. Το ψηφιακό δίδυμο είναι μία από τις βοηθητικές τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 και συνδέεται με πραγματικό φυσικό σύστημα και αντίστοιχο εικονικό σύστημα χρησιμοποιώντας μοντέλο προσομοίωσης, δεδομένα αισθητήρων και εργαλεία για την ανάλυση δεδομένων. Οι επικοινωνίες IoT (ή) από μηχανή με μηχανή είναι όροι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αυτές τις έξυπνες διασυνδέσεις και τη διαλειτουργικότητα. Η Εικόνα 4 δείχνει την έννοια του φυσικού και εικονικού μοντέλου του ψηφιακού διδύμου [67][68].



**Εικόνα 4** Έννοια του φυσικού και εικονικού μοντέλου του ψηφιακού διδύμου

**1. Δημιουργία:** Κατά τη φάση δημιουργίας, η φυσική διαδικασία είναι εξοπλισμένη με μια σειρά από αισθητήρες που παρακολουθούν σοβαρές εισροές από τη διαδικασία. Τα δεδομένα των αισθητήρων όπως η δύναμη εφελκυσμού, η μετατόπιση, η ροπή, η ενότητα χρώματος, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και το επίπεδο υγρασίας είναι παραδείγματα εξωτερικών δεδομένων που επηρεάζουν τις δραστηριότητες ενός φυσικού περιουσιακού στοιχείου [28]. Οι μετρήσεις μπορούν να μετατραπούν σε ασφαλή ψηφιακά μηνύματα και να σταλούν στο ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιώντας κωδικοποιητές. Στα σήματα από τους αισθητήρες, μπορεί να εφαρμοστεί γνώση βασισμένη σε διαδικασίες από συστήματα όπως συστήματα υλοποίησης παραγωγής, συστήματα ERP, μοντέλα CAD και συστήματα αλυσίδων εφοδιασμού. Θα περιλαμβάνει έναν τεράστιο όγκο δεδομένων που ενημερώνονται συνεχώς για χρήση από το ψηφιακό δίδυμο ως είσοδο ανάλυσης [65].

**2. Επικοινωνία:** Το στάδιο επικοινωνίας επιτρέπει την αμφίδρομη ενσωμάτωση σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των φυσικών και ψηφιακών μεθόδων [69]. Η εννοιολογική αρχιτεκτονική των έξι βημάτων που προτείνεται για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του ψηφιακού διδύμου περιλαμβάνει τα στάδια δημιουργίας, επικοινωνίας, συγκέντρωσης, ανάλυσης, διορατικότητας και δράσης. Στη διαδικασία κατασκευής, τεχνολογίες όπως αισθητήρες εγκαθίστανται στο φυσικό στοιχείο για τη συλλογή δεδομένων από φυσικό αντικείμενο. Τα μοντέλα CAD και συστημάτων εκτέλεσης κατασκευής ήταν πολύ διανεμημένα. Η επεξεργασία άκρων, οι διεπαφές επικοινωνίας και η προστασία άκρων είναι τα τρία συστατικά αυτής της φάσης [38].

**A. Επεξεργασία άκρων:** Η σύνδεση ακμών συνδέει αισθητήρες και ιστορικούς, επεξεργάζεται σήματα και δεδομένα κοντά στην πηγή και στέλνει δεδομένα στην πλατφόρμα. Με τη μετάφραση των ιδιόκτητων πρωτοκόλλων σε πιο απλά κατανοητές μορφές δεδομένων, αυτό αποτρέπει την επικοινωνία δικτύου [70].

**B. Διεπαφές επικοινωνίας:** Μέσω της σύνδεσης επικοινωνίας, τα δεδομένα μετακινούνται από τον αισθητήρα στην ενοποίηση. Δεδομένου αυτού, ο αισθητήρας που δημιουργεί την εικόνα μπορεί να βρίσκεται σχεδόν οπουδήποτε, ανάλογα με τη διαμόρφωστο ψηφιακό δίδυμο [42].

**Γ. Ασφάλεια άκρων:** Οι μετρήσεις αισθητήρα και επικοινωνίας έχουν μια σειρά από νέα προβλήματα ασφάλειας, τα οποία εξακολουθούν να λύνονται. Τα τείχη προστασίας, τα κλειδιά εφαρμογών, η κρυπτογράφηση και τα πιστοποιητικά συστήματος είναι οι πιο κοινές μέθοδοι ασφάλειας, καθώς περισσότερα στοιχεία αναπτύσσονται με δυνατότητα IP [71].

**3. Συγκέντρωση:** Το στάδιο συγκέντρωσης θα βοηθήσει με την απορρόφηση δεδομένων στην αποθήκευση δεδομένων, την επεξεργασία και τα αναλυτικά στοιχεία. Η συγκέντρωση και η επεξεργασία δεδομένων μπορεί να πραγματοποιηθεί εντός των εγκαταστάσεων ή στο cloud [17].

**4. Ανάλυση:** Τα δεδομένα αναλύονται και οπτικοποιούνται κατά το στάδιο της ανάλυσης. Τα προηγμένα εργαλεία και τεχνολογίες ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από επιστήμονες δεδομένων και αναλυτές για τη δημιουργία επαναληπτικών μοντέλων που παράγουν πληροφορίες, προτάσεις και καθοδήγηση στη λήψη αποφάσεων [1].

**5. Insight:** Τα ευρήματα από τα αναλυτικά στοιχεία παρέχονται μέσω συστημάτων παρακολούθησης με οπτικοποιήσεις στη φάση της γνώσης, υπογραμμίζοντας ακούσιες αποκλίσεις στην απόδοση του μοντέλου ψηφιακού διδύμου και τη σύγκριση πραγματικού κόσμου σε ένα ή περισσότερα μεγέθη, υποδηλώνοντας ότι οι περιοχές μπορεί να απαιτούν περαιτέρω ανάλυση και βελτίωση [36].

**6. Πράξη:** Η επιρροή του ψηφιακού διδύμου πραγματοποιείται στο στάδιο της πράξης με την τροφοδοσία ενεργών πληροφοριών από προηγούμενα στάδια πίσω στο φυσικό περιουσιακό στοιχείο και στην ψηφιακή φάση. Οι παρατηρήσεις τροφοδοτούνται σε ενεργοποιητές διαδικασίας περιουσιακών στοιχείων, οι οποίοι ελέγχουν μετρούν ή μηχανισμούς ελέγχου, ή προσαρμόζονται σε συστήματα back-end που ελέγχουν τις αλυσίδες εφοδιασμού και τη συμπεριφορά συλλογής, τα οποία υπόκεινται σε ανθρώπινη παρέμβαση [27].

## **2.4 Επίδραση των ψηφιακών διδύμων στις βιομηχανίες - Βιομηχανία 4.0**

Πρόκειται για ένα συνδυασμό του φυσικού και του εικονικού κόσμου, με στόχο να δώσει σε κάθε κλάδο μια ποικιλόμορφη ψηφιακή αναπαράσταση. Το ψηφιακό δίδυμο συνδυάζει

γνώση και τεχνολογία όπως AI, ML και αναλυτικά στοιχεία λογισμικού για τη δημιουργία ενεργών ψηφιακών μοντέλων προσομοίωσης που αναβαθμίζονται και προσαρμόζονται ως απόκριση στις αλλαγές στα φυσικά αντίστοιχα [7]. Ως αποτέλεσμα, η εταιρεία κερδίζει το πλεονέκτημα της δημιουργίας ενός μηχανογραφημένου αποτυπώματος ολόκληρου του κύκλου ανάπτυξης των προϊόντων της, από τη σύλληψη μέχρι την υλοποίηση. Αυτός ο ψηφιακός κλώνος φυσικών ιδιοτήτων, διεργασιών και δομών δημιουργεί δεδομένα σε συνεχή βάση. Χρησιμοποιώντας αναπαραγωγές, οι εταιρείες είναι σε θέση να παρέχουν έγκαιρες προειδοποιήσεις, να προβλέψουν το χρόνο διακοπής λειτουργίας και να αναπτύξουν νέες ανοιχτές πόρτες για το μέλλον [4].

Το ψηφιακό δίδυμο βρίσκεται στο επίκεντρο της εναλλαγής Βιομηχανίας 4.0, η οποία περιλαμβάνει την αυτοματοποίηση, την κοινή χρήση δεδομένων και τις διαδικασίες παραγωγής για τη δημιουργία άπειρων ευκαιριών ανάπτυξης για τις εταιρείες. Η τεχνολογία βοηθά τους χειριστές να κατανοήσουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, αποτελεσματικότητα και πιθανά ζητήματα στο εικονικό προσομοιωμένο μοντέλο, προσφέροντας ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο του μηχανήματος [55]. Δεδομένου ότι η τεχνολογία επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο μιας φυσικής εγκατάστασης χρησιμοποιώντας αισθητήρες συνδεδεμένους σε ολόκληρη τη ρύθμιση, οι χειριστές μπορούν να ειδοποιηθούν εκ των προτέρων για πιθανά σφάλματα, διακοπές λειτουργίας ή τραυματισμούς του μηχανήματος [4]. Με την ενσωμάτωση των αναλυτικών στοιχείων AI, ML και λογισμικού με δεδομένα, το ψηφιακό δίδυμο αναπτύσσει ένα μοντέλο προσομοίωσης που μπορεί να αναβαθμίσει μια μεγάλη πλευρά ή στη θέση ενός φυσικού συμπληρώματος [46].

Το ψηφιακό δίδυμο είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της Βιομηχανίας 4.0 επειδή παρέχει αυτοματοποίηση, κοινή χρήση δεδομένων και συνδυασμένες διαδικασίες παραγωγής, καθώς και ανάπτυξη προϊόντων που αποτρέπει τον κίνδυνο [33]. Οι εργαζόμενοι στον κλάδο μπορούν να παρακολουθούν τις λειτουργίες σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας έγκαιρη ειδοποίηση πιθανών αστοχιών και επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση και τη μέτρηση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο με ελάχιστη απώλεια παραγωγικότητας [72].



## Κεφάλαιο 3 Ψηφιακά δίδυμα και Βιομηχανία 4.0

### 3.1. Ο ρόλος των ψηφιακών διδύμων στην εποχή της βιομηχανίας 4.0

Ενώ η ιδέα ενός ψηφιακού δίδυμου υπάρχει από το 2002, μόνο χάρη στο Internet of Things (IoT) έχει γίνει οικονομικά αποδοτική η εφαρμογή του. Η ιδέα προέκυψε για πρώτη φορά στη NASA: πλήρους κλίμακας μακέτες πρώιμων διαστημικών καψουλών, που χρησιμοποιήθηκαν στο έδαφος για να αντικατοπτρίζουν και να διαγνώσουν προβλήματα στην τροχιά, τελικά έδωσαν τη θέση τους σε πλήρως ψηφιακές προσομοιώσεις[18].

Στην εποχή της Βιομηχανίας 4.0, τα ψηφιακά δίδυμα συμβάλλουν στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια δυναμική, εικονική αναπαράσταση ενός αντίστοιχου φυσικού προϊόντος. Αυτά τα μοντέλα διαφέρουν ως προς τον σκοπό, αλλά χρησιμεύουν ως ισχυρή σύνδεση με το προϊόν για διαγνωστικά και σχεδιαστικές αλλαγές. Οι εταιρείες χρησιμοποιούν ολοένα και περισσότερο ψηφιακά δίδυμα για να βελτιστοποιήσουν τα προϊόντα τους με τρόπους που προηγουμένως ήταν είτε μη ρεαλιστικοί είτε αδύνατοι [9].

Για πολλές εταιρείες, παράγουν αξία σε μειωμένο κόστος συντήρησης, ταχύτερο χρόνο διάθεσης στην αγορά και βελτίωση στη διαχείριση προϊόντων. Καθώς η τεχνολογία βελτιώνεται και δημιουργεί νέες καινοτομίες, οι εταιρείες μπορούν να ενσωματώσουν ψηφιακά δίδυμα στη διαδικασία παραγωγής τους με ευκολία [57]. Ενώ η ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή, αυτό αλλάζει γρήγορα καθώς οι λειτουργικές διαδικασίες προσαρμόζονται στη βιομηχανική επανάσταση. Σύντομα θα δούμε ψηφιακά δίδυμα να εργάζονται σε όλο και περισσότερους κλάδους. Ποια είναι λοιπόν τα οφέλη από την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας;

### **3.2. Τι είναι το ψηφιακό δίδυμο**

Στην πιο απλή του μορφή, ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα εικονικό αντίγραφο ενός φυσικού προϊόντος, διαδικασίας ή συστήματος. Λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου χρησιμοποιώντας αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με ένα φυσικό αντικείμενο. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τη δημιουργία ενός ψηφιακού διπλότυπου του στοιχείου, επιτρέποντάς του να γίνει κατανοητό, να αναλυθεί, να τροποποιηθεί ή να βελτιστοποιηθεί. Άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της τεχνολογίας με την πάροδο των ετών περιλαμβάνουν εικονική πρωτότυπη, υβριδική δίδυμη τεχνολογία, εικονική δίδυμη και διαχείριση ψηφιακών περιουσιακών στοιχείων[73].

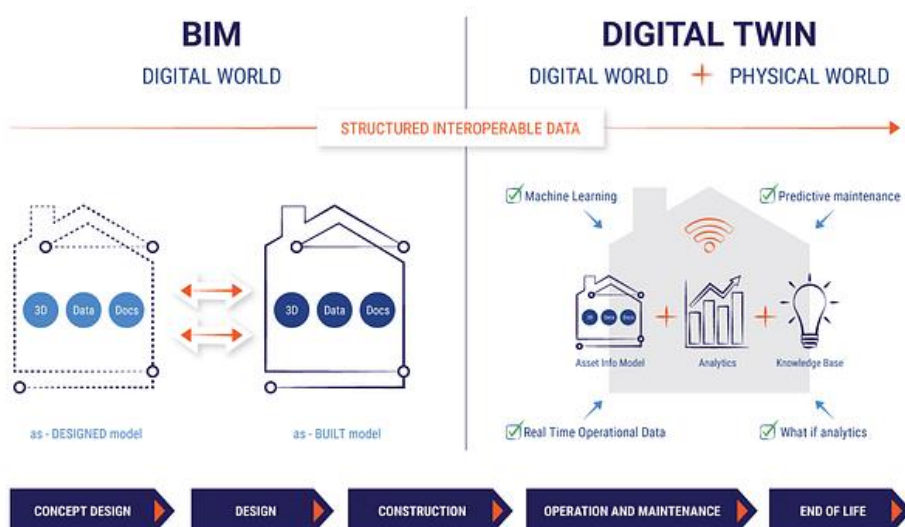
### **3.3. Πώς λειτουργεί ένα ψηφιακό δίδυμο**

Ένα ψηφιακό δίδυμο ξεκινά τη ζωή του να χτίζεται από ειδικούς, συχνά ειδικούς στην επιστήμη δεδομένων ή στα εφαρμοσμένα μαθηματικά. Αυτοί οι προγραμματιστές ερευνούν τη φυσική που βρίσκεται στη βάση του φυσικού αντικειμένου ή συστήματος που μιμείται και χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα για να αναπτύξουν ένα μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει το πρωτότυπο του πραγματικού κόσμου στον ψηφιακό χώρο [74].

Το δίδυμο είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να μπορεί να λαμβάνει δεδομένα από αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα από ένα αντίστοιχο του πραγματικού κόσμου. Αυτό επιτρέπει στο δίδυμο να προσομοιώνει το φυσικό αντικείμενο σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας στη διαδικασία πληροφορίες για την απόδοση και τα πιθανά προβλήματα [59]. Το δίδυμο θα μπορούσε επίσης να σχεδιαστεί με βάση ένα πρωτότυπο του φυσικού του αντίστοιχου, οπότε το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να παρέχει ανατροφοδότηση καθώς το προϊόν εξευγενίζεται. Ένα ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε ακόμη και να χρησιμεύσει ως πρωτότυπο το ίδιο πριν κατασκευαστεί οποιαδήποτε φυσική έκδοση [41].

Η διαδικασία περιγράφεται λεπτομερώς από την Eniram, μια εταιρεία που δημιουργεί ψηφιακά δίδυμα από τα τεράστια πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που

μεταφέρουν μεγάλο μέρος του παγκόσμιου εμπορίου - ένα εξαιρετικά περίπλοκο είδος ψηφιακής διπλής εφαρμογής. Ωστόσο, ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να είναι τόσο περίπλοκο ή απλό, και ο όγκος των δεδομένων που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία και την ενημέρωση του θα καθορίσει πόσο ακριβώς προσομοιώνεται ένα φυσικό αντικείμενο[75].



**Εικόνα 5.** Μεθοδολογία λειτουργίας ψηφιακού δίδυμου

### 3.4. Γιατί είναι σημαντική η ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία

Τα ψηφιακά δίδυμα είναι ισχυροί εγκέφαλοι που οδηγούν στην καινοτομία και την απόδοση. Φανταστείτε το ως τους πιο ταλαντούχους τεχνικούς προϊόντων σας με τις πιο προηγμένες δυνατότητες παρακολούθησης, ανάλυσης και πρόβλεψης στα χέρια τους [21].

Θα υπάρξουν δισεκατομμύρια πράγματα που θα αντιπροσωπεύονται από ψηφιακά δίδυμα μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια. Αυτοί οι πληρεξούσιοι του φυσικού κόσμου θα οδηγήσουν σε νέες ευκαιρίες συνεργασίας μεταξύ ειδικών προϊόντων φυσικού κόσμου και επιστημόνων δεδομένων των οποίων η δουλειά είναι να κατανοούν τι μας λένε τα δεδομένα για τις λειτουργίες[59].

Η τεχνολογία Ψηφιακών Διδύμων βοηθά τις εταιρείες να βελτιώσουν την εμπειρία των πελατών κατανοώντας καλύτερα τις ανάγκες των πελατών, να αναπτύξουν βελτιώσεις σε υπάρχοντα προϊόντα, λειτουργίες και υπηρεσίες και μπορεί ακόμη και να συμβάλει στην προώθηση της καινοτομίας νέων επιχειρήσεων[54].

### **3.5. Οφέλη των ψηφιακών διδύμων**

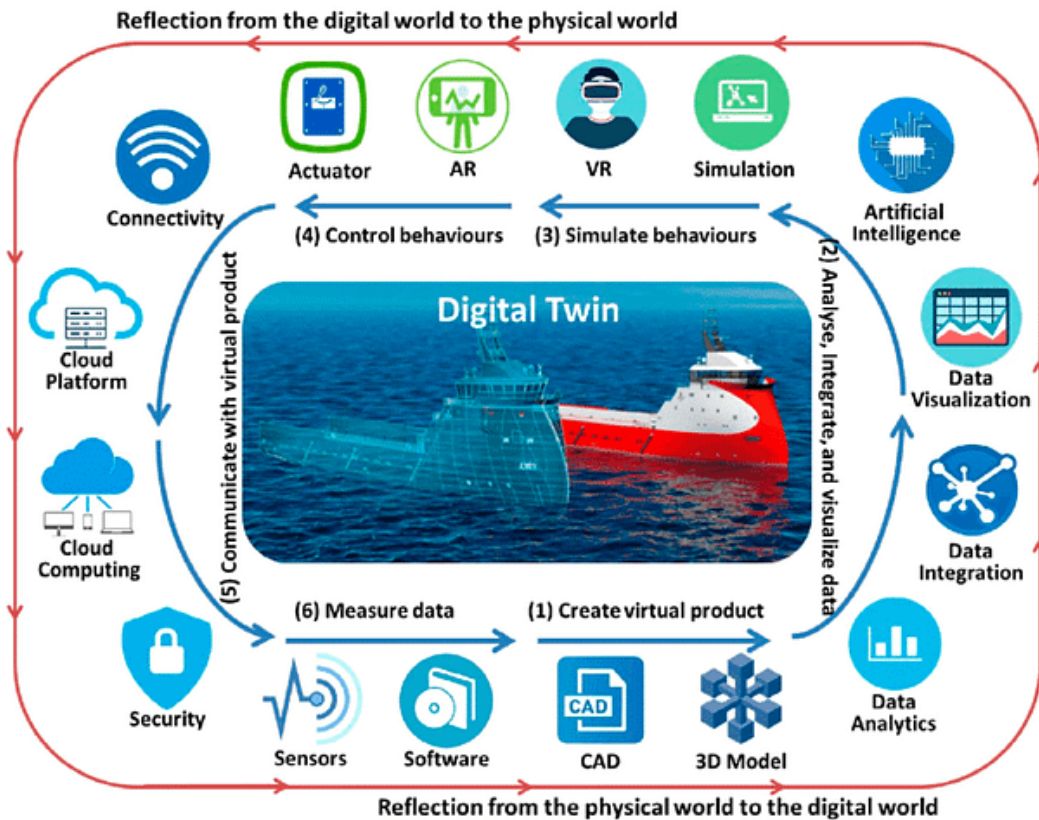
Τα ψηφιακά δίδυμα προσφέρουν μια ματιά σε πραγματικό χρόνο για το τι συμβαίνει με τα φυσικά περιουσιακά στοιχεία, γεγονός που μπορεί να μειώσει ριζικά τα βάρη συντήρησης. Οι εταιρείες χρησιμοποιούν την ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία για πολλούς λόγους, όπως για τη βελτίωση των συνεχιζόμενων λειτουργιών, την εκπαίδευση εργαζομένων και τη δοκιμή νέων προϊόντων ή διαδικασιών πριν τα λανσάρουν στον πραγματικό κόσμο όπου γίνεται πιο δαπανηρή και περίπλοκη η επίλυση τυχόν προβλημάτων [9].

Συχνά η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση χρησιμοποιούνται για την ανάλυση του μοντέλου λειτουργιών που αντιπροσωπεύεται από το ψηφιακό δίδυμο, ανεξάρτητα από το πού βρίσκεται η πραγματική εγκατάσταση — ακόμα κι αν ο εξοπλισμός βρίσκεται στο διάστημα [8]. Η NASA χρησιμοποίησε την τεχνολογία σύζευξης, τον πρόδρομο της ψηφιακής διπλής τεχνολογίας, από τις πρώτες ημέρες της εξερεύνησης του διαστήματος για να λύσει το πρόβλημα της λειτουργίας, συντήρησης και επισκευής συστημάτων όταν δεν βρίσκεστε κοντά τους φυσικά. Αυτός ήταν ακριβώς ο τρόπος με τον οποίο οι μηχανικοί και οι αστροναύτες στη Γη καθόρισαν πώς να σώσουν την αποστολή Apollo 13. Σήμερα, τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται στη NASA για την εξερεύνηση οχημάτων και αεροσκαφών επόμενης γενιάς [77].

1. Δοκιμή νέων συστημάτων πριν από την κατασκευή  
Οι εταιρείες μπορούν να χρησιμοποιήσουν ψηφιακά δίδυμα για να δημιουργήσουν και να δοκιμάσουν συστήματα, ιδέες εξοπλισμού και μοντέλα υπηρεσιών πριν επενδύσουν στην κατασκευή ή την υλοποίηση. Εάν ένα μοντέλο αποδειχθεί

αποτελεσματικό, το ψηφιακό του δίδυμο θα μπορούσε θεωρητικά να συνδεθεί με τη φυσική δημιουργία για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο [53].

2. Βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της παραγωγικότητας  
Σε μια πρόβλεψη του 2017 σχετικά με τα οφέλη των ψηφιακών διδύμων, το Forbes πρότεινε ότι η χρήση της τεχνολογίας θα μπορούσε να βελτιώσει την ταχύτητα των κρίσιμων διαδικασιών κατά 30% [57]. Σύμφωνα με την Gartner, οι βιομηχανικές εταιρείες θα μπορούσαν να δουν 10 τοις εκατό βελτίωση στην αποτελεσματικότητα. Η ευρεία διαθεσιμότητα και οι ποικίλες θήκες χρήσης για ψηφιακά δίδυμα δίνουν στις επιχειρήσεις σχεδόν σε όλους τους κλάδους καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών που μπορούν να εξορθολογιστούν και να βελτιωθούν, συμβάλλοντας έτσι στην ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας μέσω της πρακτικής προγνωστικής συντήρησης [22].
3. Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο  
Η χρήση ψηφιακών διδύμων για την παρακολούθηση των καθημερινών λειτουργιών και τον εξορθολογισμό της κατασκευής μειώνει την περιττή φθορά των μηχανημάτων και προειδοποιεί τους ιδιοκτήτες επιχειρήσεων για πιθανές αλλαγές εξοικονόμησης χρημάτων, όπως η πραγματοποίηση προσαρμογών στη χρήση καυσίμου [18]. Η ταχύτερη συντήρηση και επισκευή επιτρέπει στις εταιρείες να διατηρούν ανταγωνιστικό πλεονέκτημα βελτιώνοντας τη συνολική παραγωγή [47].
4. Κατανόηση δεδομένων για την παροχή καλύτερης εξυπηρέτησης  
Τα ψηφιακά δίδυμα διαθέτουν επίσης εφαρμογές που απευθύνονται σε πελάτες, συμπεριλαμβανομένης της απομακρυσμένης αντιμετώπισης προβλημάτων [16]. Χρησιμοποιώντας εικονικά μοντέλα, οι τεχνικοί μπορούν να πραγματοποιήσουν διαγνωστικές δοκιμές από οπουδήποτε και να καθοδηγήσουν τους καταναλωτές στα κατάλληλα βήματα για την επισκευή αντί να βασίζονται τυφλά στα προεπιλεγμένα πρωτόκολλα. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από αυτές τις συνεδρίες παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για μελλοντικό σχεδιασμό και ανάπτυξη προϊόντων [78].



**Εικόνα 6.** Αντανάκλαση από τον ψηφιακό στον φυσικό κόσμο και το αντίστροφο

### 3.6. Προκλήσεις ασφαλείας με ψηφιακά δίδυμα

Όσο πιο γρήγορα εξαπλώνεται ένας νέος τύπος τεχνολογίας, τόσο λιγότερη προσοχή τείνει να δοθεί στην ασφάλεια από την αρχή. Αυτό αναγκάζει τις εταιρείες να αγωνίζονται για να σβήσουν μεταφορικές πυρκαγιές όταν εκμεταλλεύονται τα τρωτά σημεία, οδηγώντας σε απώλεια χρόνου και κερδών [77].

Επειδή τα ψηφιακά δίδυμα βασίζονται στο cloud και δεν απαιτούν φυσική υποδομή, οι σχετικοί κίνδυνοι ασφαλείας είναι κάπως χαμηλότεροι από ό,τι με άλλους τύπους συστημάτων. Ωστόσο, οι τεράστιες ποσότητες δεδομένων που συλλέγονται και χρησιμοποιούνται προέρχονται από πολυάριθμα τελικά σημεία, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει μια πιθανή περιοχή αδυναμίας [33]. Υπολογίζεται ότι το 75 τοις εκατό των ψηφιακών διδύμων θα ενσωματωθεί με τουλάχιστον πέντε τελικά σημεία έως το 2023

και έρχεται μια στιγμή που η οπτικοποίηση πολύπλοκων συστημάτων μπορεί να απαιτεί τη σύνδεση πολλαπλών ψηφιακών διδύμων [79].

Κάθε φορά που δημιουργείται μια νέα σύνδεση και ρέουν περισσότερα δεδομένα μεταξύ συσκευών και του cloud, ο πιθανός κίνδυνος για συμβιβασμό αυξάνεται [39]. Ως εκ τούτου, οι επιχειρήσεις που εξετάζουν την ψηφιακή δίδυμη τεχνολογία πρέπει να προσέχουν να μην βιαστούν να υιοθετήσουν χωρίς να αξιολογήσουν και να ενημερώσουν τα τρέχοντα πρωτόκολλα ασφαλείας. Οι τομείς με τη μεγαλύτερη σημασία περιλαμβάνουν:

- Κρυπτογράφηση δεδομένων
- Προνόμια πρόσβασης, συμπεριλαμβανομένου του σαφούς ορισμού των ρόλων των χρηστών
- Αρχή του δικαιώματος μίσθωσης
- Αντιμετώπιση γνωστών τρωτών σημείων της συσκευής
- Τακτικοί έλεγχοι ασφαλείας [12].

### **3.7. Το μέλλον του ψηφιακού διδύμου**

Εκεί που προσφέρουν νέες και αξιόλογες δυνατότητες είναι σε οργανωτικό επίπεδο στο δομημένο περιβάλλον. Η εφαρμογή τους σε νοσοκομεία ή κτίρια εμπορικών ακινήτων, για παράδειγμα, προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας ευεργετικών αποτελεσμάτων όχι μόνο για τους διαχειριστές ή τους ιδιοκτήτες κτιρίων αλλά και για τους ανθρώπους μέσα σε αυτά τα κτίρια [72]. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υιοθετήσουν μια ανθρωποκεντρική προσέγγιση (ξεκινώντας από τους ανθρώπους) και στη συνέχεια να εξετάσουν προβλήματα και το πλαίσιο και, τέλος, να προσθέσουν συστήματα πληροφορικής και συνδεδεμένες συσκευές για να προσπαθήσουν να λύσουν μεγάλα προβλήματα και να δημιουργήσουν μακροπρόθεσμη αξία [80].

Για εταιρείες και οργανισμούς που χρησιμοποιούν ήδη IoT, τα ψηφιακά δίδυμα είναι το επόμενο βήμα στο ψηφιακό ταξίδι. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της

αποτελεσματικότητας, τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών, τον εντοπισμό προβλημάτων πριν εμφανιστούν και την καινοτομία για το μέλλον. Εάν ο οργανισμός σας ενδιαφέρεται να παράγει όχι μόνο καλύτερα επιχειρηματικά αποτελέσματα, αλλά και καλύτερα αποτελέσματα για όλους, αξίζει να εξερευνήσετε τα ψηφιακά δίδυμα [10].

### **3.8. Βιομηχανία 4.0 και ψηφιακά δίδυμα**

Η Βιομηχανία 4.0 χαρακτηρίζεται ως η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση και συχνά συνδέεται με την «έξυπνη κατασκευή». Αποκλίνει από τις άλλες βιομηχανικές επαναστάσεις επαναλαμβάνοντας τη χρήση ευφυών φυσικών συστημάτων στον κυβερνοχώρο (CPS), Industrial Internet of Things (IIoT), Big Data και άλλων τεχνολογιών προσανατολισμένων στο μέλλον σε ένα περιβάλλον παραγωγής [76]. Υποστηριζόμενο από καινοτόμες ψηφιακές τεχνολογίες, η Βιομηχανία 4.0 στοχεύει στην επίτευξη πλήρως ολοκληρωμένης, αυτοματοποιημένης, βελτιστοποιημένης και έξυπνης παραγωγής [9]. Κατά συνέπεια, η Βιομηχανία 4.0 επηρέασε τα επιχειρηματικά μοντέλα της μεταποιητικής βιομηχανίας όσον αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή και την παράδοση προϊόντων [35]. Οι μεταποιητικές βιομηχανίες χτίστηκαν με γνώμονα την εμπειρία του πελάτη, προσφέροντας υψηλά επίπεδα προσαρμογής για να συναντήσουν την εξατομίκευση [72].

Αυτό το επαναστατικό πλαίσιο της ολοκληρωμένης βιομηχανίας επέτρεψε την ιδέα του ψηφιακού διδύμου ως μέσο σύνδεσης των φυσικών στοιχείων στον όροφο του καταστήματος με τον ψηφιακό χώρο επιτρέποντας καινοτόμες υπηρεσίες ψηφιακών δεδομένων [43]. Με τη σύνδεση μεταξύ φυσικού και ψηφιακού είναι δυνατή η παρακολούθηση, συντήρηση και βελτιστοποίηση στις διαδικασίες παραγωγής [9]. Με τη χρήση τέτοιων τεχνολογιών, οι διαδικασίες παραγωγής θα πρέπει να βελτιωθούν, μειώνοντας τον αριθμό των πόρων που σπαταλώνονται και την περιττή εργασία στο οποίο ο τελικός πελάτης μπορεί να επιτύχει υψηλότερα επίπεδα ικανοποίησης [71]. Οι βιομηχανίες που υιοθέτησαν αυτές τις καινοτόμες τεχνολογίες άρχισαν να αναφέρονται ως έξυπνα εργοστάσια [24].



Οι μεταποιητικές βιομηχανίες έγιναν όλο και πιο ανταγωνιστικές ως αποτέλεσμα της εκθετικής αύξησης της παγκοσμιοποίησης [83]. Προκειμένου να παραμείνουμε σχετικοί σε αυτό το εξαιρετικά ανταγωνιστικό περιβάλλον βιομηχανικής παραγωγής, υπάρχει μια οικονομική ανάγκη για να παραμείνουμε ενημερωμένοι με τα σημερινά πρότυπα ψηφιακών αρχιτεκτονικών που βασίζονται σε δεδομένα για να παρέχουν μια ευέλικτη απόκριση και να επιτύχουν υψηλότερα επίπεδα παραγωγικότητας [14]. Με τη Βιομηχανία 4.0 είναι δυνατή η χρήση έξυπνων προϊόντων και συστημάτων για την απόκτηση ανταγωνιστικών πλεονεκτημάτων στην εξαιρετικά ανταγωνιστική βιομηχανική αγορά, με αυτή την έννοια, η έξυπνη κατασκευή έχει γίνει η κατεύθυνση των παγκόσμιων μεταποιητικών βιομηχανιών [55]. Σε αυτό το πλαίσιο ψηφιοποίησης, τα δεδομένα και οι πληροφορίες είναι οι θεμελιώδεις πτυχές αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών και ο οδηγός για νέες ευκαιρίες και συνεργασίες μεταξύ βιομηχανικών εταιρειών και παρόχων υπηρεσιών. Έτσι, όταν επιτρέπεται η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εταιρειών, είναι δυνατή η ανάπτυξη και εφαρμογή υπηρεσιών που βασίζονται σε ψηφιακά δεδομένα [84].

Σε ένα τόσο ανταγωνιστικό και απαιτητικό οικονομικό περιβάλλον, οι κατασκευαστικές εταιρείες αναγκάζονται να εξερευνήσουν νέες στρατηγικές βασισμένες σε δεδομένα ικανές να αξιοποιήσουν τις ικανότητες παρακολούθησης και λήψης αποφάσεων με φιλοδοξία να μειώσουν την καθυστέρηση για τον εντοπισμό προβλημάτων και την προώθηση δράσεων για συνεχή βελτίωση. Υπό αυτή την έννοια, είναι υποχρεωτική η σύνδεση του ψηφιακού με τον κατασκευαστικό κλάδο και η προώθηση νέων υπηρεσιών ψηφιακών δεδομένων που παρέχονται από εξωτερικές εταιρείες [64]. Αυτή η πραγματικότητα έχει προωθήσει την ιδέα Ψηφιακών διδύμων για να επιτρέψει τη φυσική-ψηφιακή σύνδεση και να παρέχει νέα μέσα αποθήκευσης, μοντελοποίησης, επεξεργασίας και κοινής χρήσης δεδομένων παραγωγής [87].

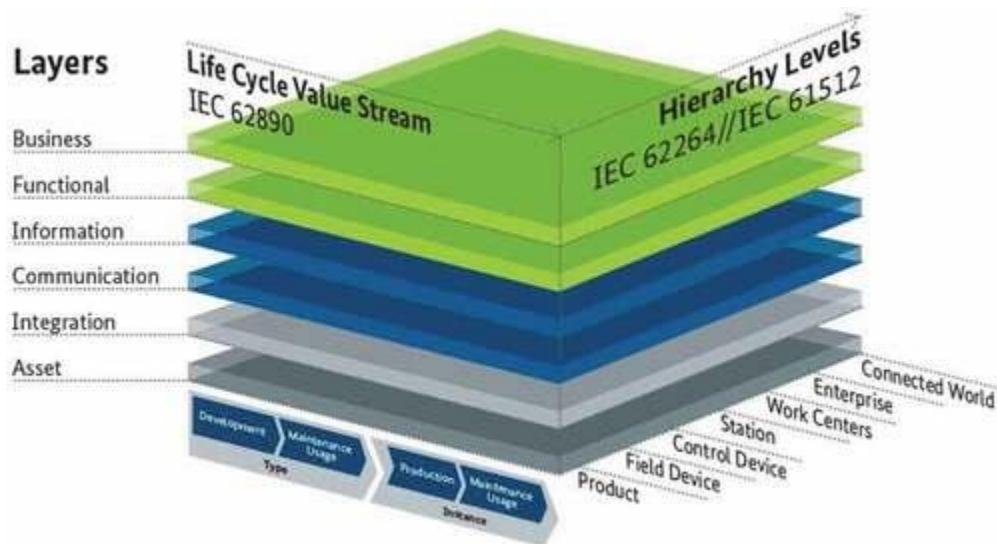
Ωστόσο, νέες προκλήσεις και ζητήματα που συνδέονται με το παράδειγμα της κυριαρχίας και της ιδιοκτησίας δεδομένων εγείρονται ως αποτέλεσμα αυτής της νέας ρύθμισης [88]. Αυτά τα ζητήματα τονίζουν την ανάπτυξη νέων εννοιών υλοποίησης που επιτρέπουν τόσο στους ιδιοκτήτες μηχανών/δεδομένων όσο και στους παρόχους υπηρεσιών δεδομένων να ορίζουν πρότυπα κατανόησης δεδομένων καθώς και ασφαλή πρωτόκολλα και κανάλια

επικοινωνίας δεδομένων. Παρέχοντας ταυτόχρονα μια σαφή αναπαράσταση της φυσικής μηχανής σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της [34].

### **3.9. Rami 4.0**

Επηρεασμένος από τη Βιομηχανία 4.0, οι μεταποιητικές βιομηχανίες έφεραν επανάσταση και παγκοσμιοποιήθηκαν, αυτό τόνισε την ανάπτυξη ενός μοντέλου αρχιτεκτονικής αναφοράς για τη βιομηχανία 4.0 (RAMI 4.0) για να διασφαλιστεί η τυποποίηση μεταξύ των επιχειρήσεων που χρησιμοποιούν I4.0 [38]. Το RAMI 4.0 είναι μια αρχιτεκτονική προσανατολισμένη στις υπηρεσίες που συνδυάζει τα θεμελιώδη στοιχεία και το IT της Βιομηχανίας 4.0 σε ένα δομημένο μοντέλο τριών διαστάσεων επιπέδου [24].

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1 , η RAMI 4.0 αποτελείται από τρεις άξονες, τον κύκλο ζωής του προϊόντος (1), τα επίπεδα ιεραρχίας στο εργοστάσιο (2) και την αρχιτεκτονική (3). Ο κύκλος ζωής του προϊόντος χωρίζεται σε τύπο και στιγμιότυπο. Ο τύπος αναφέρεται στο σχέδιο κατασκευής (δηλαδή λογισμικό ανάπτυξης, κατασκευής, συντήρησης...), που καλύπτει τον κύκλο ζωής του προϊόντος από την ιδέα του προϊόντος έως τη διαδικασία κατασκευής του [64].



**Εικόνα 7.** Μοντέλο αρχιτεκτονικής αναφοράς για τη βιομηχανία 4.0

Τα επίπεδα ιεραρχίας διαχωρίζονται σε μια προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω που αποτελείται από επτά διαφορετικά επίπεδα (προϊόν, συσκευή πεδίου, συσκευή ελέγχου, σταθμός, κέντρα εργασίας και επιχείρηση), καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει λειτουργίες εντός του εργοστασίου [88].

Στην αρχιτεκτονική, είναι δυνατό να αποσυντεθεί το έξυπνο εργοστάσιο σε έξι διαφορετικά επίπεδα περιουσιακού στοιχείου σε έξι επίπεδα, περιουσιακό στοιχείο (δηλ. φυσικό περιουσιακό στοιχείο), ενοποίηση (δηλ. μετατροπή στον ψηφιακό κόσμο), επικοινωνία (δηλ. διευκολύνει την επικοινωνία εντός στοιχείων), πληροφορίες (π.χ. δεδομένα), λειτουργικά (δηλ. λειτουργίες και εφαρμογές) και επιχειρηματική (δηλαδή οργάνωση και επιχειρηματική διαδικασία) [87].

Εντός του κατασκευαστικού πλαισίου της Βιομηχανίας 4.0, ο όρος Asset Administration Shell (AAS) αρχίζει να έχει τη συνάφειά του στον τεχνολογικό κόσμο. Το AAS στοχεύει να «επιτρέψει στους εταίρους σε δίκτυα δημιουργίας αξίας να ανταλλάσσουν ουσιαστικές πληροφορίες συμμορφούμενοι με ένα συγκεκριμένο σύνολο τυποποιημένων στοιχείων» [35]. Σύμφωνα με το [75], ένα «περιουσιακό στοιχείο» μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε οτιδήποτε απαιτεί κάποιο είδος «σύνδεσης» για μια λύση Βιομηχανίας 4.0 (π.χ. μηχανές και τα εξαρτήματά τους, συμβόλαια, παραγγελίες και υλικά προμήθειας). Επιπλέον, το

AAS θα είναι η ταυτότητα ενός περιουσιακού στοιχείου στην Βιομηχανία 4.0. Επιπλέον, θα είναι υπεύθυνο να παρέχει ελεγχόμενη πρόσβαση στις εν λόγω πληροφορίες και να παρέχει μια αναπαράσταση ολόκληρου του κύκλου ζωής του περιουσιακού στοιχείου. Επιπλέον, το AAS παρέχει μια τυποποίηση εντός της ψηφιοποιημένης βιομηχανικής παραγωγής όπου η μορφοποίηση των δεδομένων/πληροφοριών θα γίνεται σύμφωνα με ένα συγκεκριμένο σύνολο τυποποιημένων στοιχείων [46]. Ως εκ τούτου, θα αποτελείται από κοινά πρότυπα δομών επικοινωνίας, κανόνες για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, την προστασία δεδομένων και τη γλώσσα [90]. Αυτή η τυποποίηση καθιστά δυνατή την αναμφισβήτητη επικοινωνία όπου η ανταλλαγή των στοιχείων ενεργητικού μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή διασφαλίζοντας τυποποιημένη σημασιολογία μεταξύ όλων των συμμετεχόντων στις μεταβάσεις δεδομένων [84].

Προηγούμενη έρευνα αντιμετωπίζει την εφαρμογή της έννοιας AAS στη διαδικασία παραγωγής ως μέσο σύνδεσης του φυσικού περιουσιακού στοιχείου με τον αντίστοιχο ελεγκτή του. Το AAS είναι συμβατό με το OPC Unified Architecture και μπορεί να εφαρμοστεί ως μοντέλο πληροφοριών OPC UA [91].

### **3.10. Ψηφιακό δίδυμο**

Η χρήση των τεχνολογιών Βιομηχανίας 4.0, όπως τα Cyber-physical συστήματα, το Industrial Internet of Things, το Cloud computing και τα Big Data μετατοπίζουν τη μεταποιητική βιομηχανία προς μια έξυπνη βιομηχανία παραγωγής [33]. Υπό αυτή την έννοια, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εκληφθεί ως μια ευκαιρία βελτιστοποίησης της απόδοσης μιας διαδικασίας παραγωγής. Στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, η κατασκευή εξελίσσεται από κατασκευή βασισμένη στη γνώση σε έξυπνη κατασκευή, στην οποία το «έξυπνο» αναφέρεται στη χρήση τεχνολογιών που βασίζονται σε δεδομένα [92].

Σε αυτές τις τεχνολογίες προσανατολισμένες στις υπηρεσίες, τα δεδομένα και οι πληροφορίες μπορούν να γίνουν αντιληπτά ως το κοινό έδαφος και το βασικό στοιχείο [7]. Προκειμένου να αξιοποιηθούν οι ψηφιακές δυνατότητες του υπολογιστικού νέφους και της τεχνητής νοημοσύνης, είναι σημαντικό να συνδεθεί το ψηφιακό με τη φυσική

οντότητα [47]. Έτσι, απαιτείται η χρήση αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων (για τη φυσική οντότητα) σε πραγματικό χρόνο και μεταδίδεται μέσω IIoT (η επικοινωνία μεταξύ ψηφιακού και φυσικού) σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος [52].

Ως εκ τούτου, το ψηφιακό δίδυμο έχει εγγενή αξία στα στάδια λειτουργίας, αλλά δεν περιορίζεται σε αυτά. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ της φάσης σχεδιασμού ενός εξοπλισμού και του αντίστοιχου σταδίου λειτουργίας του [36]. Έτσι, ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διευκόλυνση και την επικύρωση του σχεδιασμού διαφορετικών προϊόντων και συστημάτων με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους και του χρόνου παράδοσης βελτιώνοντας παράλληλα το συνολικό στάδιο σχεδιασμού μέσω της πιστοποίησης ότι το μελλοντικό προϊόν είναι εντός των απαιτήσεων και των προσδοκιών [21].

Όταν πρόκειται για τη διαδικασία παραγωγής, παρουσιάζει μια επαναδιαμορφώσιμη προσέγγιση μοντελοποίησης για ψηφιακά δίδυμα που μειώνει τις προσπάθειες (κόστος και χρόνο) των σταδίων ανάπτυξης του ψηφιακού διδύμου ενώ επαληθεύει επίσης την απόδοση του συστήματος του μελλοντικού ψηφιακού διδύμου [12].

Το ψηφιακό δίδυμο είναι ένα πεδίο υψηλής έρευνας που έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλή πυκνότητα στιγμιότυπων ψηφιακού διδύμου. Αυτή η εργασία θα ασχοληθεί με τέσσερα διαφορετικά στάδια ωριμότητας και ακολουθεί τους ορισμούς που παρουσιάζονται από το [8] και [93].

Το ψηφιακό μοντέλο είναι η ψηφιακή αναπαράσταση (μοντέλο) μιας ανύπαρκτης φυσικής οντότητας, που σημαίνει ότι η ψηφιακή οντότητα θα είναι η προβολή μιας μελλοντικής φυσικής οντότητας [21]. Αυτό σημαίνει ότι στη φάση DM δεν υπάρχει επικοινωνία μεταξύ της φυσικής και της ψηφιακής οντότητας και όλες οι διαδικασίες και η ολοκλήρωση θα εξομοιωθούν [46].

Το Digital Shadow διαφέρει από το ψηφιακό δίδυμο με την έννοια ότι δεν υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία. Στο DS τα δεδομένα θα ρέουν αυτόματα από τη φυσική οντότητα στην ψηφιακή αλλά χειροκίνητα από την ψηφιακή οντότητα στη φυσική [91].

Το ψηφιακό δίδυμο σχηματίζεται από τρεις περιπτώσεις, την ψηφιακή οντότητα (1), τη φυσική οντότητα (2) και την επικοινωνία μεταξύ των δύο οντοτήτων (3) [53]. Η ψηφιακή

οντότητα είναι η αναπαράσταση της φυσικής οντότητας σε ένα ψηφιακό περιβάλλον και είναι σε θέση να παρακολουθεί, να μιμείται και να ελέγχει τη συμπεριφορά της φυσικής. Στο ψηφιακό δίδυμο, τα δεδομένα θα ρέουν συνεχώς, αμφίδρομα και σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των οντοτήτων [95].

Το ψηφιακό δίδυμο Predictive είναι ένα ψηφιακό δίδυμο που αξιοποιεί τις δυνατότητες στον κυβερνοχώρο για περαιτέρω ανάλυση για προβλέψεις [53]. Αποτελείται από ένα ψηφιακό αντίγραφο (που υπάρχει στον κυβερνοχώρο) ενός φυσικού αντικειμένου, ενώ η επικοινωνία πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο και αμφίδρομα [7].

### **3.11. Διεθνείς χώροι δεδομένων**

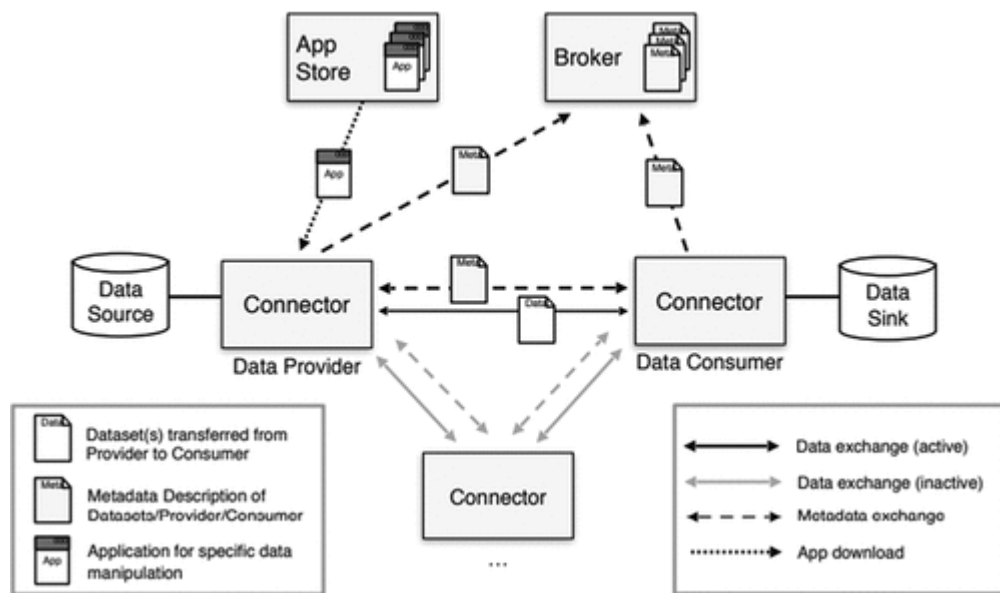
Με την πρόσφατη πρόοδο στην τεχνολογία, οι έξυπνες συσκευές γίνονται όλο και πιο κοινές και απαραίτητες για να παραμείνουν ανταγωνιστικές στην εξαιρετικά ανταγωνιστική βιομηχανική αγορά. Ως εκ τούτου, ένας βασικός πόρος των έξυπνων συσκευών είναι τα δεδομένα. Προς το παρόν, τα περισσότερα δεδομένα προστατεύονται ιδιαίτερα και δεν μοιράζονται εύκολα με τρίτους. Ωστόσο, οι επιχειρήσεις μπορούν να κερδίσουν από τις ανταλλαγές δεδομένων. Επομένως, υπάρχει ανάγκη να δημιουργηθεί υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα το απόρρητο των δεδομένων στις συναλλαγές δεδομένων [96].

Το International Data Spaces (IDS), παλαιότερα γνωστό ως Industrial Data Spaces, ξεκίνησε το 2015 με ένα έργο Fraunhofer. Έκτοτε οι Σύλλογοι IDS (IDSA) ανέπτυξε περαιτέρω την έννοια που προτάθηκε από τον Fraunhofer με την πρόταση του IDS Reference Architecture Model (IDS-RAM) [79]. Το IDS ορίζεται στο γλωσσάρι IDS-RAM ως ένα «Διανεμημένο δίκτυο τελικών σημείων δεδομένων (δηλ. στιγμιότυπα του International Data Spaces Connector), που επιτρέπει την ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων και εγγυάται την κυριαρχία των δεδομένων» [79].

Ως εκ τούτου, η πρωτοβουλία IDS έχει ως στόχο να δημιουργήσει έναν ασφαλή χώρο δεδομένων στον οποίο οι επιχειρήσεις του κλάδου μπορούν να μοιράζονται με ασφάλεια τα στοιχεία του ενεργητικού τους σε μια διαφορετική επιχείρηση εντός του

οικοσυστήματος IDS. Ενώ οι χώροι δεδομένων αντιπροσωπεύουν μια έννοια κοινής χρήσης δεδομένων που δεν απαιτεί κεντρική αποθήκευση, τα δεδομένα παραμένουν στην πηγή και ανταλλάσσονται μόνο όταν χρειάζεται [90].

Για να επιτευχθεί αυτό, το Σχήμα 2 απεικονίζει ορισμένα από τα στοιχεία IDS καθώς και τις αλληλεπιδράσεις τους μεταξύ τους. Ο σύνδεσμος είναι ένα στοιχείο λογισμικού και χρησιμοποιείται ως μεσάζων μεταξύ συσκευών IoT και χώρων δεδομένων [31]. Η χρήση αυτού του στοιχείου διασφαλίζει ότι η κυριαρχία των δεδομένων διατηρείται στις ανταλλαγές δεδομένων [39]. Μια έρευνα αγοράς σχετικά με τις συνδέσεις ανοιχτού κώδικα διενεργήθηκε τη στιγμή της συγγραφής αυτής της έκθεσης και οι κύριες διαθέσιμες επιλογές είναι οι εξής: Eclipse Dataspace Connector, Σύνδεση χώρου δεδομένων, και Σύνδεση πραγματικού χρόνου.



**Εικόνα 8.** Αλληλεπιδράσεις στοιχείων IDS σύμφωνα με την IDS-RAM

Το IDS επιτρέπει τη δημιουργία μιας ασφαλούς σύνδεσης μεταξύ των εφαρμογών σύνδεσης IDS στις οποίες τα δεδομένα μοιράζονται με ασφάλεια και μπορούν να προσπελαστούν μόνο σύμφωνα με τους όρους που ορίζονται από τους συμμετέχοντες (συνήθως ο κάτοχος δεδομένων και ο καταναλωτής δεδομένων), διασφαλίζοντας την κυριαρχία των δεδομένων για τον κάτοχο δεδομένων [61]. Επομένως, με το IDS, η

εφαρμογή έξυπνων συσκευών μπορεί να γίνει με ασφαλή τρόπο, επιτρέποντας τη δημιουργία καινοτόμων επιχειρηματικών διαδικασιών [31].

### **3.12. Ψηφιακό δίδυμο που βασίζεται σε AAS: σχετική εργασία**

Η Industrial Digital Twin Association (IDTA), που υποστηρίζεται από το Ομοσπονδιακό Υπουργείο Οικονομικών Υποθέσεων και Δράσης για το Κλίμα της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας, είναι μια κοινότητα ανοιχτού κώδικα που αντιλαμβάνεται το Κέλυφος Διαχείρισης Περιουσιακών Στοιχείων ως το θεμελιώδες στοιχείο του ψηφιακού διδύμου [91].

Ακολουθώντας την ιδέα που προτείνει η IDTA, το [83] παρουσιάζει το Fraunhofer Advanced Asset Administration Shell Tools (FAAAS) μια υπηρεσία δημιουργίας και διαχείρισης ψηφιακών διδύμων σύμφωνα με τα πρότυπα AAS.

Σε ομοιότητα, το [97] παρουσίασε τις εξελίξεις σε ένα ψηφιακό δίδυμο συμβατό με AAS. Η έρευνά τους αναφέρει επίσης τη σημασία των ασφαλών και αξιόπιστων συναλλαγών δεδομένων μεταξύ των εταιρειών. Ως εκ τούτου, το [98] προτείνει τη χρήση του Gaia-X υποδοχές για υποστήριξη υπηρεσιών I4.0.

Η ιδέα μας για το ψηφιακό δίδυμο του μέλλοντος ακολουθεί τη γραμμή εργασίας που υποστηρίζεται τόσο από το [51] όσο και από το [54] ωστόσο, αντιλαμβανόμαστε το ψηφιακό δίδυμο ως μια σπονδυλωτή, επεκτάσιμη και κατανεμημένη προσέγγιση. Τα ψηφιακά δίδυμα σύνθετων συστημάτων μπορούν να θεωρηθούν ως η συνάθροιση του AAS και των στοιχείων ή στοιχείων του (μηχανές, ρομπότ, AGV). Αυτό το AAS αντικατοπτρίζει την κατάσταση κάθε περιουσιακού στοιχείου σε πραγματικό χρόνο και με τυπικό τρόπο [99].



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Σχεδιασμός και ανάπτυξη Προϊόντων στην βιομηχανία των Ψηφιακών διδύμων.

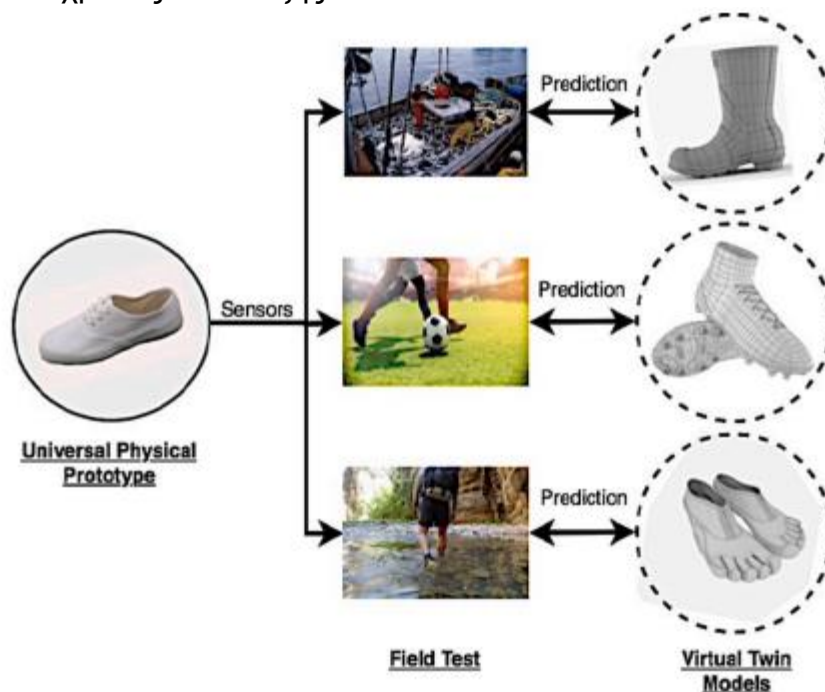
Σε αυτήν την ενότητα, θα αναφερθούν οι δυνατότητες εφαρμογής των Ψηφιακών διδύμων αλλά και οι προκλήσεις που συναντιούνται στην υλοποίηση της διαδικασίας αυτής.

#### 4.1 Δυνατότητες των Ψηφιακών διδύμων στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων

Η παραδοσιακή διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων είναι χρονοβόρα και περιλαμβάνει διάφορες διαδικασίες, όπως την αγορά, την έρευνα, την επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων μερών αλλά και τις δοκιμές του.[100]

Με τον παραδοσιακό αυτόν τρόπο παραγωγής προϊόντων, η ανάπτυξη του προϊόντος είναι υπό την καθοδήγηση του σχεδιαστή ή του μηχανικού αφού τα σχέδια είναι βασισμένα στην εμπειρία και τις γνώσεις τους. Στη συνέχεια, είναι χρονοβόρα η προετοιμασία του φυσικού πρωτοτύπου και η διενέργεια δοκιμών. Εάν οι δοκιμές αποτύχουν, ο σχεδιασμός θα τροποποιηθεί με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων και θα γίνει εκ νέου κατασκευή του πρωτοτύπου και δοκιμή του ξανά. Οι διαδικασίες επαλήθευσης και τροποποίησης μπορεί να επαναλαμβάνονται για αρκετούς γύρους με αποτέλεσμα όλο αυτό να είναι πολύ χρονοβόρο. Η χρήση των Ψηφιακών διδύμων για την υποβοήθηση της δημιουργίας προϊόντων μπορεί να συντομεύσει τον χρόνο σχεδίασης με εικονικά πρωτότυπα, χρησιμοποιώντας προσομοίωση για την αντικατάσταση των φυσικών δοκιμών και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων σχεδιασμού [101,102]. Τα Ψηφιακά δίδυμα μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην προετοιμασία της λειτουργίας ρύθμισης και να σχεδιάσουν τη διαδικασία παραγωγής έτσι ώστε να μπορεί να μειωθεί ο χρόνος παράδοσης της παραγωγής. Ακόμα, η ανάπτυξη ενός προϊόντος με ψηφιακά δίδυμα στο στάδιο του εννοιολογικού σχεδιασμού μπορεί μεγιστοποιήσει το σχεδιασμό του προϊόντος και τον συνολικό κύκλο ζωής του. Το καθολικό φυσικό πρωτότυπο (universal physical prototype, UPP) μπορεί να αναπτυχθεί σύμφωνα με την εννοιολογική ιδέα και να συνδεθεί με αυτήν το εικονικό μοντέλο για τη δημιουργία του αρχικού προϊόντος ψηφιακού διδύμου. Το UPP θα πρέπει να είναι

αχαρακτήριστο και να μην έχει σχεδιαστικές προτιμήσεις. Θα χρησιμοποιηθούν τα γενικά υλικά και ανταλλακτικά. Μπορεί να είναι παραμετρική μοντελοποίηση που χρησιμοποιεί αριθμητικές τιμές όπως διαστάσεις, εξισώσεις και τις σχέσεις τους για τον έλεγχο της γεωμετρίας. Στη συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να γίνουν δοκιμές του προϊόντος, δοκιμές πεδίου και προσομοίωση, ανάλογα με τις απαιτήσεις. Ο σχεδιασμός θα τροποποιηθεί αυτόματα χρησιμοποιώντας AI και μηχανική μάθηση με βάση την ανάλυση αποτελεσμάτων. Αυτό μπορεί να εξαλείψει τις επαναλαμβανόμενες διαδικασίες επαλήθευσης και τροποποίησης και ολόκληρος ο κύκλος σχεδίασης του προϊόντος μπορεί να απλοποιηθεί και να συντομευτεί ο χρόνος ανάπτυξης του.



**Εικόνα 9.** Παράδειγμα δημιουργίας σχεδιασμού φυσικού πρότυπου (UPP) με ψηφιακά δίδυμα

Η εικόνα δείχνει ένα παράδειγμα ότι το UPP και το εικονικό αντίγραφο του μπορούν να αναπτυχθούν και να συνδεθούν ως ψηφιακό δίδυμο. Στη συνέχεια, το πρωτότυπο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δοκιμή του προϊόντος με βάση τις απαιτήσεις του. Τα αποτελέσματα μπορούν να αναλυθούν αυτόματα για να υποδειχθούν αλλαγές στις παραμέτρους του UPP. Το εικονικό μοντέλο μπορεί να τροποποιηθεί και δημιουργηθεί ένα νέο σχέδιο με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών[103]. Στο στάδιο της δημιουργίας του ψηφιακού δίδυμου, το προϊόν, δεν είναι ικανό αυτόνομα να δημιουργήσει νέο σχέδιο, αλλά είναι χρήσιμο στο να βοηθήσει με τις πληροφορίες που παρέχει στον επανασχεδιασμό και στην διαδικασία βελτίωσης. Επίσης, ένα ψηφιακό δίδυμο που αναπτύχθηκε σε ένα

υπάρχον προϊόν μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτίωση της και τον σχεδιασμό ενός προϊόντος επόμενης γενιάς [104]. Επομένως, ο σχεδιασμός της οικογένειας προϊόντων με γνώμονα τα ψηφιακά δίδυμα μπορεί να μελετηθεί περαιτέρω στο μέλλον. Το προϊόν ψηφιακού δίδυμου μπορεί να μετρήσει και να καταγράψει διάφορες πληροφορίες (π.χ. ανατροφοδότηση παραγωγής, εμπειρία χρήστη και δεδομένα πεδίου) κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος. Σε σχέση με τους εσωτερικούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των προδιαγραφών του προϊόντος, της ενημέρωσης των γνώσεων μηχανικής, των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, δοκιμών και διαφορετικών κανονισμών, η βάση δεδομένων θα καταγράψει ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα δεδομένα για να υποστηριχτεί η δημιουργία σχεδιασμού με σκοπό την αποτελεσματικότερη και ακριβέστερη λήψη αποφάσεων. Έτσι, τα προϊόντα του κλάδου αυτού, θα γίνονται όλο και περισσότερο φιλικά προς την παραγωγή, προς το χρήστη και προς το περιβάλλον, ακολουθώντας την εξέλιξη της οικογένειας προϊόντων δίδυμων παραγωγής. Τέλος, η διάρκεια ζωής των προϊόντων νέας γενιάς μπορεί να επεκταθεί λόγω της βελτίωσης της απόδοσης και εξέλιξης αυτών, προσφέροντας έτσι την περαιτέρω ικανοποίηση των πελατών.

## **4.2 Στάδια σχεδιασμού και ανάπτυξης προϊόντων με βάση τα ψηφιακά δίδυμα**

Σε αυτή την ενότητα, περιλαμβάνονται οι βιομηχανικές εφαρμογές των ψηφιακών δίδυμων στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων.

Στην ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος, υπάρχουν πολλά ζωτικά στάδια όπως η έρευνα μάρκετινγκ, ο εννοιολογικός σχεδιασμός και η επαλήθευση σχεδίου [105].

Παρακάτω θα αναλυθεί ο εννοιολογικός σχεδιασμός, η λεπτομερής σχεδίαση, η επαλήθευση σχεδιασμού και ο επανασχεδιασμός.

### **4.2.1 Εννοιολογικός Σχεδιασμός**

Ο εννοιολογικός σχεδιασμός είναι το πρώτο αλλά και το πιο κρίσιμο βήμα της διαδικασίας σχεδιασμού ενός προϊόντος. [106]

Για να δημιουργηθεί μια καλή σχεδιαστική ιδέα, ο σχεδιαστής θα πρέπει να λάβει υπόψη έναν μεγάλο αριθμό δεδομένων, πληροφοριών και να έχει γνώση από την αγορά, τον πελάτη και την κατασκευή. Ο Ταο (2018.) πρότεινε ένα μοντέλο σχεδίασης προϊόντος με βάση τα ψηφιακά δίδυμα με μεγάλα δεδομένα και χρησιμοποίησε ένα

ποδήλατο για μελέτη περίπτωσης. Οι φυσικοί παράγοντες ( όπως ο ορισμός λειτουργίας, ο αισθητικός σχεδιασμός, ο ανταγωνισμός αγοράς και η επενδυτική στρατηγική) και οι εικονικοί παράγοντες (όπως το κτίριο μοντέλου, τα ιστορικά δεδομένα, οι κριτικές και τα σχόλια των πελατών) παρείχαν μια ποικιλία από τα δεδομένα των ψηφιακών διδύμων για τη δημιουργία της ιδέας και βελτίωσαν την επικοινωνία μεταξύ πελάτη και σχεδιαστών. [107]

Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της εικονικοποίησης της σχεδίασης. Ο Ma (2019) πρότεινε μια ανθρώπινη μηχανή ενισχυμένη με ψηφιακά δίδυμα με πλαίσιο αλληλεπίδρασης στον κύκλο ζωής του προϊόντος. Από αυτή την έρευνα, παρατήρησε την αλληλεπίδραση μεταξύ σχεδιαστή και προϊόντος στο στάδιο του εννοιολογικού σχεδιασμού. Στον προσομοιωμένο κόσμο, οι σχεδιαστές μπορούν να «βλέπουν», να «Αγγίζουν» ή να «χρησιμοποιούν» το εικονικό μοντέλο με τεχνολογίες AR/VR. [108]

#### **4.2.2 Λεπτομερής σχεδιασμός**

Στη φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού, υπάρχουν πολλοί παράγοντες όπως το προϊόν, η λειτουργία, η απόδοση, οι ιδιότητες υλικού και η διαδικασία κατασκευής. [109]

Οι σχεδιαστές πρέπει να αναθεωρήσουν πολλές πληροφορίες και δεδομένα για τη λήψη ακριβών αποφάσεων. Ο Cheng (2020) πρότεινε μια προσέγγιση βιομηχανικού διαδικτύου ενισχυμένη με βάση τα ψηφιακά δίδυμα που περιείχε έναν μηχανισμό υλοποίησης ώστε να μπορεί να συλλέγει η πλατφόρμα DT-II διαφορετικούς παράγοντες (π.χ. απαίτηση αγοράς, κριτική χρήστη κ.λπ.) για την βελτίωση του σχεδίου προϊόντος. [110]

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας για την σχεδίαση προϊόντων είναι ο προσανατολισμός ενασχόλησης του χρήστη. Να αναπτυχθεί ένα ψηφιακό δίδυμο για δοκιμή και συλλογή σχετικών δεδομένων σχεδιασμού, το φυσικό πρωτότυπο ή το μοντέλο αναφοράς που θα πρέπει να κατασκευαστούν. Ο Arrichiello και ο Gualeni (2020) μελετούσαν για μια ολόκληρη κρουαζιέρα με το μοντέλο των ψηφιακών διδύμων τον κύκλο ζωής των πλοίων. [111]

Το μοντέλο μπορεί να κατασκευαστεί με βάση πολλά πλοία ίδιας τυπολογίας, που χαρακτηρίζονται λίγο πολύ από τα ίδια χαρακτηριστικά, για την πρόβλεψη μελλοντικής συμπεριφοράς και απόδοσης. Επίσης μπορεί να διακρίνει τη διαφορά μεταξύ του εννοιολογικού μοντέλου και της εικονικής αναπαράστασης των ψηφιακών διδύμων και να εφαρμοστεί στη διαχείριση γεωμετρικών παραλλαγών. [112]

### **4.2.3 Επαλήθευση σχεδιασμού**

Οι σχεδιαστές έχουν καταβάλει απίστευτη προσπάθεια να προβλέψουν και να αποφύγουν τις αποτυχίες ενός προϊόντος όσο το δυνατόν νωρίτερα. Οι Detzner και ο Eigner (2018) πρότειναν μια προσέγγιση χρησιμοποιώντας ψηφιακά δίδυμα για την παρακολούθηση της ποιότητας των προϊόντων και τον εντοπισμό των βασικών αιτιών που μπορεί να δημιουργήσουν πρόβλημα.[113]

Η επαλήθευση σχεδίασης έχει επικεντρωθεί στην χρήση των ψηφιακών διδύμων στο σχεδιασμό προϊόντων για δοκιμές και εικονικά πρωτότυπα. Ο Groen (2018) πρότεινε ένα νέο μοντέλο ευέλικτου υλικού (FlexMM) για την επίδειξη της αλλαγής του σχήματος του προϊόντος από την εσωτερική πίεση. Σε αυτή την έρευνα, το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ακρίβειας της διαδικασίας και τις αλλαγές σχήματος στο στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος. Η προσομοίωση αυτή μπορεί να εκτοξευθεί στον εικονικό χώρο για να αντικαταστήσει τη χρονοβόρα διαδικασία επαλήθευσης.[114]

Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ψηφιακό πρωτότυπο για την επαλήθευση ενός προϊόντος που μπορεί να βελτιώσει την οπτικοποίηση και τη σχεδιαστική συνεργασία διαφορετικών κομματιών. [115]

Ακόμα, μέσω του μοντέλου των ψηφιακών διδύμων, οι σχεδιαστές μπορούν να επιλέξουν τα εξαρτήματα του προϊόντος, όπως τους τύπους ή τον αριθμό των LED κατά τη διάρκεια του πρωτοτύπου σχεδίου και του σταδίου ανάπτυξης.

### **4.2.4 Επανασχεδιασμός**

Τα ψηφιακά δίδυμα αυτή τη στιγμή δεν είναι μόνο μια καλή ευκαιρία για τη δημιουργία νέων ιδεών, αλλά παρέχουν επίσης πολύτιμες πληροφορίες για τη βελτίωση του προϊόντος και τον επανασχεδιασμό του. Ο Zheng και ο Sivabalan (2020) πρότειναν ένα τριπλό μοντέλο προσέγγισης (δηλαδή ψηφιακό μοντέλο, υπολογιστικό μοντέλο και το μοντέλο που είναι βασισμένο στο γράφημα) για την ανάπτυξη των ψηφιακών διδύμων σε επίπεδο προϊόντος .

Σε αυτή την έρευνα, το ψηφιακό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση εμπειριών του πραγματικού κόσμου. Ενώ, το υπολογιστικό μοντέλο παρέχει τις αριθμητικές τιμές σχετικά με την κατάσταση του συστήματος με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο. Το μοντέλο που είναι βασισμένο στο γράφημα μπορεί να ορίσει την αλληλεπίδραση μεταξύ του περιβάλλοντος και του συστήματος. Τα δεδομένα που παρέχονται από αυτά τα μοντέλα μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού στο προϊόν επόμενης γενιάς .[116]

Ο Ταο (2018) πρότεινε ένα πλαίσιο σχεδίασης προϊόντων με γνώμονα τα ψηφιακά δίδυμα για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας του επανασχεδιασμού του υπάρχοντος προϊόντος. Σε αυτό το πλαίσιο, ο εικονικός χώρος θα συλλέγει, θα αναλύει και θα συσσωρεύει συνεχώς τα δεδομένα από το φυσικό χώρο. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να εφαρμοστούν για το σχεδιασμό ή τον επανασχεδιασμό του προϊόντος έτσι ώστε οι διαδικασίες να μπορούν να βελτιωθούν.[117]

### **4.3. Προκλήσεις των ψηφιακών διδύμων στον σχεδιασμό & ανάπτυξη προϊόντων.**

Τα βασικά στοιχεία του ψηφιακού διδύμου είναι το φυσικό προϊόν, το ψηφιακό μοντέλο και η σύνδεση μεταξύ φυσικού και εικονικού κόσμου[118]. Στο πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος (δηλαδή του εννοιολογικού σχεδιασμού και παραγωγή ιδεών), το ψηφιακό δίδυμο δεν είναι εφαρμόσιμο στην διαδικασία, διότι δεν υπάρχουν φυσικά πρωτότυπα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συλλέξουν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (π.χ. εμπειρία χρήστη, επιπτώσεις στην περιβαλλοντική αλλαγή κ.λπ.). Στην τρέχουσα εφαρμογή, το ψηφιακό δίδυμο αναπτύσσεται στο είδη υπάρχον προϊόν που δημιουργείται και παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τα παρών χαρακτηριστικά αλλά και συμβάλει στην δημιουργία εικόνας για τα προϊόντα επόμενης γενιάς [119]. Επομένως, η χρήση του ψηφιακού διδύμου για την υποβοήθηση και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής ιδεών είναι μια σημαντική πρόκληση.

Καθοριστικό ρόλο στα ψηφιακά δίδυμα παίζουν οι αισθητήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την συλλογή και αποτύπωση δεδομένων από τον φυσικό στον ψηφιακό κόσμο, όπου παράγεται το ψηφιακό μοντέλο με σκοπό την προσομοίωση και ανάλυση του. Ως εκ τούτου, η ακρίβεια των αισθητήρων επηρεάζει άμεσα τις επιδόσεις του προϊόντος (δηλαδή τα αποτελέσματα προσομοίωσης, τις λήψεις αποφάσεων και πρόβλεψης) καθώς υπάρχουν πολλές μεταβλητές όπως περιβαλλοντικοί παράγοντες, εγκατάσταση αισθητήρων, φυσική μετατόπιση, αποτελέσματα των μετρήσεων κ.α.[120]. Επομένως, ο μηχανικός πρέπει να έχει αποτελεσματική κρίση και γνώσεις, ώστε να εξετάζει προσεκτικά την χρήση και τον τύπο των αισθητήρων από το πρώιμο στάδιο της διαδικασίας με σκοπό την σωστή συλλογή δεδομένων. Λάθος δεδομένα θα μπορούσαν να επηρεάσουν πληροφορίες όπως τα μεγέθη και το σχήμα του προϊόντος ή αυξημένο-μειωμένο βάρος και όγκο του προϊόντος. Από την άλλη όμως, η χρήση πρόσθετων αισθητήρων για την επίτευξη του ακριβούς ψηφιακού διδύμου θα αυξήσει το κόστος για την παραγωγή του προϊόντος. Συμπαιρύνοντας τα παραπάνω, μία ακόμα απαιτήτικη πρόκληση των ψηφιακών διδύμων είναι η εύρεση του σωστά καταρισμένου μηχανικού, χρησιμοποιώντας τον ανάλογο εξοπλισμό, όπου θα επιλέξει η εκάστωτε εταιρία με σκοπό να λάβει μια ισορροπία όσον αφορά την εμφάνιση του προϊόντος, το κόστος και την απόδοση του ψηφιακού διδύμου σε συνάρτηση με την ικανοποίηση του χρήστη στο στάδιο του σχεδιασμού και της ανάπτυξης.

Ένας ακόμα σημαντικός πυλώνας της χρήσης των ψηφιακών διδύμων είναι τα δεδομένα [121]. Τα δεδομένα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο ψηφιακό δίδυμο και στο

στάδιο του σχεδιασμού προϊόντων καθώς υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων και πραγματοποιούν ακριβή ανάλυση.

Το να εφαρμόζεται και να καταγράφεται το ψηφιακό δίδυμο, από την αρχή του κύκλου ζωής του προϊόντος, μπορεί να ωφελήσει τα στάδια της ζωής του σε μεγάλο βαθμό (όπως παραγωγή, συντήρηση και ανακύκλωση) [122] αλλά και τα δεδομένα μέτρησης του (όπως δεδομένα κατασκευής, εμπειρία χρήσης και γνωρίζοντας την κατάσταση του προϊόντος σε πραγματικό χρόνο) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση του προϊόντος αλλά και να παρέχονται προτάσεις για τα μοντέλα της επόμενης γενιάς. Ωστόσο, οι εξωτερικοί συνεργάτες (π.χ. κατασκευαστές, εγκαταστάτες, κυβέρνηση και χρήστες) ενδέχεται να απαγορεύσουν την καταγραφή και μέτρηση των προσωπικών τους πληροφοριών και δεδομένων. Ορισμένες χώρες δεν επιτρέπουν στις εταιρείες να μετρούν και να αναλύουν δραστηριότητες και συμπεριφορές των πολιτών τους λόγω της εθνικής ασφάλειας τους. Συμπαιρύνοντας η συλλογή δεδομένων των ψηφιακών διδύμων με σκοπό την ενίσχυση της εννοιολογικής ιδέας αλλά και δημιουργίας υποβοηθητικού σχεδιασμού λεπτομέρειας (π.χ. επιλογή υλικού και σχεδιασμός για συναρμολόγηση) είναι επωφελής για τις εταιρείες σχεδιασμού. Ωστόσο, πρέπει να βρεθεί λύση στο πρόβλημα απορρήτου δεδομένων συνάπτοντας συμφωνίες για τη χρήση των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών ομίλων και εταιριών.

#### **4.4. Η δόμηση των ψηφιακών διδύμων για τον σχεδιασμό προϊόντων.**

Τα δίδυμα παραγωγής αποτελούνται από τρία βασικά στοιχεία : τις φυσικές οντότητες, τα εικονικά αντίγραφα και τη σύνδεση αυτών.[123]

Εκτός από αυτά τα στοιχεία, το περιβάλλον προσομοίωσης και τα δεδομένα θα πρέπει επίσης να λειφθούν υπόψη στο ψηφιακό δίδυμο για την ανάπτυξη και τον σχεδιασμό του. Καθώς σχετίζεται με άλλες τεχνολογίες, όπως το Big Data Analytics, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν με την βοήθεια αυτών να βελτιστοποιήσουν αποτελεσματικά την πλήρη διαδικασία σχεδιασμού και ανάπτυξης του προϊόντος. Στην φάση του εννοιολογικού σχεδιασμού, το ψηφιακό δίδυμο είναι σε θέση να συνεργαστεί με αναδυόμενες τεχνολογίες δεδομένων. Δηλαδή η εξόρυξη δεδομένων , παρέχει μάζα χρήσιμων πληροφοριών (π.χ. σχόλια πελατών, απόδοση υπάρχοντος προϊόντος, προσδοκίες πελατών κ.λπ. . Χρησιμοποιώντας τα ψηφιακά δίδυμα, η ιδέα μπορεί να οπτικοποιηθεί μέσω εικονικής πραγματικότητας (VR) και επαυξημένης πραγματικότητας (AR). Σχεδιαστές και άλλα μέρη (π.χ. πελάτης, κατασκευαστής, μηχανικός κ.λπ.) μπορούν να αξιολογήσουν αποτελεσματικότερα τον εννοιολογικό σχεδιασμό και να ανταλλάξουν τα δεδομένα τους. Στη φάση του λεπτομερούς σχεδιασμού, ο σχεδιασμός μπορεί να είναι εμπλουτισμένος με βάση τα δεδομένα του παρελθόντος του προϊόντος (δηλαδή κατασκευής αποτυχίας, ανατροφοδότησης των χρηστών και διαδικασίες ανακύκλωσης. Τα δεδομένα και τα αποτελέσματα αυτών, είναι δυνατό να αναλυθούν χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη (AI) [124].

Το πρωτότυπο του προϊόντος μπορεί να παραχθεί με τρισδιάστατη εκτύπωση και να συναρμολογηθεί με την βοήθεια αισθητήρων για την καταγραφή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τη δοκιμή πεδίου [125]

Ο σχεδιασμός μπορεί επίσης να επαληθευτεί σε πραγματικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας τεχνολογία VR/AR που μπορεί να παρέχει μια σαφέστερη εικόνα της πραγματικής κατάστασης του προϊόντος για τους σχεδιαστές και τους πελάτες [126].

Στη φάση του επανασχεδιασμού, το υπάρχον ή το προηγούμενο προϊόν μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη βελτίωση του νέου προϊόντος και επανασχεδιασμό αυτού. Τα μαζικά δεδομένα από τον ολόκληρο κύκλο ζωής του προϊόντος μπορούν να αναλύονται συνεχώς σε πραγματικό χρόνο από τις αναδυόμενες τεχνολογίες υπολογιστών. Στη συνέχεια, αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν αυτόματα στην αλλαγή σχεδιασμού, και να βοηθήσουν τους σχεδιαστές να πάρουν τη σωστή απόφαση. Τα κύρια συστατικά του προϊόντος ψηφιακού διδύμου συνοψίζονται όπως ακολουθεί.

#### **4.4.1. Οι φυσικές οντότητες.**

Στο πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης του προϊόντος, δεν υπάρχει πραγματικό προϊόν, ούτε πρωτότυπο, διαθέσιμο για κατασκευή του προϊόντος ψηφιακού διδύμου. Έτσι, τα υπάρχοντα προϊόντα (π.χ. είτε οικογενειακά προϊόντα είτε ανταγωνιστικά εταιριών) με παρόμοια τυπολογία και παρόμοια χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνται ως το αρχικό φυσικό μοντέλο του ψηφιακού διδύμου για δοκιμή και δημιουργία ιδεών σχεδιασμού [127]. Όταν το σχέδιο είναι πλέον συνδεδεμένο μεταξύ του, η νέα φυσική μακέτα μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας τεχνολογίες ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων (π.χ. τρισδιάστατη εκτύπωση) και ύστερα να γίνει αξιολόγηση της απόδοσης του σχεδιασμού. Κατά την προετοιμασία του πρωτοτύπου, ο σχεδιαστής θα πρέπει να εξετάσει τη διάταξη και την εγκατάσταση του αισθητήρα που θα καθορίζουν το αποτέλεσμα της δοκιμής και την ακρίβεια των δεδομένων [128]. Για το τελικό προϊόν, οι σχεδιαστές θα πρέπει να εξετάσουν την επιλογή του αισθητήρα (π.χ. τύπος, ακρίβεια, περιορισμός κ.λπ.), και να καταγραφεί η εγκατάσταση και επισκευή του προϊόντος στην διαδικασία αυτή επειδή τα δεδομένα του προϊόντος θα πρέπει να αποθηκεύονται στα δεδομένα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος [129].

#### **4.4.2. Το εικονικό αντίγραφο**

Το ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να δημιουργηθεί από το υπάρχον λογισμικό μοντελοποίησης όπως είναι τα Solidwork, Inventor, Creo, Rhino κλπ [130]. Μπορεί επίσης να δημιουργηθεί από το υπάρχον προϊόν χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αντίστροφης μηχανικής (π.χ. 3D

έρευνα). Κατά τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου, ο σχεδιαστής θα πρέπει εξετάσει την αντιστοίχιση μεταξύ των παραμέτρων σχεδίασης και του αισθητήρα δεδομένων. Για παράδειγμα, το πάχος του τοιχώματος μπορεί να επηρεάσει τη



στιβαρότητα του προϊόντος, επομένως, τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής θα πρέπει να ανατροφοδοτούνται στο ψηφιακό μοντέλο και να προσαρμοστεί το πάχος του τοιχώματος σε πραγματικό χρόνο.

#### **4.4.3. Σύνδεση**

Για να αντικατοπτρίζεται η πραγματική κατάσταση στο ψηφιακό περιβάλλον, η φυσική οντότητα και το εικονικό αντίγραφο θα πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους ώστε να μπορούν να αλληλεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο. Τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού θα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με ενσωματωμένους αισθητήρες για τον εντοπισμό παραμέτρων που σχετίζονται με το σχεδιασμό του προϊόντος [131]. Με την ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας αισθητήρων, τα δεδομένα ψηφιακού διδύμου του προϊόντος σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του μπορούν να μετρηθούν και να καταγραφούν με ακρίβεια χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους αισθητήρες. Ως εκ τούτου, οι σχεδιαστές θα πρέπει να εξετάσουν εις βάθος την επιλογή αισθητήρα για την δομή του ψηφιακού διδύμου. Άλλη μια σύνδεση μεταξύ φυσικών και εικονικών προϊόντων είναι η υπηρεσίες αξιολόγησης του προϊόντος. Έτσι, επιτυγχάνεται η επικοινωνία μεταξύ χρηστών, παρόχων υπηρεσιών και κατασκευαστών, όπου διαχειρίζονται τη μετάδοση δεδομένων για το προϊόν του ψηφιακού διδύμου

[132]. Τα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν χωρίς καθυστέρηση μέσω αναδυόμενων τεχνολογιών επικοινωνίας, δηλαδή 5G και ασύρματη

επικοινωνία [ 133].

#### **4.4.4. Περιβάλλον προσομοίωσης:**

Τα φυσικά δεδομένα προϊόντος συγχρονίζονται με το ψηφιακό μοντέλο και προσομοιώνουν την κατάσταση στον εικονικό χώρο. Διαφορετικά από την παραδοσιακή προσομοίωση, το ψηφιακό δίδυμο προσομοιώνει το αποτέλεσμα του προϊόντος σε πραγματικό χρόνο και βασίζεται σε μεθόδους «What – If ».[134]. Κάποια λογισμικά προσομοίωσης είναι τα Matlab [135] και Simul8 [136] όπου υποστηρίζουν προσομοίωση που βασίζεται σε ψηφιακά δίδυμα και επιτρέπουν την ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (π.χ. μηχανική μάθηση, σε βάθος εκμάθηση) αλλά και επικοινωνούν με συσκευές σύνδεσμενες στο διαδίκτυο. Η προσομοίωση είναι ικανή να λειτουργεί συνεχώς στο προϊόν κατά τη διάρκεια της φάσης ανάπτυξης για τον εντοπισμό αστοχιών, τη λήψη αποφάσεων και βελτιστοποίησης του.

#### **4.4.5 Δεδομένα**

Είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο για την κατασκευή ενός προϊόντος ψηφιακού διδύμου σε ολόκληρη τη διαδικασία ανάπτυξης του προϊόντος [137]. Για να εφαρμοστεί ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του προϊόντος στο ψηφιακό δίδυμο , θα πρέπει να

υπάρχουν πολλά δεδομένα επεξεργασμένα. Για τα εξωτερικά δεδομένα του ψηφιακού διδύμου, πολλά συνεργεία θα έχουν μέρος στο σχέδιο, π.χ. προτιμήσεις σχεδιαστών, κυβερνητικοί κανόνες, γνώσεις σχεδιασμού, σχόλια κατασκευαστή, απαιτήσεις πελατών, κ.λπ. Για τα εσωτερικά δεδομένα του ψηφιακού διδύμου, η αλληλεπίδραση μεταξύ της φυσικής οντότητας και του εικονικού αντιγράφου είναι η πηγή των κύριων δεδομένων. Οι Schroeder (2016) πρότεινε μια προσέγγιση για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ φυσικού προϊόντος της προσομοίωσης του [ 139]. Οι αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στο προϊόν ή στο πρωτότυπο παρέχουν εισροές πληροφοριών χρήστη, περιβαλλοντικά δεδομένα, πληροφορίες προϊόντος και εγγραφές αποτυχιών. Αυτά τα δεδομένα στέλνονται στο ψηφιακό αντίγραφο για εκτέλεση σχετικής προσομοίωσης και ανάλυση. Στη συνέχεια, η ψηφιακή πλευρά θα ανατροφοδοτήσει τα προσομοιωμένα αποτελέσματα, τις προβλεπόμενες πληροφορίες και την απόφαση για το προϊόν. Επομένως, υπάρχει τεράστιος όγκος μετάδοσης δεδομένων. Ο σχεδιαστής θα πρέπει να σχεδιάσει μια ολοκληρωμένη χαρτογράφηση δεδομένων στο πρώιμο στάδιο της κατασκευής του προϊόντος ψηφιακού διδύμου και η ποιότητα των δεδομένων πρέπει να έχει αξιολογηθεί [140]. Επιπλέον, το πρότυπο μεταφοράς δεδομένων και επικοινωνίας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και μπορεί να βασίζεται σε κοινό βιομηχανικό πρότυπο, π.χ. DDS, HLA/RTI, MQTT κ.λπ. [141]

## Κεφάλαιο 5

### Δυνατότητες και έρευνα στην εφαρμογή του ψηφιακού δίδυμου

Γίνεται πιο εμφανές ότι το ψηφιακό δίδυμο λειτουργεί παράλληλα με την τεχνολογία AI και IoT με αποτέλεσμα κοινές προκλήσεις. Το πρώτο βήμα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων είναι ο εντοπισμός τους. Μερικές από τις κοινές προκλήσεις εντοπίζονται τόσο με την ανάλυση δεδομένων όσο και με το Διαδίκτυο των πραγμάτων και ο τελικός στόχος είναι να εντοπιστούν κοινές προκλήσεις για τα ψηφιακά δίδυμα.

Μερικές από τις προκλήσεις στον τομέα της μηχανικής και της βαθιάς μάθησης παρατίθενται παρακάτω.

#### 5.1. Υποδομή Πληροφορικής

Η πρώτη μεγάλη πρόκληση είναι η γενική υποδομή πληροφορικής. Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης πρέπει να αντιμετωπιστεί με υποδομές υψηλής απόδοσης με τη μορφή ενημερωμένου υλικού και λογισμικού, για να βοηθήσει στην εκτέλεση των αλγορίθμων. Η πρόκληση με την υποδομή αυτή τη στιγμή οφείλεται στο κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας αυτών των συστημάτων. Για παράδειγμα, το κόστος της μονάδας επεξεργασίας γραφικών υψηλής απόδοσης (GPU) που μπορεί να εκτελέσει τους αλγόριθμους μηχανής και βαθιάς εκμάθησης είναι χιλιάδες, από 1.000 \$ έως 10.000 \$. Εκτός από αυτό, η υποδομή χρειάζεται ενημερωμένο λογισμικό και υλικό για την επιτυχή εκτέλεση τέτοιων συστημάτων. Η υπέρβαση αυτής της πρόκλησης φαίνεται μέσω της χρήσης των GPU «ως υπηρεσία» που παρέχουν GPU κατά παραγγελία με κόστος μέσω του cloud. Amazon, Google, Microsoft και NVIDIA, για να αναφέρουμε μερικά, προσφέρουν μοναδικές υπηρεσίες κατ' απαίτηση παρόμοιες με τις παραδοσιακές εφαρμογές που βασίζονται σε σύννεφο, σπάζοντας το φράγμα στη ζήτηση, αλλά η κακή υποδομή και το υψηλό κόστος εξακολουθούν να αποτελούν πρόκληση για την ανάλυση δεδομένων. Η χρήση του cloud για ανάλυση δεδομένων και τα ψηφιακά δίδυμα

εξακολουθούν να αποτελούν προκλήσεις για τη διασφάλιση ότι η υποδομή cloud προσφέρει ισχυρή ασφάλεια.

## **5.2. Δεδομένα**

Από την άποψη των δεδομένων, είναι σημαντικό να διασφαλίζεται ότι δεν είναι κατώτερης ποιότητας. Τα δεδομένα πρέπει να ταξινομηθούν και να καθαριστούν, διασφαλίζοντας έτσι την υψηλότερη ποιότητα δεδομένων που τροφοδοτούνται στους αλγόριθμους AI.

## **5.3 Απόρρητο και ασφάλεια**

Το απόρρητο και η ασφάλεια είναι ένα σημαντικό θέμα για όποιον ασχολείται με τον κλάδο των υπολογιστών και αυτό δεν διαφέρει κατά την εκτέλεση αναλύσεων δεδομένων. Οι νόμοι και οι κανονισμοί δεν έχουν ακόμη θεσπιστεί πλήρως λόγω της νηπιακής ηλικίας της τεχνητής νοημοσύνης. Η πρόκληση είναι περισσότερος έλεγχος, ρύθμιση και μέτρα σχετικά με την τεχνητή νοημοσύνη στο μέλλον καθώς η τεχνολογία αναπτύσσεται. Η μελλοντική ρύθμιση διασφαλίζει την ανάπτυξη αλγορίθμων που λαμβάνουν μέτρα για την προστασία των δεδομένων των χρηστών. Ο Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων (GDPR) είναι ένας νέος κανονισμός που διασφαλίζει το απόρρητο και την ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων σε ολόκληρο το Ηνωμένο Βασίλειο και σε ολόκληρη την Ευρώπη. Παρά το γεγονός ότι είναι ένας γενικός κανονισμός σχετικά με τα δεδομένα και την ασφάλεια, αυτό τονίζει τις ανησυχίες σχετικά με το χειρισμό δεδομένων κατά την ανάπτυξη αλγορίθμων AI.

Η ρύθμιση είναι ένα βήμα για τη διασφάλιση της προστασίας των προσωπικών δεδομένων, ενώ μια άλλη μέθοδος είναι η ολοκληρωτική μάθηση, το αποκεντρωμένο πλαίσιο για μοντέλα εκπαίδευσης. Επιτρέπει στα δεδομένα των χρηστών σε ένα μοντέλο εκμάθησης να παραμένουν εντοπισμένα χωρίς κοινή χρήση δεδομένων, αντιμετωπίζοντας ζητήματα απορρήτου και ασφάλειας κατά την εφαρμογή αναλύσεων δεδομένων σε ένα ψηφιακό δίδυμο.

## 5.4 Εμπιστοσύνη

Η εμπιστοσύνη είναι μια άλλη πρόκληση που αφορά μεγάλο μέρος του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Πρώτον, επειδή είναι σχετικά νέο και δεύτερον επειδή, εκτός εάν ο προγραμματιστής είναι εξοικειωμένος με την πολυπλοκότητα, η χρήση του AI μπορεί να είναι τρομακτική. Το άγχος ότι τα ρομπότ και η τεχνητή νοημοσύνη θα γίνουν κυρίαρχη δύναμη στη γη, παίρνοντας τον έλεγχο των βασικών υποδομών από τους ανθρώπους, αποτελεί εμπόδιο στην εμπιστοσύνη.

Το θέμα της εμπιστοσύνης μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο επειδή η απεικόνιση της τεχνητής νοημοσύνης επικεντρώνεται κυρίως στις αρνητικές επιπτώσεις που θα μπορούσαν να προκύψουν. Οι θετικές ιστορίες μέσω του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης γίνονται όλο και πιο κοινές, αλλά η πρόκληση είναι προφανής και η ανάγκη για ευρύτερη έκθεση της τεχνητής νοημοσύνης και των θετικών χρήσεων θα βοηθούσε να ξεπεραστούν οι προκλήσεις με εμπιστοσύνη. Οι προκλήσεις απορρήτου και ασφάλειας συμβάλλουν σε αυτά τα ζητήματα εμπιστοσύνης, αλλά η πιο ολοκληρωμένη ρύθμιση απορρήτου και ασφάλειας στο AI οικοδομεί εμπιστοσύνη.

## 5.5. Προσδοκίες

Η τελευταία πρόκληση για την ανάλυση δεδομένων είναι η προσδοκία ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση όλων των προβλημάτων μας. Η προσεκτική εξέταση είναι ζωτικής σημασίας για τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης και η επένδυση χρόνου σε αυτό προσδιορίζει τη σωστή εφαρμογή, διασφαλίζοντας ότι τα τυπικά μοντέλα δεν θα μπορούσαν να παράγουν τα ίδια αποτελέσματα. Όπως και άλλες νέες τεχνολογίες, έχουν τη δυνατότητα να εργαστούν χέρι-χέρι ενισχύοντας πράγματα όπως η κατασκευή και οι εξελίξεις στην έξυπνη πόλη.

Οι πιθανοί χρήστες βλέπουν μόνο τα οφέλη και πιστεύουν ότι θα εξοικονομήσουν αμέσως χρόνο και χρήμα, εξ ου και οι υψηλές προσδοκίες. Το πεδίο είναι ακόμα στα σπάργανα και η πρόκληση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την εφαρμογή της ανάλυσης δεδομένων. Είναι εμφανές μέσα από τον αριθμό των σεναρίων που χρησιμοποιούν το

"AI" για διαδικασίες που δεν το χρειάζονται, σε αντίθεση με άλλες περιπτώσεις όπου θα πρέπει να χρησιμοποιείται AI. Απαιτείται μεγαλύτερη έκθεση και κατανόηση της τεχνητής νοημοσύνης για να επιτραπεί στους ανθρώπους να αποκτήσουν τη σωστή βασική γνώση της περιοχής, μαθαίνοντας έτσι πώς μπορεί να εφαρμοστεί.

## **5.6. Δεδομένα, Απόρρητο, Ασφάλεια και Εμπιστοσύνη στο IoT**

Η τεράστια ανάπτυξη των συσκευών IoT τόσο σε οικιακό όσο και σε βιομηχανικό περιβάλλον αποτελεί την πρόκληση της συλλογής σημαντικών ποσοτήτων δεδομένων. Η πρόκληση είναι να προσπαθήσουμε να ελέγξουμε τη ροή των δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι μπορούν να οργανωθούν και να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά. Η πρόκληση γίνεται μεγαλύτερο πρόβλημα με την έλευση των μεγάλων δεδομένων. Η χρήση του IoT αυξάνει τους μεγάλους όγκους μη δομημένων δεδομένων. Για να διαχειρίζεται το IoT τον όγκο των δεδομένων, η ταξινόμηση και η οργάνωση των δεδομένων είναι μια αναγκαιότητα και θα έχει ως αποτέλεσμα περισσότερα δεδομένα να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να παρέχουν αξία. Διαφορετικά, τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω του IoT θα χαθούν.

Καθώς τα δεδομένα θα μπορούσαν να είναι ευαίσθητα, θα μπορούσαν να έχουν αξία για έναν εγκληματία, αυξάνοντας έτσι την απειλή. Η απειλή αυξάνεται σημαντικά για τις επιχειρήσεις όταν θα μπορούσαν να έχουν να κάνουν με ευαίσθητα δεδομένα πελατών. Οι επιθέσεις στον κυβερνοχώρο θέτουν περισσότερες προκλήσεις με τους εγκληματίες που στοχεύουν συστήματα και τα μεταφέρουν εκτός σύνδεσης, για να ακρωτηριάσουν την υποδομή ενός οργανισμού. Ορισμένοι οργανισμοί διαθέτουν χιλιάδες συνδεδεμένες συσκευές IoT που ενέχουν κίνδυνο οι κυβερνοεγκληματίες να τις στοχεύσουν για να πάρουν τον έλεγχο και να χρησιμοποιήσουν τις συσκευές για τις υπηρεσίες τους. Ένα παράδειγμα αυτού είναι το σκάνδαλο Mirai botnet όπου σχεδόν 15 εκατομμύρια συσκευές IoT παγκοσμίως παραβιάστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την έναρξη μιας κατανεμημένης επίθεσης άρνησης υπηρεσίας (DDoS) [138]. Ο κίνδυνος επιθέσεων DDoS αυξάνεται λόγω της ταχείας ανάπτυξης του IoT. Τόσο καλά όσο αυτό, Η υστέρηση στις προτεραιότητες σχετικά με τις λύσεις απορρήτου και ασφάλειας ενέχει περαιτέρω κίνδυνο

επίθεσης. Κατά την εγκατάσταση των συσκευών, απαιτούνται τα πιο ενημερωμένα χαρακτηριστικά ασφαλείας και προστασία, αν όχι, αυτό είναι μια ευπάθεια που προσφέρει μια πίσω πόρτα για τους εγκληματίες να διεισδύσουν σε ένα μεγαλύτερο συνδεδεμένο περιβάλλον IoT.

#### **4.6.1. Υποδομή**

Η υποδομή πληροφορικής που υπάρχει αυτή τη στιγμή είναι πίσω, λόγω της ταχείας ανάπτυξης που παρατηρείται στην τεχνολογία IoT σε σύγκριση με τα υπάρχοντα συστήματα που ισχύουν σήμερα. Η ενημέρωση της παλιάς υποδομής και η ενσωμάτωση νέας τεχνολογίας συμβάλλει στη διευκόλυνση της ανάπτυξης του IoT.

Η ενημερωμένη υποδομή IoT παρέχει την ευκαιρία να επωφεληθούμε από την πιο πρόσφατη τεχνολογία και να αξιοποιήσουμε τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες που διατίθενται στο cloud χωρίς δαπανηρή ανανέωση των υπάρχοντων συστημάτων και τεχνολογίας.

Μια άλλη πρόκληση για τα συστήματα IoT είναι η σύνδεση παλαιών μηχανών στο περιβάλλον IoT. Ένας από τους τρόπους για να καταπολεμηθεί αυτό είναι η εκ των υστέρων τοποθέτηση αισθητήρων IoT σε μηχανήματα παλαιού τύπου, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα δεν σπαταλούνται και τα παλιά μηχανήματα μπορούν να έχουν κάποια μορφή αναλυτικών στοιχείων.

#### **5.6.2. Συνδεσιμότητα**

Παρά αυτή την ανάπτυξη στη χρήση του IoT, οι προκλήσεις της συνδεσιμότητας εξακολουθούν να υπάρχουν. Αυτά είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα όταν προσπαθείτε να επιτύχετε τον στόχο της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Ένας μεγάλος αριθμός αισθητήρων σε μια διαδικασία κατασκευής αποτελεί σημαντική πρόκληση όταν προσπαθείτε να συνδέσετε όλους τους ταυτόχρονα. Προκλήσεις με χαρακτηριστικά όπως διακοπές ρεύματος, σφάλματα λογισμικού ή σφάλματα συνεχούς ανάπτυξης επηρεάζουν

αυτόν τον γενικό στόχο της συνδεσιμότητας. Απλά το να μην είναι πλήρως συνδεδεμένος ένας αισθητήρας θα μπορούσε να επηρεάσει δραματικά τον συνολικό στόχο μιας δεδομένης διαδικασίας. Για παράδειγμα, οι συσκευές IoT είναι μια πηγή τροφοδοσίας δεδομένων σε αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό μπορεί να γίνει μια μεγάλη πρόκληση, καθώς απαιτούνται όλα τα δεδομένα για να λειτουργεί με ακρίβεια και τα ελλείποντα δεδομένα IoT θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τη λειτουργία του συστήματος. Η μετασκευή μηχανών και η συλλογή των δεδομένων που έχουν ήδη επιδοθεί από το μηχάνημα είναι μια μέθοδος διασφάλισης της συλλογής όλων των δεδομένων. Οι μέθοδοι καταλογισμού είναι μια διαδικασία εύρεσης τιμών αντικατάστασης για δεδομένα αισθητήρων IoT που λείπουν, μια έννοια χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της πλήρους συνδεσιμότητας και τη διευκόλυνση της λειτουργίας μοντέλων AI με υψηλή ακρίβεια και ελάχιστα έως καθόλου δεδομένα.

### **5.6.3. Προσδοκίες**

Ομοίως, με την τεχνητή νοημοσύνη, οι προσδοκίες που σχετίζονται με το IoT αποτελούν πρόκληση, επειδή ο οργανισμός και οι τελικοί χρήστες δεν κατανοούν πλήρως τι να περιμένουν από τις λύσεις IoT ή πώς να τις χρησιμοποιήσουν καλύτερα. Μια πολλά υποσχόμενη πτυχή είναι ότι η ταχεία ανάπτυξη του IoT δείχνει ότι οι τελικοί χρήστες και οι οργανισμοί αναγνωρίζουν την αξία του IoT και πώς ένας πιο έξυπνος συνδεδεμένος κόσμος μπορεί να μας ωφελήσει όλους.

Η προσδοκία ότι το IoT μπορεί απλώς να χρησιμοποιηθεί απεριόριστα χωρίς προηγούμενη γνώση μπορεί να είναι επιζήμιο, με το knock-on αποτέλεσμα, να ασκεί μεγαλύτερη πίεση στα ζητήματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας, επιβαρύνοντας περαιτέρω τις προκλήσεις με εμπιστοσύνη. Παρόμοια με την τεχνητή νοημοσύνη, απαιτείται βασική γνώση στο IoT για να διασφαλιστεί ότι χρησιμοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων του.



## **5.7. Προκλήσεις Ψηφιακών Διδύμων**

Αυτή η ενότητα βασίζεται κυρίως στις προκλήσεις που σχετίζονται με τα ψηφιακά δίδυμα. Ωστόσο, καθώς προχωρά η έρευνα, είναι σαφές ότι οι προκλήσεις που εντοπίζονται στην ανάλυση δεδομένων, το IoT και το IIoT είναι παρόμοιες με εκείνες που συναντώνται στις προκλήσεις για τα ψηφιακά δίδυμα, με ορισμένες να συζητούνται παρακάτω:

### **5.7.1. Υποδομή Πληροφορικής**

Ομοίως τόσο με τα analytics όσο και με το IoT, η πρόκληση είναι με την τρέχουσα υποδομή πληροφορικής. Το ψηφιακό δίδυμο χρειάζεται υποδομή που επιτρέπει την επιτυχία του IoT και της ανάλυσης δεδομένων. Αυτά θα διευκολύνουν την αποτελεσματική λειτουργία ενός Ψηφιακού Διδύμου. Χωρίς μια συνδεδεμένη και καλά μελετημένη υποδομή πληροφορικής, το ψηφιακό δίδυμο δεν θα είναι αποτελεσματικό στην επίτευξη των καθορισμένων στόχων του.

### **5.7.2. Χρήσιμα Δεδομένα**

Η επόμενη πρόκληση αφορά τα δεδομένα που απαιτούνται για ένα ψηφιακό δίδυμο. Πρέπει να είναι ποιοτικά δεδομένα χωρίς θόρυβο με σταθερή, αδιάκοπη ροή δεδομένων. Εάν τα δεδομένα είναι φτωχά και ασυνεπή, υπάρχει ο κίνδυνος του ψηφιακού διδύμου να υπολειτουργεί, καθώς ενεργεί σε φτωχά και ελλιπή δεδομένα. Η ποιότητα και ο αριθμός των σημάτων IoT είναι ουσιαστικός παράγοντας για τα ψηφιακά δίδυμα δεδομένα. Απαιτείται σχεδιασμός και ανάλυση της χρήσης της συσκευής για τον εντοπισμό των σωστών δεδομένων που συλλέγονται και χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική χρήση ενός Ψηφιακού Διδύμου.

### **5.7.3. Απόρρητο και ασφάλεια**

Σε ένα περιβάλλον του κλάδου, είναι σαφές ότι το απόρρητο και η ασφάλεια που σχετίζονται με τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν πρόκληση. Πρώτον λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων που χρησιμοποιούν και, δεύτερον, του κινδύνου που εγκυμονεί για τα ευαίσθητα δεδομένα του συστήματος. Για να ξεπεραστεί αυτή η πρόκληση, οι βασικές τεχνολογίες ενεργοποίησης για ψηφιακά δίδυμα.

- ανάλυση δεδομένων και IoT - πρέπει να ακολουθούν τις τρέχουσες πρακτικές και ενημερώσεις στους κανονισμούς ασφάλειας και απορρήτου. Η εξέταση της ασφάλειας και του απορρήτου για τα δεδομένα ψηφιακά δίδυμα συμβάλλει στην αντιμετώπιση προβλημάτων εμπιστοσύνης με τα ψηφιακά δίδυμα.

### **5.7.4. Εμπιστοσύνη**

Οι προκλήσεις που σχετίζονται με την εμπιστοσύνη είναι τόσο από πλευράς οργάνωσης όσο και από πλευράς χρήστη. Η τεχνολογία Ψηφιακών Διδύμων πρέπει να συζητηθεί περαιτέρω και να εξηγηθεί σε βασικό επίπεδο για να διασφαλιστεί ότι οι τελικοί χρήστες και οι οργανισμοί γνωρίζουν τα πλεονεκτήματα ενός Ψηφιακού Διδύμου, το οποίο θα έχει ως στόχο να ξεπεράσει την πρόκληση της εμπιστοσύνης.

Η επικύρωση μοντέλου είναι ένας άλλος τρόπος για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις με εμπιστοσύνη. Η επαλήθευση ότι τα ψηφιακά δίδυμα αποδίδουν όπως αναμένεται είναι το κλειδί για τη διασφάλιση της εμπιστοσύνης των χρηστών.

Με περισσότερη κατανόηση, κυριαρχεί η εμπιστοσύνη στα ψηφιακά δίδυμα. Η τεχνολογία ενεργοποίησης θα δώσει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα βήματα που διασφαλίζουν ότι ακολουθούνται οι πρακτικές απορρήτου και ασφάλειας μέσω της ανάπτυξης, με τη σειρά της, ξεπερνώντας τις προκλήσεις με εμπιστοσύνη.

### **5.7.5. Προσδοκίες**

Παρά την επιτάχυνση της υιοθέτησης του ψηφιακού διδύμου από τους ηγέτες του κλάδου Siemens και GE, απαιτείται προσοχή για να τονιστούν οι προκλήσεις που υπάρχουν για τις προσδοκίες των ψηφιακών διδύμων και την ανάγκη για περισσότερη κατανόηση. Η ανάγκη για γερές βάσεις για την υποδομή IoT και η καλύτερη κατανόηση των δεδομένων που απαιτούνται για την εκτέλεση αναλύσεων θα διασφαλίσει ότι οι οργανισμοί θα κάνουν χρήση της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων. Είναι επίσης μια πρόκληση να καταπολεμηθεί η σκέψη ότι το ψηφιακό δίδυμο πρέπει να χρησιμοποιείται αποκλειστικά λόγω των τρεχουσών τάσεων. Τα θετικά και τα αρνητικά για την προσδοκία των ψηφιακών διδύμων πρέπει να συζητηθούν για να διασφαλιστεί η κατάλληλη δράση κατά την ανάπτυξη συστημάτων Ψηφιακών διδύμων.

Είναι σαφές ότι οι προκλήσεις τόσο για το Industrial IoT/IoT όσο και για την ανάλυση δεδομένων είναι επίσης κοινές προκλήσεις για την εφαρμογή ενός ψηφιακού διδύμου. Παρά τις προκλήσεις που μοιράζεται το ψηφιακό δίδυμο με το IoT και την ανάλυση δεδομένων από την οπτική γωνία των χρηστών ως προς τις προκλήσεις απορρήτου και υποδομής του ψηφιακού διδύμου, υπάρχουν επίσης συγκεκριμένες προκλήσεις που σχετίζονται με τη μοντελοποίηση και την κατασκευή του ψηφιακού διδύμου.

### **5.7.6. Τυποποιημένη Μοντελοποίηση**

Οι επόμενες προκλήσεις σε όλες τις μορφές ανάπτυξης Ψηφιακών διδύμων σχετίζονται με τη μοντελοποίηση τέτοιων συστημάτων επειδή δεν υπάρχει τυποποιημένη προσέγγιση για τη μοντελοποίηση. Από την αρχική σχεδίαση έως την προσομοίωση ενός ψηφιακού διδύμου πρέπει να υπάρχει μια τυπική προσέγγιση, είτε αυτή βασίζεται στη φυσική είτε βασίζεται σε σχεδιασμένο. Οι τυποποιημένες προσεγγίσεις διασφαλίζουν την κατανόηση του τομέα και του χρήστη, ενώ παράλληλα διασφαλίζουν τη ροή πληροφοριών μεταξύ κάθε σταδίου ανάπτυξης και υλοποίησης ενός ψηφιακού διδύμου.

### 5.7.7. Μοντελοποίηση τομέα

Μια άλλη πρόκληση ως αποτέλεσμα της ανάγκης για τυποποιημένη χρήση σχετίζεται με τη διασφάλιση της μεταφοράς πληροφοριών που σχετίζονται με τη χρήση του τομέα σε καθένα από τα στάδια ανάπτυξης και λειτουργίας της μοντελοποίησης ενός ψηφιακού διδύμου. Αυτό διασφαλίζει τη συμβατότητα με τομείς όπως το IoT και η ανάλυση δεδομένων, επιτρέποντας την επιτυχημένη χρήση του ψηφιακού διδύμου στο μέλλον.

Αυτά είναι σημαντικά για να προχωρήσουμε, καθώς διασφαλίζει ότι λαμβάνονται υπόψη στη μελλοντική ανάπτυξη των ψηφιακών διδύμων, καθώς και κατά τη χρήση IIoT/IoT και ανάλυση δεδομένων. Ο Πίνακας 1 παρακάτω δείχνει μια περίληψη των προκλήσεων τόσο για την ανάλυση δεδομένων όσο και για το I/IoT, ενώ δείχνει τις γενικές συνδυασμένες προκλήσεις για ένα ψηφιακό δίδυμο, με την πρόκληση έξι και επτά ειδικά για την εφαρμογή Ψηφιακών διδύμων.

## **Κεφάλαιο 6 Ψηφιακές εφαρμογές που συνδέουν διαφορετικούς τομείς**

Το επόμενο μέρος αυτής της ανασκόπησης επικεντρώνεται στις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων. Θα ξεκινήσει πρώτα εξετάζοντας τις πιθανές εφαρμογές για ψηφιακά δίδυμα, συζητώντας τον τομέα, τους τομείς και τα συγκεκριμένα προβλήματα για την τεχνολογία Ψηφιακών διδύμων. Προς το παρόν, ο όρος και η έννοια του ψηφιακού διδύμου αυξάνονται στον ακαδημαϊκό χώρο και οι εξελίξεις στο IoT και την τεχνητή νοημοσύνη (AI) επιτρέπουν σε αυτήν την ανάπτυξη να αυξηθεί [31][16]. Σε αυτό το στάδιο, οι κύριοι τομείς ενδιαφέροντος είναι οι έξυπνες πόλεις και η κατασκευή με ορισμένες εφαρμογές της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων που σχετίζονται με την υγειονομική περίθαλψη.

### **6.1. Έξυπνες πόλεις**

Η χρήση και η δυνατότητα των ψηφιακών διδύμων να είναι δραματικά αποτελεσματικά σε μια έξυπνη πόλη αυξάνεται χρόνο με το χρόνο λόγω των ραγδαίων εξελίξεων στη συνδεσιμότητα μέσω IoT.

Με έναν αυξανόμενο αριθμό έξυπνων πόλεων που αναπτύσσονται, όσο πιο συνδεδεμένες είναι οι κοινότητες, με αυτό έρχεται περισσότερη χρήση Ψηφιακών διδύμων. Όχι μόνο αυτό, όσο περισσότερα δεδομένα συλλέγουμε από αισθητήρες IoT που είναι ενσωματωμένοι στις βασικές υπηρεσίες μας σε μια πόλη, αλλά θα ανοίξει επίσης το δρόμο για έρευνα που στοχεύει στη δημιουργία προηγμένων αλγορίθμων AI [41][3].

Η ικανότητα των υπηρεσιών και των υποδομών σε μια έξυπνη πόλη να διαθέτουν αισθητήρες και να παρακολουθούνται με συσκευές IoT έχει μεγάλη αξία για όλα τα είδη μελλοντικής προστασίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη των τρεχουσών έξυπνων πόλεων και να βοηθήσει με τις συνεχείς εξελίξεις άλλων έξυπνων πόλεων. Εκτός από τα οφέλη του προγραμματισμού, υπάρχουν και

οφέλη στον κόσμο της εξοικονόμησης ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα παρέχουν μια εξαιρετική εικόνα του τρόπου με τον οποίο διανέμονται και χρησιμοποιούνται τα βοηθητικά προγράμματα μας. Η πρόοδος για την έξυπνη πόλη είναι η δυνατότητα χρήσης της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων. Μπορεί να διευκολύνει την ανάπτυξη με το να είναι σε θέση να δημιουργήσει ένα ζωντανό δοκιμαστικό κρεβάτι μέσα σε ένα εικονικό δίδυμο που μπορεί να επιτύχει δύο πράγματα. ένα, για τη δοκιμή σεναρίων και, δύο, για να επιτραπεί στα ψηφιακά δίδυμα να μάθουν από το περιβάλλον αναλύοντας τις αλλαγές στα δεδομένα που συλλέγονται. Τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση δεδομένων και παρακολούθηση. Το πεδίο εφαρμογής για τα ψηφιακά δίδυμα γίνεται πιο βιώσιμο καθώς η ανάπτυξη έξυπνων πόλεων αυξάνει τη συνδεσιμότητα και τον όγκο των χρησιμοποιήσιμων δεδομένων [48].

Η τελευταία περιοχή ενδιαφέροντος είναι τα ανοιχτά ερευνητικά ερωτήματα για ψηφιακά δίδυμα που σχετίζονται με έξυπνες πόλεις. Η ανασκόπηση, δείχνει ότι αυτός ο τομέας είναι παρόμοιος με την υγειονομική περίθαλψη όσον αφορά την περιορισμένη ακαδημαϊκή έρευνα. Τα έγγραφα καλύπτουν επί του παρόντος μεγάλα τμήματα αυτού του ευρύτερου οράματος μιας έξυπνης πόλης. οτιδήποτε, από τα ψηφιακά δίδυμα σε όλη την πόλη για έξυπνες πόλεις έως πιο συγκεκριμένους τομείς όπως η διαχείριση κυκλοφορίας Ψηφιακών διδύμων και διαχείριση ζώων [9] για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας[142]. Τα θέματα αφορούσαν το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί το ψηφιακό δίδυμο μεγάλης κλίμακας για μια πλήρως συνδεδεμένη μεγάλη πόλη ή πόλη.

Μια συναρπαστική ευκαιρία είναι ο συνδυασμός Ψηφιακών διδύμων και τοπικής υποδομής, όπως διερευνήθηκε από τους [3] και [144], κάνοντας χρήση της τρισδιάστατης μοντελοποίησης για την ανάπτυξη και συντήρηση έξυπνων πόλεων. Οι ανοιχτές περιοχές προς έρευνα έχουν τη μορφή εφαρμογής αναλύσεων δεδομένων, όπως η προγνωστική ανάλυση που εφαρμόζεται σε ένα ψηφιακό δίδυμο για την ανάπτυξη έξυπνης πόλης.

Ένα τυποποιημένο ψηφιακό δίδυμο για μια έξυπνη πόλη είναι απαραίτητο. Ωστόσο, αυτό απαιτεί περαιτέρω έρευνα σε τομείς για τις αλληλεπιδράσεις της συγχώνευσης δεδομένων για τη φυσική και εικονική ανταλλαγή δεδομένων για ένα ψηφιακό δίδυμο. Η ανάγκη για μοντελοποίηση σε μια έξυπνη πόλη τονίζεται από τα [33] και [143] με την έκκληση για πιο γενικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη όλα τα στοιχεία μιας έξυπνης

πόλης. Ο Chen παρουσιάζει μια ιδέα διαχείρισης της κυκλοφορίας ενσωματωμένη χωρίς την ανάγκη περαιτέρω εξελίξεων ή πιο γενικών μοντέλων, θέτοντας ένα πρότυπο για συμβατότητα μεταξύ έξυπνων κτιρίων και έξυπνης κυκλοφορίας. Με την άνοδο και την ανάπτυξη των ψηφιακών διδύμων για την κατασκευή, είναι σαφές ότι οι ευκαιρίες για έξυπνες πόλεις αυξάνονται [108].

## **6.2. Βιομηχανοποίηση**

Η επόμενη αναγνωρισμένη εφαρμογή για το ψηφιακό δίδυμο βρίσκεται σε ένα περιβάλλον παραγωγής. Ο μεγαλύτερος λόγος για αυτό είναι ότι οι κατασκευαστές αναζητούν πάντα έναν τρόπο με τον οποίο τα προϊόντα μπορούν να παρακολουθούνται και να παρακολουθούνται σε μια προσπάθεια εξοικονόμησης χρόνου και χρημάτων, βασικό μοχλό και κίνητρο για κάθε κατασκευαστή. Επομένως, γιατί τα ψηφιακά δίδυμα φαίνεται να έχουν τον πιο σημαντικό αντίκτυπο σε αυτό το περιβάλλον. Ομοίως, με την ανάπτυξη μιας τρέχουσα ανάπτυξη είναι σύμφωνη με την ιδέα της Βιομηχανίας 4.0, που επινόησε την 4η βιομηχανική επανάσταση, αξιοποιεί τη συνδεσιμότητα των συσκευών για να κάνει την ιδέα του ψηφιακού διδύμου πραγματικότητα για τις διαδικασίες παραγωγής έξυπνης πόλης, η συνδεσιμότητα είναι ένας από τους μεγαλύτερους μοχλούς για την κατασκευή για τη χρήση των ψηφιακών διδύμων [36].

Το ψηφιακό δίδυμο έχει τη δυνατότητα να δώσει σε πραγματικό χρόνο κατάσταση για την απόδοση των μηχανών καθώς και ανατροφοδότηση για τη γραμμή παραγωγής. Δίνει στον κατασκευαστή τη δυνατότητα να προβλέψει τα προβλήματα νωρίτερα. Η χρήση Ψηφιακών διδύμων αυξάνει τη συνδεσιμότητα και την ανάδραση μεταξύ των συσκευών, βελτιώνοντας με τη σειρά της την αξιοπιστία και την απόδοση. Οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης που συνδέονται με ψηφιακά δίδυμα έχουν τη δυνατότητα για μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς το μηχάνημα μπορεί να κρατήσει μεγάλο όγκο δεδομένων, που απαιτούνται για ανάλυση απόδοσης και πρόβλεψης. Το ψηφιακό δίδυμο δημιουργεί ένα περιβάλλον για τη δοκιμή προϊόντων καθώς και ένα σύστημα που δρα σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, μέσα σε ένα περιβάλλον παραγωγής που έχει τη δυνατότητα να είναι ένα εξαιρετικά πολύτιμο περιουσιακό στοιχείο [28].

Μια άλλη εφαρμογή του ψηφιακού διδύμου είναι στην αυτοκινητοβιομηχανία, με πιο αξιοσημείωτη επίδειξη από την Tesla. Η δυνατότητα να έχετε ένα ψηφιακό δίδυμο κινητήρα ή ανταλλακτικού αυτοκινήτου μπορεί να είναι πολύτιμη δοκιμών καθώς μπορεί να εκτελεί αναλύσεις δεδομένων σε ζωντανά δεδομένα οχημάτων για να προβλέψει την τρέχουσα και μελλοντική απόδοση των εξαρτημάτων.

Ο κατασκευαστικός κλάδος είναι ένας άλλος τομέας που φιλοξενεί μια σειρά εφαρμογών για χρήση Ψηφιακών διδύμων. Το στάδιο ανάπτυξης ενός κτιρίου ή μιας δομής είναι μια πιθανή εφαρμογή για ένα ψηφιακό δίδυμο. Η τεχνολογία δεν μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στην ανάπτυξη κτιρίων ή δομών έξυπνων πόλεων αλλά και ως εργαλείο πρόβλεψης και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση του ψηφιακού διδύμου και των αναλυτικών στοιχείων δεδομένων θα παρέχει δυνητικά μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την πρόβλεψη και τη συντήρηση κτιρίων και κατασκευών με τυχόν αλλαγές που πραγματοποιούνται ουσιαστικά και στη συνέχεια εφαρμόζονται φυσικά. Το ψηφιακό δίδυμο παρέχει στις κατασκευαστικές ομάδες μεγαλύτερη ακρίβεια κατά τη διεξαγωγή προσομοιώσεων, καθώς οι αλγόριθμοι μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο εντός του ψηφιακού διδύμου πριν από το φυσικό κτίριο.

Ένας κοινός στόχος που έχει παρατηρηθεί μέχρι στιγμής στον τομέα των ψηφιακών διδύμων είναι αυτή η ιδέα της προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο σε αντίθεση με τα μοντέλα στατικού σχεδιαγράμματος χαμηλής λεπτομέρειας. Η χρήση αυτών των μοντέλων εξυπηρετεί έναν σκοπό, αλλά δεν χρησιμοποιούν παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο που περιορίζουν την προβλεψιμότητα και τη δυνατότητα εκμάθησης. Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να μαθαίνει και να παρακολουθεί ταυτόχρονα, καθώς και να εφαρμόζει αλγόριθμους μηχανικής και βαθιάς μάθησης [61].



### 6.3. Φροντίδα υγείας

Ο τομέας της υγειονομικής περίθαλψης είναι ένας άλλος τομέας για την εφαρμογή της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων. Η ανάπτυξη και οι εξελίξεις που δίνει η τεχνολογία στην υγειονομική περίθαλψη είναι άνευ προηγουμένου, καθώς το άλλοτε ακατόρθωτο γίνεται εφικτό. Όσον αφορά το IoT, οι συσκευές είναι φθηνότερες και ευκολότερες στην εφαρμογή, εξ ου και η αύξηση της συνδεσιμότητας [116]. Η αυξημένη συνδεσιμότητα αυξάνει μόνο την πιθανή εφαρμογή της χρήσης Ψηφιακών διδύμων στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης. Μια μελλοντική εφαρμογή είναι το ψηφιακό δίδυμο ενός ανθρώπου, που δίνει ανάλυση του σώματος σε πραγματικό χρόνο. Μια πιο ρεαλιστική τρέχουσα εφαρμογή είναι ένα ψηφιακό δίδυμο που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των επιδράσεων ορισμένων φαρμάκων. Μια άλλη εφαρμογή βλέπει τη χρήση ενός ψηφιακού διδύμου για τον σχεδιασμό και την εκτέλεση χειρουργικών επεμβάσεων [117].

Ομοίως με άλλες εφαρμογές σε ένα περιβάλλον υγειονομικής περίθαλψης, η χρήση ενός ψηφιακού διδύμου δίνει σε ερευνητές, γιατρούς, νοσοκομεία και παρόχους υγειονομικής περίθαλψης τη δυνατότητα να προσομοιώνουν περιβάλλοντα ειδικά για τις ανάγκες τους είτε σε πραγματικό χρόνο είτε κοιτάζοντας μελλοντικές εξελίξεις και χρήσεις. Εκτός από αυτό, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταυτόχρονα με αλγόριθμους AI για να γίνουν πιο έξυπνες προβλέψεις και αποφάσεις. Πολλές εφαρμογές στην υγειονομική περίθαλψη δεν περιλαμβάνουν άμεσα τον ασθενή, αλλά είναι ωφέλιμες για τη συνεχή φροντίδα και θεραπεία, εξ ου και ο βασικός ρόλος που έχουν τέτοια συστήματα στη φροντίδα των ασθενών. Το ψηφιακό δίδυμο για την υγειονομική περίθαλψη είναι στα σπάργανα, αλλά οι δυνατότητες είναι τεράστιες από τη χρήση του για τη διαχείριση κρεβατιού έως τους θαλάμους μεγάλης κλίμακας και τη διαχείριση νοσοκομείων [118].

Η ικανότητα προσομοίωσης και δράσης σε πραγματικό χρόνο είναι ακόμη πιο σημαντική στην υγειονομική περίθαλψη, καθώς μπορεί να είναι η διαφορά μεταξύ ζωής ή θανάτου. Το ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε επίσης να βοηθήσει με προγνωστική συντήρηση και συνεχή επισκευή ιατρικού εξοπλισμού. Το ψηφιακό δίδυμο στο ιατρικό περιβάλλον έχει

τη δυνατότητα μαζί με την τεχνητή νοημοσύνη να λαμβάνει αποφάσεις που σώζουν ζωές με βάση δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και ιστορικά δεδομένα [67].

Οι εφαρμογές ενός ψηφιακού δίδυμου προσδιορίζονται εδώ, δείχνοντας Ορισμένες από τις διασταυρώσεις στην προβλεπόμενη χρήση που καταδεικνύουν πόσο προσαρμοσμένη είναι η προγνωστική συντήρηση από μηχανήματα εργοστασίων κατασκευής έως τη φροντίδα ασθενών. Εμφανίζει επίσης ορισμένες από τις εφαρμογές όπου δεν διασταυρώνονται και η χρήση Ψηφιακών διδύμων είναι συγκεκριμένη για τη χρήση για την οποία προορίζεται. Οι εξελίξεις στο AI, IoT και Βιομηχανίας 4.0 έχουν διευκολύνει την ανάπτυξη των Ψηφιακών διδύμων εφαρμογών.

Αυτή η επόμενη ενότητα συζητά τα ανοιχτά ερευνητικά ερωτήματα για τα Ψηφιακά Δίδυμα σε ένα περιβάλλον υγειονομικής περίθαλψης. Ορισμένες από τις έρευνες αναφέρουν τη δυνατότητα προσαρμογής της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων για τον άνθρωπο. Ένα παράδειγμα είναι ένα ψηφιακό δίδυμο ενός ατόμου για την παρακολούθηση της καθημερινής υγείας και ευεξίας, δίνοντας τη δυνατότητα σε ένα ανθρώπινο δίδυμο να προσομοιώσει τι θετικές και αρνητικές αλλαγές στον τρόπο ζωής θα μπορούσαν να έχουν στον φυσικό άνθρωπο. Η σημαντική ανοιχτή έρευνα έρχεται με τη μορφή μοντελοποίησης και κατάργησης των φραγμών για τη μοντελοποίηση ενός ανθρώπινου σώματος σε ένα ψηφιακό δίδυμο. Και πάλι, μέχρι το ζήτημα της απουσίας τυποποιημένων μεθόδων μοντελοποίησης Ψηφιακών διδύμων [120]. Παρόμοια με το PHM στην κατασκευή, αυτή η ιδέα είναι ένας συναρπαστικός τομέας έρευνας με το ψηφιακό δίδυμο να χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τη διατήρηση της υγείας των ανθρώπων. Από την καθημερινή υγειονομική περίθαλψη έως τις συνεχείς καταστάσεις υγείας, Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί με παρόμοιο τρόπο με το PHM, συνδυάζοντας αναλυτικά στοιχεία δεδομένων για να διασφαλιστεί ότι οι ασθενείς είναι υγιείς [61]. Τ παρουσιάζει ανοιχτή έρευνα σχετικά με τη χειρουργική. χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα με τρέχοντα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για ψηφιακές δίδυμες προσομοιώσεις χειρουργικής επέμβασης και συνολικής υγειονομικής περίθαλψης. Ο στόχος είναι να εντοπιστούν οι κίνδυνοι πριν προκύψουν χρησιμοποιώντας το εικονικό δίδυμο του ασθενούς.

Ένας τομέας έρευνας είναι ο τομέας της συγχώνευσης δεδομένων, με τα [62] και [78] να αναφέρουν την ανάγκη για έρευνα για την ακριβή αντιμετώπιση των δεδομένων που συλλέγονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία για ένα ψηφιακό δίδυμο, κυρίως καθώς ασχολείται με ευαίσθητα δεδομένα ασθενών μέσω εικονικού και φυσικού ψηφιακού διδύμου, απαιτείται επαρκής αλληλεπίδραση και σύγκλιση για μεγαλύτερη εμπιστοσύνη και χρήση. ως εκ τούτου, η ανάγκη για περισσότερη έρευνα.

Η εξ αποστάσεως χειρουργική και η υγειονομική περίθαλψη είναι ένας άλλος συναρπαστικός τομέας έρευνας. Η ικανότητα ενός γιατρού να μπορεί να πραγματοποιεί προεγχειρητικούς ελέγχους εξ αποστάσεως μέσω ενός ψηφιακού διδύμου είναι ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος ελαχιστοποίησης του κινδύνου για τη ζωή. Μια άλλη έννοια που παρουσιάζεται από τους Lakki et al. είναι η ανοιχτή έρευνα για την απομακρυσμένη χειρουργική που υποστηρίζεται από το δίκτυο. Αυτό συμβαδίζει με τις εξελίξεις του 5G για χειρουργικές επεμβάσεις κινητής τηλεφωνίας, ένας άλλος τομέας μελλοντικής έρευνας για ψηφιακά δίδυμα στην υγειονομική περίθαλψη [61].

Η συγχώνευση δεδομένων, η μοντελοποίηση, η εξ αποστάσεως χειρουργική και η εφαρμογή των ψηφιακών διδύμων για την υγειονομική περίθαλψη διευκολύνουν πιο συγκεκριμένους τομείς έρευνας. Πολλές έρευνες αναφέρουν τη συνεχιζόμενη ανησυχία για την ασφάλεια της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων για ένα ψηφιακό δίδυμο, πιο σημαντικό όταν ασχολούμαστε με ευαίσθητα δεδομένα από ένα περιβάλλον υγειονομικής περίθαλψης. Ο στόχος της μελλοντικής εργασίας είναι να διασφαλιστεί το απόρρητο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για ένα ψηφιακό δίδυμο.

#### **6.4. Ψηφιακά δίδυμα στη βιομηχανία**

Η General Electric (GE) τεκμηρίωσε για πρώτη φορά τη χρήση ενός ψηφιακού διδύμου σε μια αίτηση διπλώματος ευρεσιτεχνίας το 2016. Από την ιδέα που ορίζεται στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, ανέπτυξαν μια εφαρμογή που ονομάζεται πλατφόρμα "Predix" [68] που είναι ένα εργαλείο για τη δημιουργία Ψηφιακών διδύμων. Το Predix [68] χρησιμοποιείται για την εκτέλεση αναλύσεων και παρακολούθησης δεδομένων. Τα τελευταία χρόνια, η

GE έχει μειώσει τα σχέδιά της για ένα ψηφιακό δίδυμο, σχεδιάζοντας να επικεντρωθεί στην κληρονομιά τους ως βιομηχανική πολυεθνική και όχι ως εταιρεία λογισμικού. Η Siemens, ωστόσο, έχει αναπτύξει μια πλατφόρμα που ονομάζεται «MindSphere» [69] η οποία έχει αγκαλιάσει την ιδέα του Industrial 4.0 με ένα σύστημα που βασίζεται στο cloud που συνδέει μηχανές και φυσική υποδομή με ένα ψηφιακό δίδυμο. Χρησιμοποιεί όλες τις συνδεδεμένες συσκευές και δισεκατομμύρια ροές δεδομένων με την ελπίδα να μεταμορφώσει τις επιχειρήσεις και να παρέχει λύσεις Ψηφιακών διδύμων [69].

Μια εναλλακτική πλατφόρμα για την ανάπτυξη της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων και AI είναι το "ThingWorx" [33]. Αυτή η πλατφόρμα που δημιουργήθηκε από την PTC είναι μια Πλατφόρμα Βιομηχανικής Καινοτομίας με κύριο στόχο τη συλλογή δεδομένων IIoT/IoT και την παρουσίαση μέσω μιας διαισθητικής διεπαφής χρήστη που βασίζεται σε ρόλους που παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στους χρήστες. Η πλατφόρμα διευκολύνει την ομαλή ανάπτυξη της ανάλυσης δεδομένων, ενώ παράλληλα αναπτύσσει ένα περιβάλλον για μια λύση Ψηφιακών διδύμων [33].

Η IBM ανέπτυξε μια πλατφόρμα που ονομάζεται «Watson IoT Platform» [27] διατίθεται στην αγορά ως ένα ολοκληρωμένο εργαλείο δεδομένων IoT που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση συστημάτων μεγάλης κλίμακας, σε πραγματικό χρόνο, μέσω δεδομένων που συλλέγονται από εκατομμύρια συσκευές IoT. Η πλατφόρμα έχει πολλά πρόσθετα χαρακτηριστικά: υπηρεσίες που βασίζονται στο cloud, αναλυτικά δεδομένα, δυνατότητες αιχμής και υπηρεσίες blockchain. Όλα αυτά το καθιστούν μια πιθανή πλατφόρμα για ένα σύστημα Ψηφιακών διδύμων [27].

Από την άποψη του ανοιχτού κώδικα, υπάρχουν δύο μεγάλα έργα που πρέπει να επισημανθούν. Το πρώτο είναι το έργο «Ditto» από το Eclipse [72], μια έτοιμη προς χρήση πλατφόρμα που μπορεί να διαχειριστεί τις καταστάσεις ενός ψηφιακού διδύμου, δίνοντας πρόσβαση και έλεγχο σε φυσικά και ψηφιακά δίδυμα. Η πλατφόρμα βρίσκεται σε ρόλο back-end παρέχοντας υποστήριξη για ήδη συνδεδεμένες συσκευές και απλοποιώντας τη σύνδεση και τη διαχείριση των ψηφιακών διδύμων [72]. Ένα άλλο έργο ανοιχτού κώδικα που ονομάζεται «imodel.js» που αναπτύχθηκε από την Bentley Systems [50] είναι μια πλατφόρμα για τη δημιουργία, την πρόσβαση και τη δημιουργία Ψηφιακών διδύμων.

Στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε παραπάνω, επτά συγγραφείς παρουσιάζουν ευρήματα από μια σειρά περιπτώσιολογικών μελετών σχετικά με τις εφαρμογές Ψηφιακών διδύμων. Έγγραφα και μελέτες περιπτώσεων συζητούν πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα ψηφιακά δίδυμα για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής.

## **6.5. Ψηφιακά δίδυμα στην κατασκευή**

Η κατασκευή και τα πλήρως ενσωματωμένα ψηφιακά δίδυμα προτείνονται στη βιβλιογραφία, αλλά δεν υλοποιούνται επί του παρόντος στη βιομηχανία. Υπάρχει ένας αριθμός δημοσιεύσεων για μικρότερες εξελίξεις ενός ψηφιακού διδύμου. Παραδείγματα βιομηχανικών περιπτώσιολογικών μελετών παρατίθενται στον Πίνακα 5 και συζητούνται λεπτομερέστερα στην Ενότητα V υποενότητα Γ και συνοψίζονται παρακάτω.

Στη βιβλιογραφία δεν καλύπτουν όλες οι δημοσιεύσεις όλες οι πτυχές ενός ψηφιακού διδύμου, από τη φυσική και εικονική μοντελοποίηση έως τα μέρη δεδομένων, σύνδεσης και εξυπηρέτησης της μοντελοποίησης ενός ψηφιακού διδύμου. Απαιτούνται μοντελοποίηση και κλιμάκωση για τη δημιουργία γενικών Ψηφιακών διδύμων. Ο Zheng και ο Schleich παρουσιάζουν μοντελοποίηση με βάση αισθητήρες διαφορετικών σταδίων ενός ψηφιακού διδύμου με τον Shangguam εστιάζοντας μόνο στην ιεραρχική μοντελοποίηση της εικονικής και φυσικής μοντελοποίησης ενός ψηφιακού διδύμου. υπάρχει ανάγκη για ένα γενικό μοντέλο για ένα πλήρες ψηφιακό δίδυμο [145].

Η βιβλιογραφία που καλύπτει τη συγχώνευση δεδομένων είναι ένα άλλο θέμα που έχει ερευνηθεί εκτενώς σε όλους τους τομείς της επιστήμης, αλλά έχει ερευνηθεί λιγότερο κατά την εφαρμογή της συγχώνευσης δεδομένων και των ψηφιακών διδύμων σε βιομηχανικό περιβάλλον. Ομοίως, με τη μοντελοποίηση Ψηφιακών διδύμων, ένας άλλος τρόπος είναι η ενσωμάτωση της συγχώνευσης δεδομένων κατά την ανάπτυξη γενικών μοντέλων. Η βιβλιογραφία διερευνά πώς η προγνωστική συντήρηση μπορεί να ενσωματώσει ψηφιακά δίδυμα με συγχώνευση δεδομένων που είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας έρευνας [38][14].

Έλλειψη έρευνας είναι η μοντελοποίηση των ψηφιακών διδύμων που χρησιμοποιούν εικονική και φυσική σύντηξη δεδομένων, αυτό μπορεί επίσης να συζητηθεί με τον όρο "Cyber-Physical" σύντηξη. Η ανάγκη για τυποποιημένες προσεγγίσεις κατά τη μοντελοποίηση της συγχώνευσης δεδομένων με ψηφιακά δίδυμα. Έρευνες [38][14] εξερευνούν μερικούς από τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η συγχώνευση δεδομένων για ψηφιακά δίδυμα στη βιομηχανία, ενώ επισημαίνουν επίσης ορισμένες από τις πιθανές προκλήσεις με την υλοποίηση της συγχώνευσης δεδομένων, από προβλήματα σύνδεσης έως απειλές ασφαλείας .

Η πολυετής έρευνα στη συντήρηση μηχανών έχει δημιουργήσει τον όρο προγνωστική και διαχείριση υγείας (PHM) που χρησιμοποιείται κυρίως σε βιομηχανικό περιβάλλον καθώς μπορεί να εφαρμοστεί στις διαδικασίες υγείας και παραγωγής από μικρές έως μεγάλης κλίμακας μονάδες [79][146][36]. Η τεχνολογία Ψηφιακών διδύμων προωθεί το PHM ως δυναμικό για έρευνα σε τομείς διάγνωσης βλαβών και προγνωστικής συντήρησης για βιομηχανικές διεργασίες, οι οποίες είναι απτές με την ανάπτυξη των ψηφιακών διδύμων. Το ψηφιακό δίδυμο επιτρέπει επίσης την πιθανή αλληλεπίδραση και συνεργασία μηχανών, δίνοντας τη δυνατότητα για προσομοίωση διαδικασιών, διευκολύνοντας τον στόχο για πιο ακριβείς μεταποιήσεις [60][75].

## **6.6. Κοινές Ανάγκες Και Συγκεκριμένα Ευρήματα**

### **6.6.1. Μοντέλα Δεδομένων**

Το πρώτο σύνολο ευρημάτων σχετίζεται με το ψηφιακό δίδυμο μοντέλο και την αρχιτεκτονική του. Υπάρχει έλλειψη ενοποιημένων μοντέλων ή μιας γενικής αρχιτεκτονικής Ψηφιακών διδύμων στη βιβλιογραφία, χωρίς συναίνεση σχετικά με τον τρόπο κατασκευής ενός συστήματος Ψηφιακών διδύμων. Η ανάπτυξη ενός σχεδιαστικού παραδείγματος για την κατασκευή ενός ψηφιακού διδύμου θα μπορούσε να είναι ένας γενικός τρόπος εφαρμογής ενός βασικού συστήματος Ψηφιακών διδύμων.

### **6.6.2. Ετερογενή Συστήματα**

Καθώς το περιβάλλον Ψηφιακών διδύμων είναι ετερογενές, ενώ είναι επίσης συνδεδεμένο με μεγάλα καταναμημένα δίκτυα, είναι ένας συνεχής στόχος που φαίνεται σε όλο το πεδίο για τους ερευνητές να αποκτήσουν μια βαθύτερη κατανόηση του τρόπου αντιμετώπισης τέτοιων συστημάτων.

Αυτό είναι κάτι που πρέπει να επιτευχθεί μέσω της αξιολόγησης και της σύγκρισης των τρεχόντων συστημάτων Ψηφιακών διδύμων μεταξύ τους, διερευνώντας πώς διαφέρουν στον χειρισμό μικρότερων και μεγαλύτερων ετερογενών Ψηφιακών διδύμων περιβαλλόντων.

### **6.6.3. Τεχνητή Νοημοσύνη (AI)**

Με την πρόοδο στην ψηφιοποίηση, η τεχνητή νοημοσύνη είναι ένας από τους ηγέτες και διευκολυντές για την ανάπτυξη και την προσαρμοστικότητα για την ενεργοποίηση των ψηφιακών διδύμων και γίνεται το κύριο συστατικό τέτοιων συστημάτων. Οι ανοιχτοί τομείς έρευνας που αξιολογούν τον αντίκτυπο της τεχνητής νοημοσύνης, των μηχανών και των αλγορίθμων βαθιάς μάθησης θα μπορούσαν δυνητικά να επηρεάσουν τις προόδους και τις χρήσεις της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων. Αυτές οι εξελίξεις στις έννοιες της Βιομηχανίας 4.0 έχουν εμπλουτίσει τον τρόπο που ζούμε, εργαζόμαστε και επικοινωνούμε, με τη σειρά μας, ανοίγοντας περισσότερες ευκαιρίες έρευνας καθώς αυξάνεται η ζήτηση για τεχνολογία Ψηφιακών διδύμων. Η τεχνητή νοημοσύνη ανοίγει το δρόμο για περισσότερες περιπτώσιολογικές μελέτες σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον για την αξιολόγηση της προγνωστικής συντήρησης και της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής των συστημάτων ως μελέτη περίπτωσης.

### **6.6.4. Ασφάλεια**

Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία όπως το blockchain, έρχονται πολλές ευκαιρίες για να διασφαλιστεί η ασφάλεια με κύρια εστίαση στην εξερεύνηση λύσεων που βοηθούν στην ασφάλεια των ψηφιακών διδύμων.

#### **6.6.5. Ανταλλαγή δεδομένων**

Όπως η ασφάλεια και η τεχνητή νοημοσύνη, με περισσότερη συνδεσιμότητα έρχεται η άνοδος των συστημάτων Ψηφιακών διδύμων και των τεχνολογιών ενεργοποίησης. Περισσότερες έρευνες θα διασφαλίσουν ότι το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να ευδοκιμήσει κατά την κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ συσκευών. Μια ανοιχτή περιοχή αναζητά λύσεις για την επίτευξη της απρόσκοπτης ενοποίησης δεδομένων για μικρά συστήματα IoT καθώς και μεγάλα ετερογενή συστήματα. Η ανάπτυξη μικρών Ψηφιακών διδύμων πρέπει να κλιμακωθεί, λαμβάνοντας υπόψη την αδύναμη ανταλλαγή δεδομένων.

#### **6.6.6. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)**

Το μεγαλύτερο μέρος της ανοιχτής έρευνας είναι από την οπτική γωνία του IoT όταν σκεφτόμαστε ένα ψηφιακό δίδυμο. Πρέπει να υπάρχει ένας τρόπος εκ των υστέρων τοποθέτησης αισθητήρων για να διασφαλιστεί ότι η ανταλλαγή δεδομένων είναι ακριβής και αποδίδει με τις καλύτερες δυνατότητές της. Το Edge computing είναι ένας άλλος ανοιχτός τομέας έρευνας για την τεχνολογία IoT και Ψηφιακών διδύμων.



## **Κεφάλαιο 7 Μελλοντικές Προκλήσεις Έρευνας του Ψηφιακού Διδύμου**

Υπάρχει μια σειρά από προκλήσεις που αντιμετωπίζονται κατά την προσπάθεια αντιμετώπισης ανοιχτών ερευνητικών ερωτημάτων για ψηφιακά δίδυμα, όπως συζητείται παρακάτω.

### **7.1. Πολυεπιστημονικότητα**

Μια σημαντική πρόκληση προέρχεται από τα πολυεπιστημονικά περιβάλλοντα που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη. Αυτά προκύπτουν λόγω των πολλών διαφορετικών ερευνητικών πεδίων που εμπλέκονται στη συνεργασία, γεγονός που μπορεί να βοηθήσει στην πρόοδο, αλλά και ένα εμπόδιο καθώς οι στόχοι σε διάφορους τομείς οδηγούν σε διαφορετικές κατευθύνσεις για την έρευνα, οδηγώντας τελικά σε πιο αργά αποτελέσματα.

### **7.2. Τυποποίηση**

Όπως τονίζεται σε αυτό το έγγραφο και φαίνεται σε πολλές νέες και αναδυόμενες τεχνολογίες, μια άλλη πρόκληση που αντιμετωπίζει το ψηφιακό δίδυμο είναι η έλλειψη τυποποίησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ασυμφωνίες μεταξύ των έργων στο ψηφιακό δίδυμο. Ένας παράγοντας που συμβάλλει είναι η ποικιλία των ορισμών που παρατηρούνται. Αυτό, σε συνδυασμό με την απουσία τυποποίησης, αποτελεί πρόκληση, επιβραδύνοντας την πρόοδο της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων.

### **7.3. Παγκόσμιες Πρόοδοι**

Με τις τεράστιες προόδους στα ψηφιακά δίδυμα και τις τεχνολογίες τους, έρχονται πολλά οφέλη αλλά και προκλήσεις. Οι φουτουριστικοί και μη ρεαλιστικοί στόχοι οδηγούν σε

βραδύτερη υιοθέτηση και ανάπτυξη νέων προσαρμοσμένων τεχνολογιών και απόψεων. Με την ανακάλυψη της Βιομηχανίας 4.0 και την ταχεία ανάπτυξη της ψηφιοποίησης έρχεται η ανάπτυξη των τεχνολογιών με διαφορετικούς ρυθμούς. Ωστόσο, η επιταχυνόμενη ανάπτυξη οδηγεί σε μια σειρά προκλήσεων με τη συνδεσιμότητα και την ανταλλαγή δεδομένων. Για παράδειγμα, τα συστήματα υποστήριξης ή οι συσκευές IoT ενδέχεται να μην είναι συμβατά με το ψηφιακό δίδυμο. Αυτή η ανάπτυξη με διαφορετικούς ρυθμούς μπορεί επίσης να δημιουργήσει νέες προκλήσεις για την ασφάλεια όσον αφορά την έκθεση των τρωτών σημείων.

## Συμπεράσματα

Η ανάπτυξη της χρήσης Ψηφιακών διδύμων έχει δει μια στροφή τα τελευταία χρόνια, που διευκολύνεται από την αύξηση του αριθμού των δημοσιευμένων εργασιών και των ηγετών του κλάδου που επενδύουν σημαντικά στην ανάπτυξη της τεχνολογίας Ψηφιακών διδύμων. Δεν θα ήταν δυνατό χωρίς την ίδια ανάπτυξη στα πεδία AI, IoT και IIoT, τα οποία γίνονται βασικοί παράγοντες για τα ψηφιακά δίδυμα. Η πλειονότητα της έρευνας Ψηφιακών διδύμων επικεντρώνεται στον κατασκευαστικό τομέα, όπως αποδεικνύεται από το μεγάλο ποσοστό των εργασιών σε αυτόν τον τομέα που εξετάστηκαν παραπάνω. Ο αριθμός των εγγράφων που βρέθηκαν στην κατασκευή είναι αισθητά υψηλότερος σε σύγκριση με τις εργασίες που συζητούν τα ψηφιακά δίδυμα για έξυπνες πόλεις και την υγειονομική περίθαλψη, υπογραμμίζοντας τα κενά στην έρευνα για αυτούς τους τομείς.

Η τεχνητή νοημοσύνη γίνεται συστατικό στο ψηφιακό δίδυμο και η εξερεύνηση που μπορούν να εφαρμοστούν αυτοί οι αλγόριθμοι είναι μια άλλη οδός ανοιχτής έρευνας. Τα αποτελέσματα της τεχνητής νοημοσύνης σε συνδυασμό με το ψηφιακό δίδυμο είναι θέματα μεταξύ των εκδόσεων αλλά σε μικρή κλίμακα. Η συναρπαστική και αναπόφευκτη μελλοντική έρευνα θα διερευνήσει την κλιμάκωση μικρότερων επιτυχημένων έργων Ψηφιακών διδύμων και AI. Ένα σημαντικό εύρημα είναι η έλλειψη τυποποίησης και παρανοήσεων με τους ορισμούς για τα Ψηφιακά Δίδυμα. Η αντιμετώπιση των προκλήσεων με την τυποποίηση διασφαλίζει ότι οι μελλοντικές εξελίξεις είναι στην πραγματικότητα ψηφιακά δίδυμα και όχι λανθασμένα καθορισμένες έννοιες.

Η ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε παραπάνω υπογραμμίζει δύο άλλους τομείς αυξανόμενου ενδιαφέροντος, το ψηφιακό δίδυμο για την υγειονομική περίθαλψη και τις έξυπνες πόλεις. Επομένως, ο λόγος για τον οποίο η εργασία συμβάλλει σε μια κατηγορηματική ανασκόπηση που περιλαμβάνει όχι μόνο τη μεταποίηση, αλλά και την υγειονομική περίθαλψη και τις έξυπνες πόλεις. Η εργασία εξετάζει κάθε τομέα, υπογραμμίζοντας τον τρόπο με τον οποίο οι ερευνητές αναπτύσσουν ψηφιακά δίδυμα, ενώ εντοπίζει επίσης τις προκλήσεις και τις βασικές τεχνολογίες που επιτρέπουν την εφαρμογή, βοηθώντας έτσι τη μελλοντική εργασία. Το έγγραφο εντοπίζει επίσης την έλλειψη σαφών ορισμών για ένα ψηφιακό δίδυμο, δείχνοντας πώς δεν υπάρχει

πραγματική διαφορά στον ορισμό από τότε που επινοήθηκε αρχικά το 2012. Είναι επίσης προφανές ότι ορισμένες έρευνες λανθασμένα προσδιορίζουν τα ψηφιακά δίδυμα ως μοντέλα και σκιές. Σε όλη τη βιβλιογραφία, υπάρχουν παραδείγματα έργων Ψηφιακών διδύμων μικρής κλίμακας, αλλά έλλειψη έργων μεγάλης κλίμακας. Ένας λόγος για αυτό είναι η έλλειψη γνώσης τομέα σχετικά με την επιτυχή κλιμάκωση μεγαλύτερων Ψηφιακών διδύμων. Έγγραφα σχετικά με τη χρήση Ψηφιακών διδύμων στην κατασκευή προσδιορίζουν μια σειρά από δημοσιεύσεις με ιδιαίτερη ανάπτυξη στην υγεία των μηχανών και στην προγνωστική συντήρηση. Το ψηφιακό δίδυμο για την υγειονομική περίθαλψη βασίζεται σε παρόμοια θέματα όσον αφορά την κατάσταση της υγείας και την παρακολούθηση, με μια σειρά εγγράφων που διερευνούν τη χρήση των ψηφιακών διδύμων για προγνωστικές αναλύσεις ανθρώπων. Το έγγραφο υπογραμμίζει επίσης τις εξελίξεις στην εξ αποστάσεως χειρουργική και τη σημασία της έρευνας για τη συγχώνευση δεδομένων, κυρίως λόγω της φύσης των ευαίσθητων δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην υγειονομική περίθαλψη. Η έρευνα για έξυπνες πόλεις είναι περιορισμένη, αλλά το δυναμικό διερεύνησης των ψηφιακών διδύμων για συστήματα διαχείρισης της κυκλοφορίας και τις εξελίξεις έξυπνων πόλεων αυξάνεται.

Παρά το γεγονός ότι ο τομέας του ψηφιακού διδύμου βρίσκεται στα σπάργανα και κυριαρχείται από την κατασκευή, αυτή η ανασκόπηση ανοίγει το δρόμο για περαιτέρω εργασία. Η εργασία παρέχει μια βάση για άλλους ερευνητές να διερευνήσουν περαιτέρω το πεδίο.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία Ψηφιακών διδύμων έχει συγκεντρώσει σημαντική προσοχή τόσο από τη βιομηχανία όσο και από τον ακαδημαϊκό κόσμο. Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για αυτήν την τεχνολογία στη βιβλιογραφία, καθώς ο όρος εφαρμόζεται σε διαφορετικές περιοχές εστίασης σε διαφορετικούς κλάδους. Η έννοια του ψηφιακού διδύμου μπορεί να περιγραφεί ως η απρόσκοπτη ενοποίηση δεδομένων μεταξύ μιας φυσικής και εικονικής μηχανής και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η τεχνολογία Ψηφιακών διδύμων χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στους τομείς της αστροναυτικής και της αεροδιαστημικής από τη NASA για την αποστολή εξερεύνησης σελήνης Apollo 13 και Mars Rover Curiosity. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι το εύρος και ο αντίκτυπος

των ψηφιακών διδύμων συνεχίζουν να επεκτείνονται, καθιστώντας το μια ταχέως αναπτυσσόμενη λύση πληροφορικής σε διάφορους κλάδους.

Όπως παρουσιάζεται σε αυτό το άρθρο, τα περισσότερα από τα χειρόγραφα που δημοσιεύονται σε ακαδημαϊκά περιοδικά συζητούν την εφαρμογή των λύσεων Ψηφιακών διδύμων στην κατασκευή, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0. Η έρευνα σχετικά με τις λύσεις Ψηφιακών διδύμων στην κατασκευή ασχολείται με τον προγραμματισμό και τον έλεγχο της παραγωγής, ο οποίος παίζει κεντρικό ρόλο στην ενσωμάτωση όλων των δεδομένων σε ένα σύστημα παραγωγής. Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ένας άλλος τομέας όπου οι περιπτώσεις χρήσης Ψηφιακών διδύμων εξετάζονται στη βιβλιογραφία. Οι περιπτώσεις χρήσης στον κλάδο των κατασκευών και της υγειονομικής περίθαλψης αυξάνονται επίσης. Στον κατασκευαστικό κλάδο, η ιδέα Ψηφιακών διδύμων και οι κινητές συσκευές και τα wearables σε ένα εργοτάξιο μπορούν να βοηθήσουν στην καλύτερη αναπαράσταση του κατασκευασμένου έναντι του σχεδιασμένου έργου ανά πάσα στιγμή. Επιπλέον, βοηθά στη μείωση του αριθμού των σφαλμάτων και των επαναλήψεων, επιτρέποντας την ανατροφοδότηση ενημερωμένων πληροφοριών στο πεδίο. Οι λύσεις Ψηφιακών διδύμων βοηθούν τον κλάδο της υγείας να ανακαλύψει μη ανεπτυγμένες ασθένειες, να πειραματιστεί με θεραπείες και να βελτιώσει την προετοιμασία για χειρουργική επέμβαση. Η λήψη ενός ακριβούς πλήρους διαστάσεων μοντέλου ανθρώπινου σώματος θα βοηθήσει τους γιατρούς να ανακαλύψουν μη ανεπτυγμένες ασθένειες, να πειραματιστούν με θεραπείες και να βελτιώσουν την προετοιμασία για τη χειρουργική επέμβαση. Οι ερευνητές εργάζονται για την ανάπτυξη Ψηφιακών διδύμων για την ανάλυση του ανθρώπινου σώματος και έχουν σημειωθεί σημαντικές προόδους. Το έργο Living Heart είναι μια κοινή τεχνολογία για κλινική διάγνωση, δοκιμές, σχεδιασμό ιατρικών συσκευών και εκπαίδευση και κατάρτιση.

Η πρόοδος στο AI, το IoT και το cloud computing και η σχετική ισχύς αυτών των τεχνολογιών δημιούργησαν ένα υπόβαθρο για τις λύσεις Ψηφιακών διδύμων να εξελιχθούν γρήγορα και να βρουν εφαρμογές στην κατασκευή, την εφοδιαστική αλυσίδα, τις βιοεπιστήμες, τη γεωργία, την ενέργεια κ.λπ. Ενεργοποιήθηκε η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) Ψηφιακών διδύμων για προσομοίωση ενός πολύπλοκου πραγματικού συστήματος. Αξιοποιεί δεδομένα που συλλέγονται από συσκευές IoT για να μαθαίνει και να λειτουργεί

παράλληλα με τα συστήματα παραγωγής του πραγματικού κόσμου, εντοπίζοντας συνεχώς τομείς βελτίωσης και υποστηρίζοντας τη λήψη τακτικών αποφάσεων. Βοηθά επίσης στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των συστημάτων για την αύξηση της αποδοτικότητας και την αποφυγή δαπανηρού επανασχεδιασμού κατά την υλοποίηση.

Η αυξανόμενη ζήτηση για αυτοματισμούς σε διάφορους κλάδους είναι οι αναμενόμενοι παράγοντες που θα πυροδοτήσουν την υψηλή ζήτηση για την πλατφόρμα Ψηφιακών διδύμων κατά την περίοδο πρόβλεψης. Καθώς ανακάμπουμε από την πανδημία, οι λύσεις Ψηφιακών διδύμων είναι έτοιμες να διαδραματίσουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο σε διαφορετικούς κλάδους. Τα πλεονεκτήματα της δημιουργίας μιας λύσης Ψηφιακών διδύμων είναι πολύ τεράστια και δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί πλήρως. Ενώ υπάρχουν προκλήσεις για την αντιμετώπιση της ποιότητας και της ασφάλειας των δεδομένων, της αυξημένης ζήτησης ενέργειας και αποθήκευσης και της ενσωμάτωσης με τις υπάρχουσες υποδομές, οι λύσεις Ψηφιακών διδύμων ευδοκimoύν για να προσφέρουν μια εξαιρετικά προηγμένη ψηφιακή επανάσταση για να κάνουν τον κόσμο καλύτερο μέρος για την ανθρωπότητα. Στο μέλλον, τα ψηφιακά δίδυμα θα επεκταθεί σε περισσότερες περιπτώσεις χρήσης και βιομηχανίες. Οι λύσεις θα συνδυαστούν με περισσότερες τεχνολογίες, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR), για μια καθηλωτική εμπειρία και δυνατότητες AI για καλύτερες συνδέσεις, πληροφορίες και αναλυτικά στοιχεία. Επιπλέον, περισσότερες τεχνολογίες μας δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούμε λύσεις Ψηφιακών διδύμων, αφαιρώντας την ανάγκη να ελέγχουμε το «πραγματικό» πράγμα. Αυτές οι εκθετικά υψηλότερες γνώσεις και αναλυτικά στοιχεία, με τη σειρά τους, οδηγούν σε ακόμη περισσότερες δυνατότητες για εφαρμογές των λύσεων Ψηφιακών διδύμων σε πολύπλοκες λειτουργίες.

## Βιβλιογραφία

- 1 H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, Aug. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- 2 F. Calisir and O. Korhan, Eds., *Industrial Engineering in the Digital Disruption Era*. in Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-42416-9.
- 3 C. O. Klingenberg, M. A. V. Borges, and J. A. do V. Antunes, "Industry 4.0: What makes it a revolution? A historical framework to understand the phenomenon," *Technol. Soc.*, vol. 70, p. 102009, Aug. 2022, doi:
- 4 M. Ghita, B. Siham, M. Hicham, A. Abdelhafid, and D. Laurent, "Digital twins: development and implementation challenges within Moroccan context," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 5, p. 885, May 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2691-6.
- 5 L. Cordeiro, R. Barreto, R. Barcelos, M. Oliveira, V. Lucena, and P. Maciel, "Agile Development Methodology for Embedded Systems: A Platform-Based Design Approach," in *14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS'07)*, IEEE, Mar. 2007, pp. 195–202. doi: 10.1109/ECBS.2007.16
- 6 Y. Lu, X. Huang, K. Zhang, S. Maharjan, and Y. Zhang, "Low-Latency Federated Learning and Blockchain for Edge Association in Digital Twin Empowered 6G Networks," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 17, no. 7, pp. 5098–5107, Jul. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3017668.
- 7 C. Anderson, *The Long Tail: Why the Future of Business Is Selling Less of More*, Hachette Books. 2006.
- 8 G. Mylonas, A. Kalogeras, G. Kalogeras, C. Anagnostopoulos, C. Alexakos, and L. Munoz, "Digital Twins From Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143222–143249, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120843.
- 9 O. Kovacs, "The dark corners of industry 4.0 – Grounding economic governance 2.0," *Technol. Soc.*, vol. 55, pp. 140–145, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.techsoc.2018.07.009.

- 10 M. Schluse and J. Rossmann, "From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems," in *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, IEEE, Oct. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/SysEng.2016.7753162.
- 11 N. Rosenberg, "Inside the Black BoX: Technology and Economics, Cambridge University Press," 1982.
- 12 M. Grieves and J. Vickers, "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems," in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- 13 M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, and J. Rossmann, "Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1722–1731, Apr. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2804917.
- 14 T. F. Bresnahan and M. Trajtenberg, "General purpose technologies 'Engines of growth'?", *J. Econom.*, vol. 65, no. 1, pp. 83–108, Jan. 1995, doi: 10.1016/0304-4076(94)01598-T.
- 15 O. Kovacs, "The dark corners of industry 4.0 – Grounding economic governance 2.0," *Technol. Soc.*, vol. 55, pp. 140–145, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.techsoc.2018.07.009.
- 16 K. Diethelm, *The Analysis of Fractional Differential Equations*, vol. 2004. in *Lecture Notes in Mathematics*, vol. 2004. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. doi: 10.1007/978-3-642-14574-2.
- 17 E. Hobsbawm, "Da Revoluçã~o Industrial Inglesa Ao Imperialismo, 6a. Ed., Forense Universit´aria, Rio de Janeiro," 2016.
- 18 M. Swink and A. Nair, "Capturing the competitive advantages of AMT: Design-manufacturing integration as a complementary asset," *J. Oper. Manag.*, vol. 25, no. 3, pp. 736–754, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jom.2006.07.001.
- 19 T. Van Nguyen, H. T. Pham, H. M. Ha, and T. T. T. Tran, "An integrated model of



- supply chain quality management, Industry 3.5 and innovation to improve manufacturers' performance – a case study of Vietnam," *Int. J. Logist. Res. Appl.*, pp. 1–23, Apr. 2022, doi: 10.1080/13675567.2022.2059457.
- 20 Y. Cohen, M. Faccio, F. Pilati, and X. Yao, "Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 9, pp. 3565–3577, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04595-0.
- 21 E. Hobsbawm, "Da Revolução Industrial Inglesa Ao Imperialismo, 6a. Ed., Forense Universitária, Rio de Janeiro," 2016.
- 22 R. Chen, C. Jin, Y. Zhang, J. Dai, and X. Lv, "Digital Twin for Equipment Management of Intelligent Railway Station," in *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, IEEE, Jul. 2021, pp
- 23 P. B. Evans and T. S. Wurster, "Strategy and the new economics of information.," *Harv. Bus. Rev.*, vol. 75, no. 5, pp. 70–82, 1997, [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10170332>
- 24 L. Cordeiro, R. Barreto, R. Barcelos, M. Oliveira, V. Lucena, and P. Maciel, "Agile Development Methodology for Embedded Systems: A Platform-Based Design Approach," in *14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS'07)*, IEEE, Mar. 2007, pp. 195–202. doi: 10.1109/ECBS.2007.16.
- 25 Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), 811–833. <https://doi.org/10.3926/jiem.1940>
- 26 A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358
- 27 R. Saracco, "Digital Twins: Bridging Physical Space and Cyberspace," *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 52, no. 12, pp. 58–64, Dec. 2019, doi: 10.1109/MC.2019.2942803.
- 28 Otto, B., Steinbuß, S., Teuscher, A., Lohmann, S., Auer, S., Bader, S.,

- Bastiaansen, H., Bauer, H., Birnstil, P., Böhmer, M., Bohn, J., Böge, G., Brettner, U., Brost, G., Ceballos, G., Cirullies, J., Corsi, E., Dalmolen, S., Danielsen, S., Duisberg, A., et al. (2019). International data spaces reference architecture model version 3.0. April.
- 29 A. Fuller, Z. Fan, C. Day, and C. Barlow, "Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- 30 M. Ferrary and M. Granovetter, "The role of venture capital firms in Silicon Valley's complex innovation network," *Econ. Soc.*, vol. 38, no. 2, pp. 326–359, May 2009, doi: 10.1080/03085140902786827.
- 31 G. Bhatti, H. Mohan, and R. Raja Singh, "Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 141, p. 110801, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110801.
- 32 D. S. Landes, "The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present, Cambridge University Press," 2003.
- 33 M. H. Selamat, M. S. Othman, N. H. M. Shamsuddin, N. I. M. Zukepli, and A. F. Hassan, "A review on open source architecture in Geographical Information Systems," in *2012 International Conference on Computer & Information Science (ICCIS)*, IEEE, Jun. 2012, pp. 962–966. doi: 10.1109/ICCISci.2012.6297165.
- 34 Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2015). Design principles for industrie 4.0 scenarios: A literature review. Technische Universität Dortmund, 1(1), 4–16. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>
- 35 A. Sharif Ullah, "Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 39, pp. 1–13, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.aei.2018.11.003.
- 36 K. Reifsnider and P. Majumdar, "Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management," in *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Apr. 2013. doi: 10.2514/6.2013-1578.
- 37 Schweichhart, K. (2019). RAMI 4.0 reference architectural model for industrie 4.0.

- InTech, 66(2), 15.
- 38 Aheleroff, S., Xu, X., Zhong, R. Y., & Lu, Y. (2021). Digital twin as a service (DTaaS) in industry 4.0: An architecture reference model. *Advanced Engineering Informatics*, 47(August 2020), 101225. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
- 39 G. Bhatti, H. Mohan, and R. Raja Singh, "Towards the future of smart electric vehicles: Digital twin technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 141, p. 110801, May 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110801.
- 40 D. P. F. Moller, H. Vakilzadian, and W. Hou, "Intelligent Manufacturing with Digital Twin," in *2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, IEEE, May 2021, pp. 413–418. doi: 10.1109/EIT51626.2021.9491874.
- 41 T. Van Nguyen, H. T. Pham, H. M. Ha, and T. T. T. Tran, "An integrated model of supply chain quality management, Industry 3.5 and innovation to improve manufacturers' performance – a case study of Vietnam," *Int. J. Logist. Res. Appl.*, pp. 1–23, Apr. 2022, doi: 10.1080/13675567.2022.2059457.
- 42 Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (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>
- 43 A. Sharif Ullah, "Modeling and simulation of complex manufacturing phenomena using sensor signals from the perspective of Industry 4.0," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 39, pp. 1–13, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.aei.2018.11.003.
- 44 R. da Silva Mendonça, S. de Oliveira Lins, I. V. de Bessa, F. A. de Carvalho Ayres, R. L. P. de Medeiros, and V. F. de Lucena, "Digital Twin Applications: A Survey of Recent Advances and Challenges," *Processes*, vol. 10, no. 4, p. 744, Apr. 2022, doi: 10.3390/pr10040744.
- 45 Arabnia, H. R., Deligiannidis, L., & Tinetti, F. G. (2018). *Frontiers in education. Computer Science and Computer Engineering*.
- 46 M. Swink and A. Nair, "Capturing the competitive advantages of AMT: Design-manufacturing integration as a complementary asset," *J. Oper. Manag.*, vol. 25, no. 3, pp. 736–754, Apr. 2007, doi: 10.1016/j.jom.2006.07.001.
- 47 W. Zhai, S. Sun, and G. Zhang, "Reshoring of American manufacturing companies

- from China,” *Oper. Manag. Res.*, vol. 9, no. 3–4, pp. 62–74, Dec. 2016, doi: 10.1007/s12063-016-0114-z.
- 48 H. Kagermann, W. Wahlster, and J. Helbig, “Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4, 0 Working Group,” 2013.
- 49 H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, “Industry 4.0,” *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 239–242, Aug. 2014, doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- 50 Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication - a whitepaper by Dr. Michael Grieves. White Paper, March, 1–7.
- 51 Hofmann, E., & Rüsç, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- 52 M. Schluse, M. Priggemeyer, L. Atorf, and J. Rossmann, “Experimentable Digital Twins—Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 1722–1731, Apr. 2018, doi: 10.1109/TII.2018.2804917.
- 53 K. Reifsnider and P. Majumdar, “Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management,” in *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Apr. 2013. doi: 10.2514/6.2013-1578.
- 54 M. Schluse and J. Rossmann, “From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems,” in *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, IEEE, Oct. 2016, pp. 1–6. doi: 10.1109/SysEng.2016.7753162.
- 55 T. Gabor, L. Belzner, M. Kiermeier, M. T. Beck, and A. Neitz, “A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems,” in *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, IEEE, Jul. 2016, pp. 374–379. doi: 10.1109/ICAC.2016.29.
- 56 G. N. Schroeder, C. Steinmetz, C. E. Pereira, and D. B. Espindola, “Digital Twin Data Modeling with AutomationML and a Communication Methodology for Data

- Exchange,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 30, pp. 12–17, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.11.115.
- 57 WoT, “Architecture W3C Recommendation.,” *Web of Things*, 2020. <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-architecture-20200409>
- 58 Y. Cohen, M. Faccio, F. Pilati, and X. Yao, “Design and management of digital manufacturing and assembly systems in the Industry 4.0 era,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 105, no. 9, pp. 3565–3577, Dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04595-0.
- 59 Bhandari, P. (2020). An introduction to qualitative research. <https://www.scribbr.com/methodology/qualitative-research/>
- 60 J. Bao, D. Guo, J. Li, and J. Zhang, “The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing,” *Enterp. Inf. Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 534–556, Apr. 2019, doi: 10.1080/17517575.2018.1526324.
- 61 Schleich, B., Anwer, 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>
- 62 M. Grieves and J. Vickers, “Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,” in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 85–113. doi: 10.1007/978-3-319-38756-7\_4.
- 63 Y. Lu, X. Huang, K. Zhang, S. Maharjan, and Y. Zhang, “Low-Latency Federated Learning and Blockchain for Edge Association in Digital Twin Empowered 6G Networks,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 17, no. 7, pp. 5098–5107, Jul. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3017668.
- 64 H. Ikävalko, P. Turkama, and A. Smedlund, “Value Creation in the Internet of Things: Mapping Business Models and Ecosystem Roles,” *Technol. Innov. Manag. Rev.*, vol. 8, no. 3, pp. 5–15, Mar. 2018, doi: 10.22215/timreview/1142.
- 65 Rajendran, S., & Pagel, E. (2020). Insights on next-generation manufacturing of smart devices using text analytics. *Heliyon*, 6(7), e04491. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04491>
- 66 J. Döllner, “Geospatial Artificial Intelligence: Potentials of Machine Learning for 3D

- Point Clouds and Geospatial Digital Twins,” *PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinf. Sci.*, vol. 88, no. 1, pp. 15–24, Feb. 2020, doi: 10.1007/s41064-020-00102-3.
- 67 K. Mubarok, X. Xu, X. Ye, R. Y. Zhong, and Y. Lu, “Manufacturing service reliability assessment in cloud manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 940–946, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.074.
- 68 L. F. C. S. Durão, S. Haag, R. Anderl, K. Schützer, and E. Zancul, “Digital Twin Requirements in the Context of Industry 4.0,” 2018, pp. 204–214. doi: 10.1007/978-3-030-01614-2\_19.
- 69 K. Mubarok, X. Xu, X. Ye, R. Y. Zhong, and Y. Lu, “Manufacturing service reliability assessment in cloud manufacturing,” *Procedia CIRP*, vol. 72, pp. 940–946, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.074.
- 70 R. Saracco, “Digital Twins: Bridging Physical Space and Cyberspace,” *Computer (Long. Beach. Calif.)*, vol. 52, no. 12, pp. 58–64, Dec. 2019, doi: 10.1109/MC.2019.2942803.
- 71 M. Baranidharan, D. Kalel, and R. Raja Singh, “Potentials and Challenges of Digital Twin: Toward Industry 4.0.,” in *Smart Grids and Green Energy Systems*, 2022, pp. 75–90.
- 72 WoT, “Architecture W3C Recommendation.,” *Web of Things*, 2020. <https://www.w3.org/TR/2020/REC-wot-architecture-20200409>
- 73 M. Ferrary and M. Granovetter, “The role of venture capital firms in Silicon Valley’s complex innovation network,” *Econ. Soc.*, vol. 38, no. 2, pp. 326–359, May 2009, doi: 10.1080/03085140902786827.
- 74 Cai, Y., Starly, B., Cohen, P., & Lee, Y. S. (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>
- 75 M. H. Selamat, M. S. Othman, N. H. M. Shamsuddin, N. I. M. Zukepli, and A. F. Hassan, “A review on open source architecture in Geographical Information Systems,” in *2012 International Conference on Computer & Information Science (ICCI/S)*, IEEE, Jun. 2012, pp. 962–966. doi: 10.1109/ICCI/S.2012.6297165.

- 76 Aheleroff, S., Mostashiri, N., Xu, X., & Zhong, R. Y. (2021). Mass personalisation as a service in industry 4.0: A resilient response case study. *Advanced Engineering Informatics*, 50(June), 101438. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101438> ,
- 77 B. Ashtari Talkhestani *et al.*, “An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System,” - *Autom.*, vol. 67, no. 9, pp. 762–782, Sep. 2019, doi: 10.1515/auto-2019-0039.
- 78 Bader, S., Barnstedt, E., Bedenbender, H., Billman, M., Boss, B., & Braunmandl, A. (2020). Details of the asset administration shell part 1 - the exchange of information between partners in the value chain of industrie 4.0. *Plattform Industrie*, 4(0), 473.
- 79 N. Rosenberg, “Inside the Black BoX: Technology and Economics, Cambridge University Press,” 1982.
- 80 H. Kagermann, “Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0,” in *Management of Permanent Change*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, pp. 23–45. doi: 10.1007/978-3-658-05014-6\_2.
- 81 W. Zhai, S. Sun, and G. Zhang, “Reshoring of American manufacturing companies from China,” *Oper. Manag. Res.*, vol. 9, no. 3–4, pp. 62–74, Dec. 2016, doi: 10.1007/s12063-016-0114-z.
- 82 Pribiš, R., Beňo, L., & Drahoš, P. (2021). Asset administration shell design methodology using embedded opc unified architecture server. *Electronics (Switzerland)*, 10(20), 2520. <https://doi.org/10.3390/electronics10202520>
- 83 D. S. Landes, “The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present, Cambridge University Press,” 2003.
- 84 Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su10103821>
- 85 Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C. Y., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935–3953. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- 86 Santos, R., Basto, J., Alcalá, S. G. S., Frazzon, E., & Azevedo, A. (2019). Industrial IoT integrated with simulation -A digital twin approach to support real-time decision making. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, July (pp. 816–828). IEOM Society International
- 87 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>

- 88 Silva, H. D., Azevedo, M., & Soares, A. L. (2021). A vision for a platform-based digital-twin ecosystem. *IFAC-PapersOnline*, 54(1), 761–766. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.088>
- 89 J. Bao, D. Guo, J. Li, and J. Zhang, “The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing,” *Enterp. Inf. Syst.*, vol. 13, no. 4, pp. 534–556, Apr. 2019, doi: 10.1080/17517575.2018.1526324.
- 90 Otto, B. (2022). The evolution of data spaces. In B. Otto, M. ten Hompel, & S. Wrobel (Eds.), *Designing data spaces*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5_1)
- 91 T. F. Bresnahan and M. Trajtenberg, “General purpose technologies ‘Engines of growth’?,” *J. Econom.*, vol. 65, no. 1, pp. 83–108, Jan. 1995, doi: 10.1016/0304-4076(94)01598-T.
- 92 Tissir, S., Fezazi, S. E., & Cherrafi, A. (2020). Industry 4.0 impact on lean manufacturing: literature review. 2020 13th International Colloquium of Logistics and Supply Chain Management, LOGISTIQUA 2020, 2–4. <https://doi.org/10.1109/LOGISTIQUA49782.2020.9353889>
- 93 Otto, B. (2022). The evolution of data spaces. In B. Otto, M. ten Hompel, & S. Wrobel (Eds.), *Designing data spaces*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5_1)
- 94 IDSA. (2019). *IDS – A STANDARD FOR DATA SOVEREIGNTY AND AN INDISPENSABLE ELEMENT OF DATA ECOSYSTEM*. International Data Spaces Association. Whitepaper.
- 95 Ocker, F., Urban, C., Vogel-Heuser, B., & Diedrich, C. (2021). Leveraging the asset administration shell for agent-based production systems. *IFAC-PapersOnline*, 54(1), 837–844. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.08.186>
- 96 Huber, M., Wessel, S., Brost, G., & Menz, N. (2022). Building trust in data spaces. In B. Otto, M. ten Hompel, & S. Wrobel (Eds.), *Designing data spaces*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5_9)
- 97 Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I. K., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- 98 Moreno, T., Almeida, A., Ferreira, F., Caldas, N., Toscano, C., & Azevedo, A. (2021). Digital twin for manufacturing equipment in industry 4.0. *Advances in Transdisciplinary Engineering*, 15, 362–367. <https://doi.org/10.3233/ATDE210062>
- 99 B.J. Zirger, J.L. Hartley, The Effect of Acceleration Techniques On Product Development Time, *IEEE Trans. Eng. Manage.* 43 (2) (1996) 143–152.
- 100 Jianxin Jiao, Timothy Simpson, Zahed Siddique, Product Family Design and Platform-Based Product Development: A State-Of-The-Art Review, *J. Intell. Manuf.* 18 (2007) 5–29, <https://doi.org/10.1007/S10845-007-0003-2>.
- 101 E. Gromova, An Example of A Digital Product Design In Russian Industry. *AIP Conference Proceedings*, 2114(1), Exploring Resources, Process and Design FOR Sustainable Urban Development: Proceedings of The 5th International



- Conference On Engineering, Technology, and Industrial Application (Icetia) 2018, Surakarta, Indonesia (12–13 December 2018), 2019.
- 102 Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297.
- 103 T. Tomiyama, E. Lutters, R. Stark, M. Abramovici, Development capabilities for smart products, *CIRP Ann.* 68 (2) (2019) 727–750
- 104 S.D. Eppinger, K.T. Ulrich, *Product Design and Development*, sixth ed., McGrawHill Education, New York, 2015
- 105 Q. Qi, F. Tao, Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison, *IEEE Access* 6 (2018) 3585–3593.
- 106 Fei Tao, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang, Fangyuan Sui, Digital Twin-Driven Product Design, *Manufacturing and Service with Big Data*, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94 (9) (2018) 3563–3576.
- 107 X. Ma, F. Tao, M. Zhang, T. Wang, Y. Zuo, Digital Twin Enhanced HumanMachine Interaction in Product Lifecycle, *Procedia CIRP* 83 (2019) 789–793
- 108 L. Wright, S. Davidson, How to tell the difference between a model and a digital  
109 twin, *Adv. Model. Simul. Eng. Sci.* 7 (1) (2020) 1–13.
- 110 J. Cheng, H. Zhang, F. Tao, C. Juang, DT-II: Digital Twin Enhanced Industrial Internet Reference Framework Towards Smart Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 62, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, April 2020, vol. 62, 2020.
- 111 V. Arrichiello, P. Gualeni, Systems Engineering and Digital Twin: A Vision for The Future Of Cruise Ships Design, *Production And Operations*, *Int. J. Interact. Des. Manuf.* 14 (1) (2020) 115–122.
- 112 B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu, S. Wartzack, Shaping The Digital Twin for Design and Production Engineering, *CIRP Ann. Manuf. Technol.* 66 (1) (2017) 1–144.
- 113 A. Detzner, M. Eigner, A Digital Twin for Root Cause Analysis and Product Quality Monitoring. *International Design Conference - Design 2018*, 2018
- 114 M. Groen, G. Zijlstra, D. San-Martin, J. Post, J.Th.M. De Hosson, Product Shape Change by Internal Stresses, *Mater. Des.* 157 (2018) 492–500.
- 115 Young-Soo Han, Jaejoon Lee, Jungmin Lee, Wonhyuk Lee, Kyungho Lee, 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 32 (7) (2019) 658–668, <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599440>.
- 116 P. Zheng, A. Sivabalan, A Generic Tri-Model-Based Approach for Product-Level Digital Twin Development in A Smart Manufacturing Environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 64, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, August 2020, vol. 64, 2020
- 117 Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen Lu, Andrew Nee, Digital Twin-Driven Product Design

- Framework, *Int. J. Prod. Res.* 1–19 (2018), <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>.
- 118 118(Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297.)
- 119 (Michael Grieves, *Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication*, 2015. Available: [https://Theengineer.Markallengroup.Com/Production/Content/Uploads/2014/12/Digital\\_Twin\\_White\\_Paper\\_Dr\\_Grieves.Pdf](https://Theengineer.Markallengroup.Com/Production/Content/Uploads/2014/12/Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.Pdf).)
- 120 G.N. Schroeder, C. Steinmetz, C.E. Pereira, D.B. Espindola, Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange, *IFAC-PapersOnLine* 49 (30) (2016) 12–17)
- 121 Gerald Glocker, *A Primer On Digital Twins In The Iota Primer On Digital Twins In The Iot*. Retrieved From [https://Blog.Bosch-Si.Com/Bosch-Iot-Suite/A-Primer-On -Digital-Twins-In-The-Iot/](https://Blog.Bosch-Si.Com/Bosch-Iot-Suite/A-Primer-On-Digital-Twins-In-The-Iot/).
- 122 Günther Schuh, Eric Rebentisch, Michael Riesener, Thorben Ipers, Christian Tonnes, Merle-Hendrikje Jank, Data quality program management for digital shadows of products, *Procedia CIRP* 86 (2019) 43–48.
- 123 (Michael Grieves, *Origins of The Digital Twin Concept*, 2016. 10.13140/RG.2.2.26367.61609.) & (Michael Grieves, *Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication*, 2015. Available: [https://Theengineer.Markallengroup.Com/Production/Content/Uploads/2014/12/Digital\\_Twin\\_White\\_Paper\\_Dr\\_Grieves.Pdf](https://Theengineer.Markallengroup.Com/Production/Content/Uploads/2014/12/Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.Pdf).)
- 124 [Michael Grieves, *Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication*, 2015. Available: [https://Theengineer.Markallengroup.Com/Production/Content/Uploads/2014/12/Digital\\_Twin\\_White\\_Paper\\_Dr\\_Grieves.Pdf](https://Theengineer.Markallengroup.Com/Production/Content/Uploads/2014/12/Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.Pdf)].
- 125 T. Tomiyama, E. Lutters, R. Stark, M. Abramovici, Development capabilities for smart products, *CIRP Ann.* 68 (2) (2019) 727–750.].
- 126 Young-Soo Han, Jaejoon Lee, Jungmin Lee, Wonhyuk Lee, Kyungho Lee, 3D CAD data extraction and conversion for application of augmented/virtual reality to the construction of ships and offshore structures, *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* 32 (7) (2019) 658–668, <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599440>
- 127 V. Arrichiello, P. Gualeni, *Systems Engineering and Digital Twin: A Vision for The Future Of Cruise Ships Design, Production And Operations*, *Int. J. Interact. Des. Manuf.* 14 (1) (2020) 115–122.
- 128 Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen Lu, Andrew Nee, *Digital Twin-Driven Product Design Framework*, *Int. J. Prod. Res.* 1–19 (2018), <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- 129 I. Donoghue, L. Hannola, J. Papinniemi, A. Mikkola, The Benefits and Impact of Digital Twins in Product Development Phase of PLM, in: P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, J. Ríos (Eds.), *Product Lifecycle Management to Support*

- Industry 4.0. PLM 2018. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol. 540, Springer, Cham, 2018.
- 130 P. Zheng, A. Sivabalan, A Generic Tri-Model-Based Approach for Product-Level Digital Twin Development in A Smart Manufacturing Environment. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 64, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, August 2020, vol. 64, 2020
- 131 P. Zheng, Y. Lin, C.H. Chen, X. Xu, Smart, connected open architecture product: an IT-driven co-creation paradigm with lifecycle personalization concerns, Int. J. Prod. Res. 57 (8) (2019) 2571–2584.
- 132 R.H. Schmitt, C. Voigtmann, Sensor information as a service—component of networked production, J. Sens. Syst. 7 (1) (2018) 389–402.
- 133 R. Dong, C. She, W. Hardjawana, Y. Li, B. Vucetic, Deep learning for hybrid 5G services in mobile edge computing systems: Learn from a digital twin, IEEE Trans. Wireless Commun. 18 (10) (2019) 4692–4707
- 134 Deloitte, Digital twins Bridging the physical and digital, 2020. Retrieved from: <https://www2.deloitte.com/uk/en/insights/focus/tech-trends/2020/digital-twin-in-applications-bridging-the-physical-and-digital.html>.
- 135 .MathWorks, What is a Digital Twin? (n.d.). Retrieved from: <https://www.mathworks.com/en/discovery/digital-twin.html>], FlexSim [FlexSim, FlexSim + Digital Twin, (n.d.). Retrieved from: <https://www.flexsim.com/digital-twin/>.
- 136 Simul8, Rapidly build digital twins with Simul8, (n.d.). Retrieved from: <https://www.simul8.com/applications/digital-twins>
- 137 Gerald Glocker, A Primer On Digital Twins In The Iota Primer On Digital Twins In The Iot. Retrieved From <https://Blog.Bosch-Si.Com/Bosch-Iot-Suite/A-Primer-On-Digital-Twins-In-The-Iot/>.
- 138 F. Calisir and O. Korhan, Eds., Industrial Engineering in the Digital Disruption Era. in Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-42416-9.
- 139 G.N. Schroeder, C. Steinmetz, C.E. Pereira, D.B. Espindola, Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange, IFAC-PapersOnLine 49 (30) (2016) 12–17.
- 140 Günther Schuh, Eric Rebentisch, Michael Riesener, Thorben Ipers, Christian Tonnes, " Merle-Hendrikje Jank, Data quality program management for digital shadows of products, Procedia CIRP 86 (2019) 43–48.
- 141 S. Yun, J.H. Park, W.T. Kim, Data-centric middleware based digital twin platform for dependable cyber-physical systems, in: 2017 Ninth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), IEEE, 2017, pp. 922–926.
- 142 H. Kagermann, "Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0," in *Management of Permanent Change*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, pp. 23–45. doi: 10.1007/978-3-658-05014-6\_2.

- 143 Federal Ministry for Economic Affairs and Energy. (2019). Plattform Industrie 4.0 - RAMI4.0 – a reference framework for digitalisation. Plattform Industrie 4.0.
- 144 D. P. F. Moller, H. Vakilzadian, and W. Hou, "Intelligent Manufacturing with Digital Twin," in *2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, IEEE, May 2021, pp. 413–418. doi: 10.1109/EIT51626.2021.9491874.
- 145 H. Ikävalko, P. Turkama, and A. Smedlund, "Value Creation in the Internet of Things: Mapping Business Models and Ecosystem Roles," *Technol. Innov. Manag. Rev.*, vol. 8, no. 3, pp. 5–15, Mar. 2018, doi: 10.22215/timreview/1142.
- 146 Bazaz, S. M., Lohtander, M., & Varis, J. (2020). Availability of manufacturing data resources in digital twin. *Procedia Manufacturing*, 51, 1125–34. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.158>
- 147 R. Chen, C. Jin, Y. Zhang, J. Dai, and X. Lv, "Digital Twin for Equipment Management of Intelligent Railway Station," in *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, IEEE, Jul. 2021, pp. 374–377. doi: 10.1109/DTPI52967.2021.9540153.