

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΜΣ: Οικονομική και Διοίκηση για Μηχανικούς
Κατεύθυνση: Μηχανική της Διοίκησης

Τίτλος Μεταπτυχιακής Εργασίας

«Εφαρμόζοντας το Ψηφιακό Δίδυμο (digital twin) σε διαδικασίες
εφοδιαστικής διοίκησης»

Τίτλος Μεταπτυχιακής Εργασίας στην αγγλική γλώσσα

“Applying Digital Twin concept in supply chain operations”

Όνομα: Αθανασιάδης Γεώργιος – Παναγιώτης

ΑΜ: 2332020003

Επιβλέπων: Δρ. Ζεϊμπέκης Βασίλειος

Είμαι συγγραφέας αυτής της Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων ή ιδεών, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων.....	5
Κατάλογος Πινάκων	6
Κατάλογος Σχημάτων	7
Ευχαριστίες.....	8
Επιτελική Σύνοψη	10
1. Εισαγωγή	12
1.1 Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin).....	12
1.2 Εφαρμόζοντας το Ψηφιακό Δίδυμο στην εφοδιαστική αλυσίδα	12
1.3 Σκοπός και στόχοι εργασίας.....	13
1.4 Μεθοδολογία εκπόνησης εργασίας	13
1.5 Δομή εργασίας	14
2. Η έννοια του Digital Twin	17
2.1. Εισαγωγή.....	17
2.2 Ιστορική αναδρομή Digital Twin	18
2.3. Ορισμοί και βασικά χαρακτηριστικά της έννοιας του Ψηφιακού Δίδυμου (Digital Twin).....	19
2.3.1 Χαρακτηριστικά Ψηφιακού Διδύμου	21
2.3.2 Τύποι ψηφιακών διδύμων	22
2.4 Εφαρμογές Digital Twin	24
2.5 Τεχνολογίες Digital Twin.....	25
2.5.1 Ίντερνετ των πραγμάτων (Internet of Things ή IoT)	26
2.5.2 RFID.....	27
2.5.3. Κυβερνοφυσικά συστήματα (Cyber-physical systems ή CPS).....	28
2.5.4. Μεγάλα Δεδομένα (Big Data).....	30
2.5.5. Μηχανική Μάθηση (Machine Learning).....	34
2.5.6. Υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing).....	37
2.5.7. Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface ή API)	37
2.5.8. Επαυξημένη, εικονική και μικτή πραγματικότητα (Augmented, Virtual και Mixed Reality ή AR, VR και MR).....	38
2.6 Σύνοψη κεφαλαίου.....	39
3. Οφέλη και προκλήσεις χρήσης του Digital Twin.....	41
3.1 Εισαγωγή.....	41
3.2. Οφέλη Digital Twin	42
3.2.2 Οφέλη Digital Twin στην Εφοδιαστική Αλυσίδα	45

3.3 Βέλτιστες πρακτικές χρήσης Digital Twin στην Εφοδιαστική Αλυσίδα	48
3.3.1 Ψηφιακά Δίδυμα στον Σχεδιασμό.....	48
3.3.2 Ψηφιακά Δίδυμα στη διαχείριση αποθεμάτων	48
3.3.3 Ψηφιακά Δίδυμα Συσκευασίας.....	49
3.3.4 Ψηφιακά Δίδυμα στις Αποστολές	50
3.3.5 Ψηφιακά Δίδυμα Αποθηκών και κέντρων διανομής.....	50
3.3.6 Ψηφιακά Δίδυμα υποδομών logistics	52
3.3.7 In-plant logistics.....	53
3.4 Προκλήσεις του Digital Twin.....	54
3.4 Σύνοψη κεφαλαίου	57
4. Εφαρμογές του Ψηφιακού Διδύμου στις διαδικασίες της εφοδιαστικής αλυσίδας.....	59
4.1 Εισαγωγή.....	59
4.2. Σχεδιασμός Εφοδιαστικής Αλυσίδας με χρήση Digital Twin	60
4.2.1. Η σημασία του Ψηφιακού Διδύμου στον τομέα του Σχεδιασμού	60
4.2.2 Πρόβλεψη ζήτησης με χρήση Digital Twin.....	62
4.2.3 Aggregate Planning με χρήση Digital Twin.....	63
4.2.4 Σχεδιασμός αποθέματος με χρήση Digital Twin	64
4.2.5 Διαχείριση προμηθειών με τη χρήση του Digital Twin	64
4.3. Σύνοψη κεφαλαίου	65
5. Χρήση Ψηφιακού Διδύμου στο εκτελεστικό σκέλος της Εφοδιαστικής Αλυσίδας	67
5.1. Εισαγωγή.....	67
5.2. Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας	68
5.2.1 Μελέτη περίπτωσης διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω Digital Twin	68
5.2.2 Αναδιαμόρφωση του δικτύου της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω της πλατφόρμας Digital Twin	70
5.2.3 Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης	71
5.3 Βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας σε πραγματικό χρόνο	72
5.3.1 Μελέτη περίπτωσης βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω Digital Twin	73
5.4 Digital Twin σε Αποθήκες.....	74
5.4.1 Μελέτη περίπτωσης Digital Twin σε αποθήκη.....	75
5.5 Μεταφορές & Διανομή	79
5.5.1. Διαχείριση μεταφορών	79
5.5.2 Διαχείριση Στόλου	79
5.6. Επιστροφές (Αντίστροφη Εφοδιαστική)	82
5.6.1 RFID στην Αντίστροφη Εφοδιαστική.....	83

5.6.2 Blockchain στην Αντίστροφη Εφοδιαστική	83
5.6.3 Εστίαση στην πρόβλεψη ζήτησης βάσει δεδομένων	84
5.7 Προληπτική συντήρηση	84
5.8 Διαλειτουργική συνεργασία.....	85
5.9 Κατανομή πόρων και logistics	85
5.10 Βοηθητικά συστήματα (utilities)	85
5.11 Σύνοψη κεφαλαίου.....	86
6. Σύνοψη και συμπεράσματα.....	87
6.1 Σύνοψη εργασίας	87
6.2 Βασικά ευρήματα και συμπεράσματα	87
6.3 Μελλοντικά βήματα	89
Βιβλιογραφία.....	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1 Σχέση μεταξύ Digital Twins και των κύριων τεχνολογιών Industry 4.0	26
Εικόνα 2.2. Συσχέτιση Digital Twin, CPS και IoT (Lu, et al., 2019)	29
Εικόνα 2.3. Διαφορές μεταξύ AR, VR και MR (Saxena, 2018)	39
Εικόνα 3.4 Ψηφιακό Δίδυμο υλικού συσκευασίας, FinnairCargo	49
Εικόνα 3.5 Vision picking μέσω γυαλιών επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, DHL	51
Εικόνα 3.6 Χρήση χαρτών θερμότητας για ασφαλέστερες εργασιακές πρακτικές, DHL	51
Εικόνα 3.7 Βελτίωση in-plant ροών μέσω Ψηφιακού Διδύμου, DHL	53
Εικόνα 4.8 Εξέλιξη της χρήσης των Digital Twins στην Βιομηχανία	59
Εικόνα 5.9 Εφαρμογές Digital Twin στην Εφοδιαστική Αλυσίδα	67
Εικόνα 5.10 Δομή της πλατφόρμας Digital twin της JD.COM.....	69
Εικόνα 5.11 Βασικό σχήμα απόφασης σε πραγματικό χρόνο σε ένα DIGITAL TWIN.....	73
Εικόνα 5.12 Οι σταθμοί εργασίας με σύστημα pick-to-light και διεπαφή MR	75
Εικόνα 5.13 Truck Platooning (Janssen, et al., 2015)	80

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Ορισμοί Ψηφιακού Διδύμου.....	20
Πίνακας 4.2 Συσχετισμός ψηφιακού διδύμου και διαδικασιών εφοδιαστικής αλυσίδας	60
Πίνακας 5.3 Συσχετισμός μελέτης περίπτωσης ψηφιακού διδύμου και οφέλους στην Εφοδιαστική Αλυσίδα	68

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το Digital Twin ανά έτος από 2008 έως Ιανουάριο 2023.....	17
Σχήμα 2.2 Δημοσιεύσεις σχετικές με το Digital Twin ανά τομέα στο διάστημα 2008 έως Ιανουάριο 2023.....	17
Σχήμα 5.3 Αρχιτεκτονική του ψηφιακού δίδυμου του εργαστηρίου εφοδιαστικής.....	76

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την μεταπτυχιακή διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου κ. Ζεϊμπέκη Βασίλειο για την αμέριστη βοήθεια και τη συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Επιθυμώ ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τη σύντροφό μου για όλη τη στήριξη, συμπαράσταση και ενθάρρυνσή τους καθ' όλη την διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου και της συγγραφής της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Επιτελική Σύνοψη

Ο κλάδος της Εφοδιαστικής Αλυσίδας έχει εξελιχθεί σημαντικά, απαιτώντας συνεχώς την εύρεση και εφαρμογή καινοτόμων λύσεων για την αποτελεσματική διαχείριση της πολυπλοκότητάς της. Η τεχνολογία Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin), αποτελεί μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία η οποία έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον των εταιρειών καθώς υπόσχεται μεγάλη ποικιλία δυνατοτήτων βελτιστοποίησης των λειτουργιών τους.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα επιχειρήσει να αναλύσει με τη χρήση της μεθοδολογίας Συστηματικής Βιβλιογραφικής Επισκόπησης (Systematic Literature Review) την έννοια του Ψηφιακού Διδύμου, τις τεχνολογίες του Industry 4.0 που το απαρτίζουν και τη σύνδεση του με αυτές, ενώ μετέπειτα προχωρά σε εκτενή ανάλυση της εφαρμογής του Ψηφιακού Διδύμου στην Εφοδιαστική Αλυσίδα, στηρίζοντας την έρευνα με πραγματικές μελέτες περίπτωσης από εταιρείες σε ολόκληρο τον κόσμο. Γίνεται λόγος για τα πολλαπλά οφέλη χρήσης του Ψηφιακού Διδύμου ενώ παράλληλα δεν παραλείπει να αναφέρει τις προκλήσεις που ενέχει η εφαρμογή του σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.

Υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για το Ψηφιακό Δίδυμο στη βιβλιογραφία, καθώς εφαρμόζεται σε διαφορετικές περιοχές και σε διαφορετικούς κλάδους. Ένα ψηφιακό δίδυμο μπορεί να οριστεί συνοπτικά ως μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος ή διαδικασίας που επιτρέπει την παρακολούθηση, την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο. Η τεχνολογία Digital Twin χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στους τομείς της αστροναυτικής και της αεροδιαστημικής από τη NASA. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει ότι το εύρος χρήσης και ο αντίκτυπος των Digital Twins συνεχίζουν να επεκτείνονται, καθιστώντας το μια ταχέως αναπτυσσόμενη τεχνολογία σε διάφορους κλάδους.

Για την Εφοδιαστική Αλυσίδα, το Ψηφιακό Δίδυμο προσφέρει μια ολοκληρωμένη και σε πραγματικό χρόνο αναπαράσταση ολόκληρου του συστήματος της, που περιλαμβάνει τον σχεδιασμό, παραγωγή, διανομή και όχι μόνο. Στον τομέα της πρόβλεψης ζήτησης, τα Ψηφιακά Δίδυμα συλλέγουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές —όπως ιστορικές πωλήσεις, τάσεις της αγοράς και εξωτερικούς παράγοντες— για να δημιουργήσουν ακριβείς προβλέψεις ζήτησης. Τα στελέχη μπορούν να λάβουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για να ευθυγραμμίσουν τα επίπεδα παραγωγής και αποθεμάτων με τις απαιτήσεις της αγοράς, ελαχιστοποιώντας έτσι τα πλεονάζοντα αποθέματα.

Αναφορικά με τον Σχεδιασμό, τα ψηφιακά δίδυμα παρέχουν μια ολιστική άποψη των διαδικασιών της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ο σχεδιασμός γίνεται πιο αποτελεσματικός καθώς η τεχνολογία επιτρέπει την καλύτερη ευθυγράμμιση μεταξύ της παραγωγικής ικανότητας και των διακυμάνσεων της ζήτησης. Οι εταιρείες μπορούν να

βελτιστοποιήσουν τις δραστηριότητές τους, να καταναείμουν τους πόρους αποτελεσματικά και να προσαρμοστούν άμεσα στη μεταβαλλόμενη δυναμική της αγοράς. Τα ψηφιακά δίδυμα ενισχύουν επίσης την κρίσιμη πτυχή της διαχείρισης αποθεμάτων επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των επιπέδων και των τάσεων του αποθέματος. Αυτή η δυνατότητα διευκολύνει προληπτικές στρατηγικές αναπλήρωσης, βελτιστοποιώντας τα επίπεδα αποθεμάτων και διασφαλίζοντας την έγκαιρη διαθεσιμότητα των προϊόντων. Ως αποτέλεσμα, το κόστος μεταφοράς μειώνεται διατηρώντας παράλληλα υψηλά τα επίπεδα υπηρεσιών, ενισχύοντας τόσο την οικονομική όσο και τη λειτουργική αποτελεσματικότητα.

Προχωρώντας προς το εκτελεστικό σκέλος της Εφοδιαστικής Αλυσίδας, όσον αφορά στη διαχείριση των αποθηκών, τα Ψηφιακά Δίδυμα προσομοιώνουν διατάξεις, ροές εργασίας και τοποθέτηση εξοπλισμού. Αυτή η εικόνα επιτρέπει στους επαγγελματίες της εφοδιαστικής αλυσίδας να αναδιαρθρώσουν τις αποθήκες για μέγιστη απόδοση, εξορθολογίζοντας την εκπλήρωση παραγγελιών, μειώνοντας τους χρόνους παραλαβής και συσκευασίας και ελαχιστοποιώντας το κόστος.

Οι μεταφορές, ένας ακόμη βασικός κρίκος στην εφοδιαστική αλυσίδα, επωφελούνται από το Ψηφιακό Δίδυμο με διάφορους τρόπους. Η διμοιρία φορτηγών—μια μέθοδος κατά την οποία τα οχήματα ακολουθούν αυτόνομα ένα αρχικό φορτηγό—βελτιστοποιεί την απόδοση καυσίμου και μειώνει τη συμφόρηση. Χρησιμοποιώντας δεδομένα από ψηφιακά δίδυμα, οι εταιρείες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις διαδρομές, να προγραμματίσουν παραδόσεις, με αποτέλεσμα μειωμένο κόστος μεταφοράς και βελτιωμένη ακρίβεια παράδοσης.

Η πανδημία COVID-19 υπογράμμισε την ανάγκη για ανθεκτικότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα. Τα ψηφιακά δίδυμα έπαιξαν ζωτικό ρόλο στη διαχείριση των διαταραχών που προκλήθηκαν από την κρίση. Οι μελέτες περίπτωσης δείχνουν πώς οι εταιρείες προσαρμόστηκαν στις κυμαινόμενες απαιτήσεις, μετατόπισαν τις παραγωγικές ικανότητες και βελτισποίησαν τα επίπεδα αποθέματος χρησιμοποιώντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο από τα ψηφιακά δίδυμα. Αυτή η προσαρμοστική ικανότητα βοήθησε στον μετριασμό των επιπτώσεων των διαταραχών και στη διατήρηση των προμηθειών σε δύσκολες στιγμές.

Ωστόσο, η υιοθέτηση του Ψηφιακού Διδύμου δεν στερείται προκλήσεων. Η ενσωμάτωση διαφορετικών πηγών δεδομένων, η ακρίβεια των δεδομένων και η διαχείριση της πολυπλοκότητας της εικονικής αναπαράστασης δημιουργούν εμπόδια. Οι ανησυχίες για το απόρρητο, οι απειλές για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και η ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό για τη διαχείριση και την ερμηνεία των δεδομένων προσθέτουν περαιτέρω επίπεδα πολυπλοκότητας. Θα πρέπει δε να αναφέρουμε πως, οι πιθανές ανταμοιβές όσον αφορά τα κέρδη αποδοτικότητας, τις μειώσεις κόστους και την αυξημένη ικανοποίηση των πελατών καθιστούν τα digital twins ένα ανεκτίμητο εργαλείο για τη διαμόρφωση του μέλλοντος της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας σε διάφορους κλάδους.

1. Εισαγωγή

1.1 Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin)

Καθώς οι οργανισμοί προσαρμόζονται στις αυστηρές απαιτήσεις που θέτουν οι παγκόσμιες αγορές, οι αλυσίδες εφοδιασμού γίνονται όλο και πιο περίπλοκες. Αυτό συχνά έχει αρνητικές επιπτώσεις στην διαμόρφωση, εκτέλεση και παρακολούθηση διαδικασιών κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού αλλά κι εντός του οργανισμού.

Ένα Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) αποτελεί μια από τις κύριες τεχνολογίες που οδηγούν την ψηφιοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας σήμερα, βοηθώντας τις εταιρείες να μετριάσουν τους κινδύνους και να αυξήσουν την ανθεκτικότητά τους απέναντι στις νέες προκλήσεις. Το Ψηφιακό Δίδυμο είναι ένα ακριβές εικονικό αντίγραφο ενός φυσικού συστήματος που χρησιμοποιεί δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνονται από αισθητήρες και συσκευές IoT. Τα ψηφιακά δίδυμα μιμούνται τη συμπεριφορά και τις επιδόσεις του πραγματικού συστήματος, δίνοντας στις επιχειρήσεις τη δυνατότητα να προσομοιώνουν διάφορα σενάρια, να δοκιμάζουν ακραίες συνθήκες, να αναγνωρίζουν έγκαιρα και να προλαμβάνουν τα επιχειρησιακά ρίσκα, να αντιμετωπίζουν τα προβλήματα έγκαιρα και να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις βάσει των συλλεχθέντων δεδομένων.

Τα Ψηφιακά δίδυμα μπορεί να αποδειχθούν ωφέλιμα για τους οργανισμούς όσον αφορά στη βελτίωση των μετρήσιμων στοιχείων, των διαγνώσεων, των προβλέψεων των και περιγραφών φυσικών στοιχείων. Ωστόσο, αυτά τα οφέλη συνοδεύονται από αξιοσημείωτες προκλήσεις, όπως η διαχείριση της εφαρμογής, το κόστος συντήρησης, η διασφάλιση κατάλληλης μοντελοποίησης πληροφοριών, η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και των εσωτερικών και εξωτερικών αλλαγών που απαιτούνται λόγω της εφαρμογής τους (Modoni, et al., 2018).

1.2 Εφαρμόζοντας το Ψηφιακό Δίδυμο στην εφοδιαστική αλυσίδα

Το Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) στην εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί ένα εικονικό μοντέλο προσομοίωσης μιας πραγματικής εφοδιαστικής αλυσίδας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση της δυναμικής της και την πρόβλεψη της επιτυχίας των διαδικασιών που την απαρτίζει. Τα μοντέλα Digital Twin τροφοδοτούνται από δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και από στιγμιότυπα προγραμματισμένων και εκδοθέντων εντολών εργασίας, εντολών πωλήσεων, εγκρίσεων, ζήτησης και προσφοράς. Τα δεδομένα συλλέγονται από πηγές όπως:

- Συσκευές IoT (π.χ. αισθητήρες)
- Βάσεις δεδομένων μεταφορών και logistics
- Βάσεις δεδομένων λειτουργιών

- Πληροφορίες προμηθευτή (π.χ. δεδομένα συστημάτων διαχείρισης σχέσεων με πελάτες, λογαριασμούς, τιμολόγια)
- Εμπειρίες χρήστη (π.χ. διαδικτυακές κριτικές, αιτήματα εξυπηρέτησης πελατών)

Τα Ψηφιακά Δίδυμα βοηθούν στην κατανόηση της συμπεριφοράς μιας εφοδιαστικής αλυσίδας, μπορούν να προβλέψουν ασυνήθιστες καταστάσεις και να παρέχουν ένα σχέδιο δράσης για τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών Εφοδιαστικής Αλυσίδας.

Αν και αποτελεί εργαλείο το οποίο έχει αναφερθεί σχετικά πρόσφατα στη βιβλιογραφία, έχει ήδη πληθώρα εφαρμογών για τους οργανισμούς που επιθυμούν να το αξιοποιήσουν. Μερικές από τις εφαρμογές τους περιλαμβάνουν την βελτίωση των διαδικασιών Σχεδιασμού, Πρόβλεψης της Ζήτησης, της βελτιστοποίησης του αποθέματος, της πρόβλεψης των σημείων συμφόρησης της αλυσίδας, την διαχείριση αποθηκών, τη χαρτογράφηση των συγκοινωνιών και της γενικότερης διαχείρισης των μεταφορών, την προληπτική συντήρηση και την γενικότερη βελτιστοποίηση διαχείρισης της Αλυσίδας Εφοδιασμού.

Σαν αποτέλεσμα οι επιχειρήσεις έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν συνεχώς τις διαδικασίες τους, να λαμβάνουν ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο και να εκτελούν γρήγορες και αποτελεσματικές προσαρμογές.

1.3 Σκοπός και στόχοι εργασίας

Η παρούσα έρευνα έχει σκοπό να αποτυπώσει την έννοια του ψηφιακού διδύμου και τις εφαρμογές στην Εφοδιαστική Αλυσίδα που το συνοδεύουν, ποια τα πιθανά οφέλη που μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση του Digital Twin καθώς και ποιες προκλήσεις είναι πιθανό να εμφανιστούν στο δρόμο για την εφαρμογή του.

Οι αναλυτικοί στόχοι της εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Βιβλιογραφική ανασκόπηση και ιστορική αναδρομή του όρου Digital Twin
- Επεξήγηση επιμέρους τεχνολογιών Digital Twin
- Μελέτες περίπτωσης εφαρμογών του Digital Twin στην εφοδιαστική αλυσίδα (διαδικασίες και εκτελεστικό σκέλος)
- Ανάλυση των πιθανών οφελών και προκλήσεων χρήσης του Digital Twin
- Σύνοψη και συμπεράσματα

1.4 Μεθοδολογία εκπόνησης εργασίας

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της μεταπτυχιακής εργασίας βασίζεται στην συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση (Systematic Literature Review –SLR). Αρχικά, αναζητήθηκαν άρθρα και εκθέσεις από έγκριτες ηλεκτρονικές πηγές, περιοδικά, βιβλία, αλλά και πρακτικά συνεδρίων αναφορικά με την έννοια και τις εφαρμογές του Digital Twin σε διάφορες λειτουργίες της

εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι δημοσιεύσεις που συγκεντρώθηκαν τοποθετούνται χρονικά από το 2008 μέχρι το 2023 και είναι 4875 στον αριθμό. Για όλα τα προαναφερθέντα άρθρα πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός και διαλογή ώστε να απορριφθούν όσα δεν έχουν εφαρμογή στην παρούσα εργασία, η οποία μελετά το Digital Twin υπό το πρίσμα της Εφοδιαστικής. Τα εναπομείναντα άρθρα έπειτα κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τον επιμέρους κλάδο Εφοδιαστικής που αφορούσαν και αφού ολοκληρώθηκε ο διαχωρισμός και η διαλογή τους, μελετήθηκαν εκτενώς, αντλήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα και ξεκίνησε η συγγραφή της παρούσας εργασίας.

1.5 Δομή εργασίας

Ως προς τη δομή της μεταπτυχιακής εργασίας, τα Κεφάλαια που την απαρτίζουν καθώς και μια σύντομη περιγραφή αυτών, φαίνονται παρακάτω.

1. Εισαγωγή
2. Η έννοια του Digital Twin
3. Οφέλη και προκλήσεις χρήσης του Digital Twin
4. Εφαρμογές του Ψηφιακού Διδύμου στις διαδικασίες της Εφοδιαστικής Αλυσίδας
5. Χρήση Ψηφιακού Διδύμου στο εκτελεστικό σκέλος της Εφοδιαστικής Αλυσίδας
6. Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο 1ο Κεφάλαιο, γίνεται αναφορά ως προς την έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin), τις κύριες εφαρμογές του στην Εφοδιαστική Αλυσίδα, παρουσιάστηκαν οι στόχοι και η μεθοδολογία εκπόνησης της εργασίας όπως επίσης έγινε και αναφορά στη δομή της.

Στο 2ο Κεφάλαιο, αναλύεται ο ορισμός του Ψηφιακού Διδύμου, πραγματοποιείται ιστορική αναδρομή του όρου του Ψηφιακού Διδύμου, περιγράφονται τα βασικά του χαρακτηριστικά αλλά και οι επιμέρους τεχνολογίες του Industry 4.0 που το απαρτίζουν.

Στο 3ο Κεφάλαιο αναφέρθηκαν τα οφέλη αλλά και οι προκλήσεις που ενέχει η χρησιμοποίηση του Ψηφιακού Διδύμου σε ολόκληρη την Εφοδιαστική Αλυσίδα.

Στο 4ο Κεφάλαιο, προχωρούμε σε ανάλυση των εφαρμογών του Ψηφιακού Διδύμου στις διαδικασίες Εφοδιαστικής Αλυσίδας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η συνεισφορά των εφαρμογών αυτών στον Σχεδιασμό, Πρόβλεψη Ζήτησης, Aggregate Planning, Διαχείριση Αποθέματος και Προμηθειών. Η ανάλυση συνοδεύεται και από μελέτες περίπτωσης σε διάφορες εταιρείες.

Στο 5ο Κεφάλαιο αποτυπώνονται εφαρμογές και μελέτες περίπτωσης του Ψηφιακού Διδύμου για τη συνεισφορά του στο εκτελεστικό μέρος της Εφοδιαστικής Αλυσίδας. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται εφαρμογές και μελέτες περίπτωσης σε τομείς όπως η

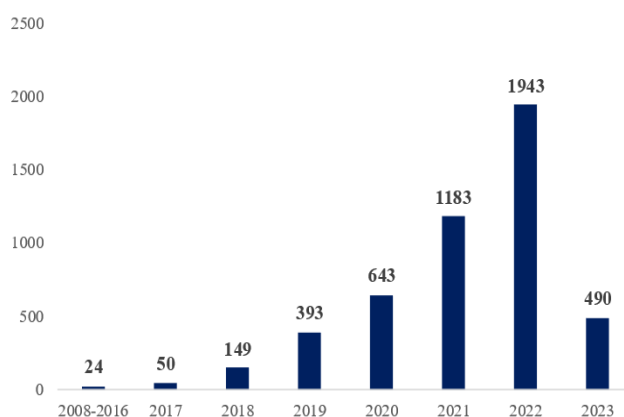
Αποθήκευση, οι Μεταφορές, οι Διανομές και οι Επιστροφές (Αντίστροφη Εφοδιαστική).

Στο 6ο Κεφάλαιο βρίσκεται μια σύνοψη της μεταπτυχιακής εργασίας, τα συμπεράσματα που απορρέουν από αυτήν αλλά και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

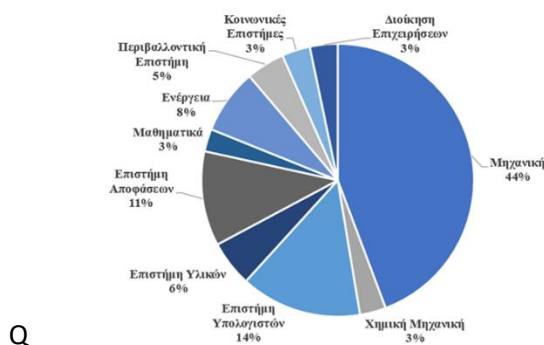
2. Η έννοια του Digital Twin

2.1. Εισαγωγή

Η εκπόνηση της παρούσας εργασίας έγινε χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία Systematic Literature Review (SLR). Συνεπώς έγινε έρευνα σε έγκριτες βάσεις δεδομένων (ScienceDirect, ResearchGate, Google Scholar) για την εύρεση των πιο σχετικών δημοσιεύσεων που αφορούν το Digital Twin από το 2008 και έπειτα. Συνολικά μέσα από την έρευνα βρέθηκαν 4875 δημοσιεύσεις. Ο αριθμός των δημοσιεύσεων αυξάνεται από το 2019 σχεδόν με εκθετικό τρόπο, υποδεικνύοντας ότι το Digital Twin γίνεται μείζον θέμα στην επιστημονική κοινότητα. Το Σχήμα 2.1 απεικονίζει τα έγγραφα που ανακτήθηκαν ανά έτος ενώ το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τη θεματολογία των δημοσιεύσεων. Το σημαντικό ποσοστό των δημοσιεύσεων επικεντρώνεται στον τομέα της μηχανικής (βιομηχανική παραγωγή, ρομποτική, ανάπτυξη προϊόντων) και στον τομέα της επιστήμης των υπολογιστών (Προσομοιώσεις, επικύρωση αρχιτεκτονικής, επικοινωνία, data analytics).



Σχήμα 2.1. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το Digital Twin ανά έτος από 2008 έως Ιανουάριο 2023.



Σχήμα 2.2 Δημοσιεύσεις σχετικές με το Digital Twin ανά τομέα στο διάστημα 2008 έως Ιανουάριο 2023

2.2 Ιστορική αναδρομή Digital Twin

Παρόλο που η τεχνολογία του Digital Twin έχει αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια, η ιδέα δεν είναι εντελώς νέα. Η ιδέα διατυπώθηκε αρχικά από τον Dr. Michael Grieves σε μια παρουσίαση σχετικά με τη «Διαχείριση Κύκλου Ζωής Προϊόντων» (PLM) το 2002 στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν (Grieves, 2015). Το προτεινόμενο μοντέλο είχε τρία στοιχεία:

- Πραγματικό χώρο,
- Εικονικό χώρο,
- Ο σύνδεσμος για τη ροή δεδομένων και πληροφοριών μεταξύ των δυο.

Το τότε μοντέλο διατυπώθηκε ως «Mirrored Spaces Model». Το 2003, οι Kary Främpling κ.α. πρότειναν «μια αρχιτεκτονική βασισμένη σε παράγοντες όπου κάθε προϊόν έχει ένα αντίστοιχο «εικονικό ισοδύναμο» ή παράγοντα που σχετίζεται με αυτό» ως λύση στην αναποτελεσματικότητα της μεταφοράς πληροφοριών παραγωγής μέσω χαρτιού για PLM (Främpling, et al., 2003). Μέχρι το 2006 το όνομα του μοντέλου που είχε προτείνει ο Grieves το 2002 είχε μετονομαστεί από «Mirrored Spaces Model» σε «Information Mirroring Model» (Grieves, 2009). Αυτό το μοντέλο έδωσε έμφαση στον μηχανισμό σύνδεσης μεταξύ των δυο χώρων, οι οποίοι είναι αμφίδρομοι και έχουν πολλαπλούς εικονικούς χώρους για έναν ενιαίο πραγματικό χώρο όπου μπορούν να εξερευνηθούν εναλλακτικές ιδέες ή σχέδια. Ωστόσο, λόγω των περιορισμών των τεχνολογιών της εποχής, όπως η χαμηλή υπολογιστική δύναμη, η χαμηλή ή καθόλου συνδεσιμότητα των συσκευών στο διαδίκτυο, υποανάπτυκτοι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης το ψηφιακό δίδυμο δεν είχε πρακτική εφαρμογή εκείνη την εποχή.

Το 2006, είχε επίσης χρησιμοποιηθεί ο όρος «Product Avatar» από τους (Hribernik, et al., 2006), ο οποίος είναι παρόμοιος με το μοντέλο που παρουσίασε ο Grieves, ωστόσο, αναπτύχθηκε ανεξάρτητα. Το «Product Avatar» αντιπροσωπεύει μια έννοια όπου τα μεμονωμένα προϊόντα θεωρούνται ως έξυπνες οντότητες σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, όπως ορίζεται από τους (Wong, et al., 2002) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά για κάθε μεμονωμένη οντότητα:

- Επεξεργάζεται μια μοναδική ταυτότητα
- Είναι σε θέση να επικοινωνεί αποτελεσματικά με το περιβάλλον του
- Μπορεί να δημιουργεί, να έχει πρόσβαση, να μεταφέρει και να λειτουργεί βάσει πληροφοριών για τον εαυτό του
- Αναπτύσσει μια γλώσσα για να εμφανίσει τα χαρακτηριστικά της, τις απαιτήσεις παραγωγής κ.λπ.
- Έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει ή να λαμβάνει αποφάσεις σχετικές με τη μοίρα του

Το όνομα «Ψηφιακό Δίδυμο» εμφανίζεται για πρώτη φορά στην πρόχειρη έκδοση του τεχνολογικού οδικού χάρτη της NASA το 2010 (Shafto, et al., 2010). Σε αυτούς τους οδικούς χάρτες το ψηφιακό δίδυμο αναφερόταν κι ως «Εικονικός ψηφιακός αρχηγός στόλου». Περιέγραψε το ψηφιακό δίδυμο ως «μια ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολλαπλής κλίμακας, πιθανολογική προσομοίωση ενός οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, ιστορικό στόλου κ.λπ., για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του ιπτάμενου δίδυμου του» (Lu, et al., 2019)

Το 2013, αυτή η τεχνολογία ενέπνευσε την Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ, η οποία χρησιμοποίησε ψηφιακά δίδυμα του κελύφους των αεροσκαφών τους προκειμένου να προβλέψει την καταπόνηση και τη ζημιά που μπορεί να υποστούν. Ονόμασαν αυτή την τεχνολογία «Airframe Digital Twin» και είχε ως στόχο να αποτελέσει ένας εικονικός αισθητήρας υγείας του κύκλου ζωής του αεροσκάφους (Kraft, 2016).

Από το 2014 κι έπειτα έχει χρησιμοποιηθεί από αρκετές μεγάλες εταιρείες, πιο συγκεκριμένα η General Electric, η Siemens και η Dassault Systèmes έχουν εισάγει την έννοια του digital twin στις λειτουργίες τους και το αναπτύσσουν με ταχύτατους ρυθμούς. Τέλος από το 2017 έως και το 2019 η Gartner κατέταξε το ψηφιακό δίδυμο ως μία από τις δέκα πιο στρατηγικές τεχνολογίες (Gartner, 2019).

2.3. Ορισμοί και βασικά χαρακτηριστικά της έννοιας του Ψηφιακού Δίδυμου (Digital Twin)

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα η έννοια του Digital Twin διατυπώθηκε αρχικά από τον Dr. Michael Grieves σε μια παρουσίαση σχετικά με τη «Διαχείριση Κύκλου Ζωής Προϊόντων» το 2002 στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν (Grieves, 2015), ενώ το πρώτο ψηφιακό δίδυμο με δυνατότητα δράσης αναπτύχθηκε στη συνέχεια από τη NASA το 2010 ως μέθοδος πρόβλεψης των δομικών συμπεριφορών των αεροσκαφών αναλύοντας και προσομοιώνοντάς τα ως ψηφιακά μοντέλα. Οι επιστήμονες στη NASA όρισαν το Digital Twin ως «μια ολοκληρωμένη προσομοίωση πολλαπλών φυσικών, πολλαπλών κλιμακίων, πιθανοτήτων ενός οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, την ιστορία του στόλου, τις ενημερώσεις των αισθητήρων και ούτω καθεξής, για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του ιπτάμενου διδύμου του» (Lu, et al., 2019).

Καθώς οι δυνητικοί τομείς εφαρμογών του Digital Twin αυξάνονται κάθε μέρα, γίνεται φανερό πως δεν υπάρχει συναίνεση στην ερευνητική κοινότητα για το τι αποτελεί ένα σύγχρονο ψηφιακό δίδυμο. Μπορεί να φαίνεται δελεαστικό για μια εταιρία να χαρακτηρίσει τις υπάρχουσες λύσεις τρισδιάστατης μοντελοποίησης που περιέχουν τεχνολογίες παρακολούθησης περιουσιακών στοιχείων ως ένα Digital Twin μοντέλο, αλλά αυτή η κίνηση ελλοχεύει τον κίνδυνο να μειώσει την αξία και την

πολυπλοκότητα και τα πιθανά οφέλη μιας Digital Twin προσέγγισης (Negri, et al., 2017).

Στον παρακάτω Πίνακα 2.1 παρατίθενται συγκεντρωτικά διάφοροι ορισμοί που έχουν αποδοθεί για το Ψηφιακό Δίδυμο.

Πίνακας 2.1 Ορισμοί Ψηφιακού Διδύμου

Συγγραφείς	Ορισμός
(Tao, et al., 2018)	«Ένα πλήρες Digital Twin θα πρέπει να περιλαμβάνει πέντε μέρη: φυσικό μέρος, εικονικό μέρος, σύνδεση, δεδομένα και υπηρεσία.»
(Autiosalo, 2018)	«Το Digital Twin είναι το κυβερνο-μέρος ενός κυβερνοφυσικού συστήματος.»
(Demkovich, et al., 2018)	«Ένα ψηφιακό δίδυμο ενός συστήματος παραγωγής είναι μια ψηφιακή διάταξη πολλαπλών επιπέδων που περιγράφει το προϊόν, τις διαδικασίες και τους πόρους στο περιβάλλον λειτουργίας τους, δηλαδή επιτρέπουν την προσομοίωση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο πραγματικό σύστημα, καθώς επίσης συλλέγουν και εμφανίζουν σε πραγματικό χρόνο, πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των δεδομένων που λαμβάνονται από τα PLC αλλά και αισθητήρων εγκατεστημένων στο σύστημα παραγωγής, τόσο σε βιομηχανικό εξοπλισμό όσο και στο περιβάλλον της παραγωγής.»
(Kritzinger, et al., 2018)	«Με βάση τους δεδομένους ορισμούς ενός Ψηφιακού Διδύμου σε οποιοδήποτε πλαίσιο, θα μπορούσε κανείς να προσδιορίσει μια κοινή αντίληψη των Ψηφιακών Διδύμων, ως ψηφιακών ομολόγων φυσικών αντικειμένων».
(Zheng, et al., 2018)	«Με την ευρεία έννοια, το Digital Twin είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που μπορεί να προσομοιώνει, να παρακολουθεί, να υπολογίζει, να ρυθμίζει και να ελέγχει την κατάσταση και τη διαδικασία του συστήματος.»
(Grieves & Vickers, 2017)	«Το Digital Twin είναι ένα σύνολο εικονικών δομών πληροφοριών που περιγράφει πλήρως ένα δυνητικό ή πραγματικό φυσικό κατασκευασμένο προϊόν από το μικρο-ατομικό επίπεδο έως το μακρο-γεωμετρικό επίπεδο. Σε βέλτιστο επίπεδο, κάθε πληροφορία που θα μπορούσε να ληφθεί από την επιθεώρηση ενός φυσικού κατασκευασμένου προϊόντος, μπορεί να ληφθεί από το ψηφιακό του δίδυμο»
(Negri, et al., 2017)	«Το Digital Twin αποτελείται από μια εικονική αναπαράσταση ενός συστήματος παραγωγής που είναι σε θέση να τρέξει σε διαφορετικούς κλάδους προσομοίωσης, που χαρακτηρίζεται από το συγχρονισμό μεταξύ του εικονικού και του πραγματικού συστήματος, χάρη στα δεδομένα

	ανίχνευσης και τις συνδεδεμένες έξυπνες συσκευές, τα μαθηματικά μοντέλα και την επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο».
(Boschert & Rosen, 2016)	«Το ίδιο το όραμα του Digital Twin αναφέρεται σε μια ολοκληρωμένη φυσική και λειτουργική περιγραφή ενός εξαρτήματος, προϊόντος ή συστήματος, η οποία περιλαμβάνει λίγο πολύ όλες τις πληροφορίες που θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες σε όλες τις τρέχουσες και επόμενες φάσεις του κύκλου ζωής».
(Grieves, 2015)	«Το μοντέλο του Ψηφιακού Διδύμου περιέχει τρία κύρια μέρη: α) φυσικά προϊόντα στον Πραγματικό Χώρο, β) εικονικά προϊόντα στον Εικονικό Χώρο και γ) τις συνδέσεις των δεδομένων και των πληροφοριών που συνδέουν τα εικονικά και τα πραγματικά προϊόντα μεταξύ τους.»
(Glaessgen & Stargel, 2012)	«Το Digital Twin είναι μια ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολλαπλών κλιμάκων, πιθανοτική προσομοίωση ενός κατασκευασμένου οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, ιστορικό στόλου κ.λπ., για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου πραγματικού διδύμου. Το Digital Twin είναι εξαιρετικά ρεαλιστικό και μπορεί να εξετάσει ένα ή περισσότερα σημαντικά και αλληλεξαρτώμενα συστήματα οχημάτων, συμπεριλαμβανομένου του σκελετού του αεροσκάφους, της πρόωσης και της αποθήκευσης ενέργειας, της υποστήριξης της ζωής, της αεροηλεκτρονικής, της θερμικής προστασίας κ.λπ.»

Ο κοινός παρονομαστής των ορισμών στον Πίνακα 2.1 είναι ότι το Digital Twin είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού προϊόντος. Κάποιοι ορισμοί τονίζουν τη σύνδεση μεταξύ των δύο μερών ενώ άλλοι περιλαμβάνουν πιθανές εφαρμογές Digital Twins όπως η προσομοίωση.

2.3.1 Χαρακτηριστικά Ψηφιακού Διδύμου

Η ακόλουθη λίστα συνιστά μερικά από τα χαρακτηριστικά του ψηφιακού διδύμου. Αυτά τα χαρακτηριστικά βασίζονται σε δημοσιευμένη έρευνα και παρατηρήσεις από ακαδημαϊκά έργα που δημοσιεύτηκαν από τους (Qi, et al., 2018; Lu, et al., 2019; Uhlemann, et al., 2017; Negri, et al., 2017) και τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- Το Digital Twin είναι μια εικονική αναπαράσταση (ή μοντέλο) ενός φυσικού αντικειμένου ή διαδικασίας.
- Το Digital Twin ενημερώνεται συνεχώς με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (από διάφορους αισθητήρες) για να αντικατοπτρίσει την τρέχουσα κατάσταση και συμπεριφορά του φυσικού αντικειμένου ή διαδικασίας.

- Το Digital Twin μπορεί να βοηθήσει στην απεικόνιση και ανάλυση του φυσικού αντικειμένου ή διαδικασία και με τη χρήση μηχανικής μάθησης μπορούν να πραγματοποιηθούν περαιτέρω βελτιστοποιήσεις και προβλέψεις.

Χρησιμοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούμε σε γενικές γραμμές να καλύψουμε πιθανές εφαρμογές, όπως μια γραμμή παραγωγής ή μια ολόκληρη πόλη.

Σε μια προσπάθεια αποδόμησης της έννοιας οι (Qi, et al., 2018), σε σχετικό άρθρο τους, πρότειναν πέντε ξεχωριστά μέρη τα οποία είναι χρήσιμα και απαραίτητα σε ένα περιβάλλον παραγωγής. Χρησιμοποιώντας αυτά τα μέρη που προτείνουν οι συγγραφείς ως βάση, ο καθένας μπορεί να δημιουργήσει ένα Digital Twin για κάθε πιθανό σύνολο εφαρμογών. Τα μέρη αυτά είναι τα εξής:

- Αρχικά πρέπει να υπάρχει κάποιου είδους μορφή φυσικής οντότητας που μπορεί να αποτελέσει βάση για το δίδυμο. Αυτή η φυσική οντότητα αποτελεί μέρος ενός συστήματος το οποίο έχει ξεκάθαρο στόχο ή εργασία ούτως ώστε να μπορεί στη συνέχεια να αναπαραχθεί και παρακολουθηθεί από το Digital Twin.
- Στη συνέχεια μπορεί να δημιουργηθεί το εικονικό μοντέλο της φυσικής οντότητας, το οποίο θα αντικατοπτρίζει όλες τις πτυχές της φυσικής οντότητας.
- Με το Digital Twin ενσωματώνονται διάφορες λειτουργίες όπως η διαχείριση, ο έλεγχος και βελτιστοποίηση για την παροχή υπηρεσιών σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Digital Twin.
- Τα δεδομένα που συλλέγονται είναι η ουσιαστική δύναμη του Digital Twin. Περιλαμβάνει τα δεδομένα από τη φυσική οντότητα καθώς επίσης και από το ίδιο το δίδυμο αν αυτό περιέχει εξελιγμένους αλγόριθμους μηχανικής μάθησης.
- Χωρίς τη σύνδεση του φυσικού με τον εικονικό κόσμο, δεν μπορεί να υπάρξει ένα Digital Twin. Μόνο μέσω αυτής της σύνδεσης και τις προαναφερθείσες βελτιστοποιήσεις και προβλέψεις καθώς και της διασφάλισης κατάλληλης σύνδεσης το οποίο είναι υψίστης σημασίας μπορεί να υπάρξει ένα Digital Twin.

Κάθε σύστημα το οποίο συμμορφώνεται με τα προαναφερθέντα τρία χαρακτηριστικά και τα πέντε μέρη που περιγράφονται παραπάνω, μπορεί να ειπωθεί πως είναι ένα Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin).

2.3.2 Τύποι ψηφιακών διδύμων

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι ψηφιακών διδύμων, καθένας με τα δικά του μοναδικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές. Μερικοί από τους πιο συνηθισμένους τύπους ψηφιακών διδύμων περιλαμβάνουν:

- **Digital twin instance (DTI) / Ψηφιακή δίδυμη παρουσία :** Μια ψηφιακή δίδυμη παρουσία περιγράφεται ως ένας τύπος ψηφιακού δίδυμου που αντιπροσωπεύει το φυσικό αντίστοιχό του σε όλο τον κύκλο ζωής του (Campos-Ferreira, et al., 2019), δηλαδή ότι υπάρχει συνεχής παρακολούθηση της κατάστασης του φυσικού δίδυμου και τυχόν αλλαγές ή εξέλιξη που βιώνει το φυσικό δίδυμο θα επηρεάσουν το ψηφιακό δίδυμο. Με αυτή την έννοια, αυτή η ιδέα συνοδεύει ένα προϊόν ή μια διαδικασία από την έναρξή της και καθ' όλη τη διάρκεια ζωής της, ενώ παρακολουθεί και προβλέπει τη συμπεριφορά του.
- **Digital twin prototype (DTP)/ Πρωτότυπο Ψηφιακό δίδυμο:** Όταν πρόκειται για διαδικασίες κατασκευής και παραγωγής προϊόντων, ένα πρωτότυπο ψηφιακό δίδυμο συλλέγει και αποθηκεύει πολύτιμες πληροφορίες και χαρακτηριστικά σχετικά με το φυσικό δίδυμο του. Ορισμένα δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν σχέδια με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD), τιμολόγιο υλικών (Bill of Materials-BOM) ή ακόμα και πληροφορίες που μπορεί να συνδέουν τη διαδικασία παραγωγής με τους ενδιαφερόμενους της ευρύτερης αλυσίδας παραγωγής (Campos-Ferreira, et al., 2019). Όπως ισχύει και με τα χαρακτηριστικά του digital twin, το DTP είναι σε θέση να προσομοιώνει σενάρια παραγωγής και να εκτελεί δοκιμές επικύρωσης, αξιολογήσεις, ακόμη και δοκιμές ποιοτικού ελέγχου πριν από την ίδια τη διαδικασία παραγωγής. Αυτή η προσέγγιση μειώνει αποτελεσματικά το κόστος παραγωγής και τον χρόνο λειτουργίας εντοπίζοντας ελαττώματα ή πιθανά ρίσκα του φυσικού δίδυμου πριν από την πραγματική παραγωγική διαδικασία. Υπό αυτή την έννοια, τα DTP μπορούν επίσης να ονομαστούν πειραματικά digital twin όπου, γίνεται για τον χρήστη διαθέσιμο ένα εικονικό πρωτότυπο, του οποίου το επίπεδο λεπτομέρειας αυξάνεται διαδοχικά, ενώ τα αποτελέσματα των εικονικών δοκιμών δίνουν αρκετά αξιόπιστα σχετικά με την ποιότητα σχεδιασμού και μειώνουν τα σχετικά κόστη ενός τέτοιου εγχειρήματος.
- **Performance digital twin (PDT)/ Ψηφιακό δίδυμο απόδοσης :** Σε πιο πραγματικές και απρόβλεπτες συνθήκες για φυσικά δίδυμα, το PDT είναι σε θέση να παρακολουθεί, να συγκεντρώνει και να αναλύει δεδομένα από προϊόντα (Campos-Ferreira, et al., 2019). Συγκεντρώνοντας έξυπνες δυνατότητες, το PDT είναι σε θέση να επεξεργάζεται τις πληροφορίες που παρακολουθούνται από το φυσικό αντίστοιχο και να παράγει δεδομένα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για βελτιστοποίηση σχεδιασμού, τη δημιουργία στρατηγικής συντήρησης και εξαγωγή συμπερασμάτων από την απόδοση ενός προϊόντος (Sharma, et al., 2020).

2.4 Εφαρμογές Digital Twin

Το Digital Twin μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ποικιλία εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού και της προσομοίωσης, της παρακολούθησης και του ελέγχου και της προγνωστικής συντήρησης. Μερικά παραδείγματα περιλαμβάνουν:

- Βιομηχανική παραγωγή: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας βιομηχανικού εξοπλισμού και συστημάτων, όπως γραμμές συναρμολόγησης εργοστασίων και μονάδες παραγωγής ενέργειας.
- Κτίρια και υποδομές: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας κτιρίων και υποδομών, όπως γέφυρες και δρόμοι.
- Υγειονομική περίθαλψη: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση και τη βελτιστοποίηση χειρουργικών διαδικασιών και για τη βελτίωση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των ιατρικών συσκευών.
- Μεταφορές: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της λειτουργίας και της συντήρησης συστημάτων μεταφοράς, όπως οχήματα, αεροσκάφη και τρένα.

Τα digital twin μπορούν να αποφέρουν σημαντική επιχειρηματική αξία στο σχεδιασμό των αποθηκών και κέντρων διανομής, αξίζει δε να σημειωθεί πως ο αντίκτυπος τους γίνεται μακροπρόθεσμα ακόμη πιο σημαντικός όταν ο σχεδιασμός συνδυάζεται με τις λειτουργίες απογραφής.

Η Tetra Pak, μια εταιρεία συσκευασίας αξίας 13 δισεκατομμυρίων δολαρίων, πρωτοστάτησε στην υιοθέτηση της τεχνολογίας του ψηφιακού δίδυμου στη διαχείριση των αποθηκών της. Δημιούργησε μια ψηφιακή έκδοση μιας αποθήκης της εταιρείας στη Νοτιοανατολική Ασία μέσω IoT τεχνολογίας που εγκαταστάθηκε στα περνοφόρα ανυψωτικά οχήματα της. Έτσι όλα τα δεδομένα της αποθήκης συγκεντρώθηκαν και δημιούργησαν μια εικονική αναπαράσταση.

Το ψηφιακό δίδυμο υποστηρίζει την Tetra Pak στη διαχείριση τοποθεσίας και ποσότητας των αποθεμάτων, των ροών εργασίας και της κατανομής του εξοπλισμού της αποθήκης. Ως αποτέλεσμα, η εταιρεία επιτυγχάνει βελτιωμένη χρήση του αποθηκευτικού της χώρου, αυξημένη λειτουργική απόδοση και βελτιωμένα πρότυπα ασφάλειας στο χώρο εργασίας. Συγκεκριμένα, έχουν επιτύχει να τοποθετούνται σωστά τα εμπορεύματα τους στα ράφια εντός 30 λεπτών από την παραλαβή τους, ενώ τα εμπορεύματα είναι έτοιμα προς αποστολή εντός 95 λεπτών από την παραγγελία. (Tozanli & Saézn, 2022)

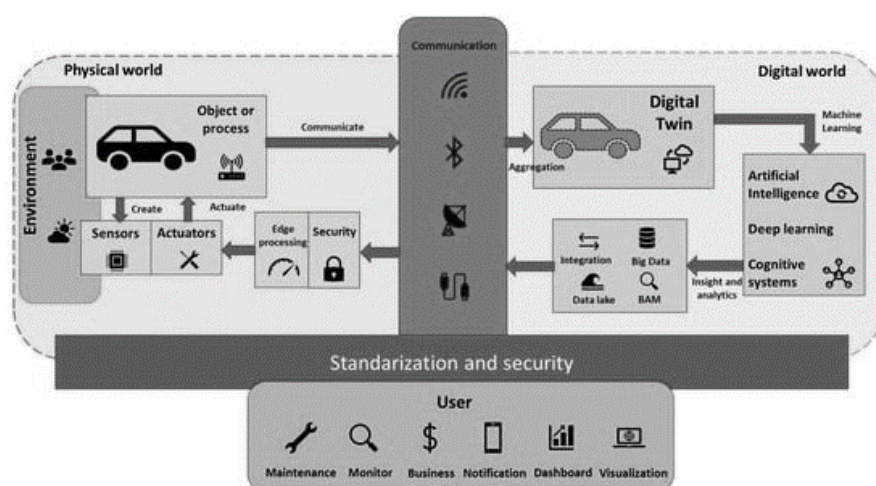
Η Schneider Electric επίσης χρησιμοποιεί ψηφιακά δίδυμα για να αυτοματοποιήσει τις λειτουργίες της αποθήκης και να προσομοιώσει τη λειτουργία της εγκατάστασης, των διαδικασιών, των προϊόντων και του προσωπικού. Με τη βοήθεια της τεχνολογίας, η εταιρεία παρακολουθεί τη ροή υλικών, τις κινήσεις των παλετών στις

αποβάθρες φόρτωσης και τις θέσεις αποθέματος, βελτιστοποιώντας το σχεδιασμό της διαδικασίας και την κατανομή πόρων, καθώς και προσφέροντας επιχειρησιακές και στρατηγικές πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. (Tozanli & Saézn, 2022)

2.5 Τεχνολογίες Digital Twin

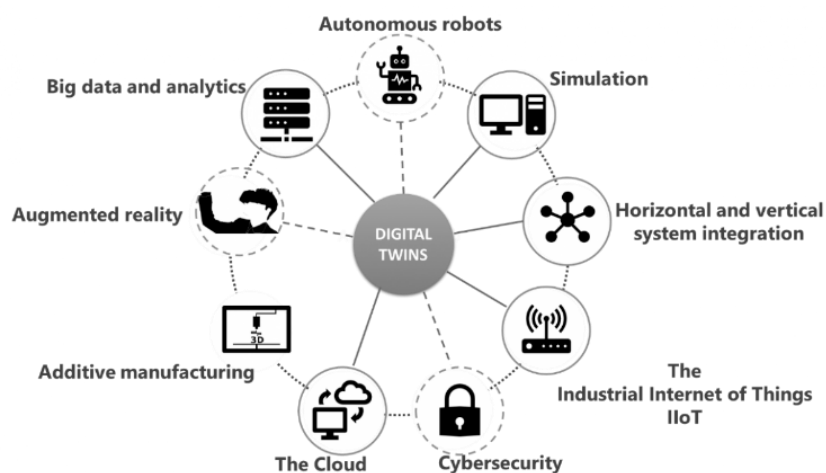
Σε ότι αφορά τις διάφορες εφαρμογές, μεθόδους, πρωτόκολλα και ακόμη και τεχνολογίες ενεργοποίησης, η έννοια του Digital Twin είναι ξεχωριστή για κάθε τομέα. Ωστόσο, υπάρχει ένα γενικό πλαίσιο για την αρχιτεκτονική του Digital Twin που αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία: τον φυσικό κόσμο, τον εικονικό κόσμο και τη συνδεσιμότητα μεταξύ των δύο (Campos-Ferreira, et al., 2019).

Ορισμένα βασικά στοιχεία περιλαμβάνουν τους αισθητήρες στον φυσικό κόσμο (για τη συλλογή πληροφοριών από το πραγματικό περιβάλλον), το φυσικό δίδυμο, την ασφάλεια δεδομένων, το ψηφιακό δίδυμο, τις δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων, (ενεργοποιημένες από μηχανική μάθηση (Machine Learning), την τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence), Big Data κ.λπ.) και διεπαφές επικοινωνίας όπως το διαδίκτυο, το Bluetooth, ο δορυφόρος κ.λπ. Ένα σημαντικό μέρος αυτής της αρχιτεκτονικής των Digital Twin περιλαμβάνει επίσης την οπτικοποίηση δεδομένων για τον χρήστη. Αυτό παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 2.1, όπου ο φυσικός κόσμος αποτελείται από το φυσικό αντικείμενο ή την εκάστοτε διεργασία, τους αισθητήρες, τους ενεργοποιητές(actuators) και τις δυνατότητες επεξεργασίας. Ο ψηφιακός κόσμος αποτελείται από το ίδιο το ψηφιακό δίδυμο, τη μηχανική μάθηση, τις δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων και τις βάσεις δεδομένων. Και τα δύο συνδέονται στο στοιχείο επικοινωνίας όπου είναι διαθέσιμα πολλά πρωτόκολλα και διεπαφές όπως το WiFi, το Bluetooth και ενσύρματες συνδέσεις. Για τον εκάστοτε χρήστη, αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει συνεχή παρακολούθηση και οπτικοποίηση.



Εικόνα 2.1 Αρχιτεκτονική Digital Twin

Η τεχνολογία Digital Twin συνδυάζει την ισχύ των 9 βασικών τομέων του Industry 4.0, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2, ώστε να παρέχει προηγμένη λειτουργικότητα όσον αφορά την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση των ψηφιακών εργοστασίων. Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα αναλυθούν οι σχετικές με το Digital Twin τεχνολογίες.



Εικόνα 2.1 Σχέση μεταξύ Digital Twins και των κύριων τεχνολογιών Industry 4.0

2.5.1 Ίντερνετ των πραγμάτων (Internet of Things ή IoT)

Το Internet of Things (ή IoT) αναφέρεται σε οποιοδήποτε αντικείμενο που είναι διασυνδεδεμένο σε ένα δίκτυο, συχνά εξοπλισμένο με πανταχού παρούσα νοημοσύνη. Με την ενσωμάτωση πολλών αντικειμένων για αλληλεπίδραση μέσω ενσωματωμένων συστημάτων, δημιουργείται ένα μεγάλο κατακευματισμένο δίκτυο επικοινωνιακών συσκευών-διευκολύνοντας την επικοινωνία ανθρώπου-συσκευής και συσκευής-συσκευής (Xia, et al., 2012). Η εισαγωγή του IoT θα μπορούσε να προσφέρει νέα επίπεδα ορατότητας και προσαρμοστικότητας και να βελτιώσει την απόδοση σε διάφορους τομείς, από έξυπνα σπίτια έως αλυσίδες εφοδιασμού. Σε μια αλυσίδα εφοδιασμού, τα δεδομένα που συλλέγονται από διάφορες συσκευές σε διαφορετικές περιοχές θα μπορούσαν να αναλυθούν και στη συνέχεια να ειδοποιήσουν τους χειριστές για τυχόν προβλήματα, παρέχοντας έγκαιρες προειδοποιήσεις (Ben-Daya, et al., 2019)

Προκειμένου οι συσκευές IoT να έχουν δεδομένα ενδιαφέροντος για να επικοινωνούν μεταξύ τους, πρέπει να είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες. Οι αισθητήρες για τις συσκευές IoT έρχονται σε όλα τα σχήματα και μεγέθη και είναι απολύτως απαραίτητοι για την έννοια των ψηφιακών διδύμων καθώς εισάγουν τα δεδομένα που ένα ψηφιακό δίδυμο θα μπορούσε να αναλύσει και να καθορίσει την τρέχουσα κατάσταση του φυσικού του διδύμου (Hasse, et al., 2019).

Το Digital Twin χρησιμοποιεί το IoT ως την κύρια τεχνολογία του σε κάθε εφαρμογή. Μέχρι το 2027, περισσότερο από το 90% όλων των πλατφορμών IoT θα έχουν

δυνατότητα Digital Twinning (ResearchandMarkets, 2022). Το IoT χρησιμοποιεί αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων από αντικείμενα του πραγματικού κόσμου. Τα δεδομένα που μεταδίδονται από το IoT χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ψηφιακής αντιγραφής ενός φυσικού αντικειμένου. Στη συνέχεια, η ψηφιακή έκδοση μπορεί να αναλυθεί, να χειριστεί και να βελτιστοποιηθεί. Το IoT ενημερώνει συνεχώς τα δεδομένα και βοηθά τις εφαρμογές Digital Twin να δημιουργήσουν μια εικονική αναπαράσταση σε πραγματικό χρόνο ενός φυσικού αντικειμένου. Επομένως, κάθε εφαρμογή Digital Twin χρησιμοποιεί το IoT ως κύρια τεχνολογία.

2.5.2 RFID

Μια άλλη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών IoT σε ένα δίκτυο είναι η RFID (Radio Frequency Identification ή Συσκευές Ταυτοποίησης Ραδιοσυχνοτήτων), η οποία επιτρέπει την αυτοματοποιημένη αναγνώριση συσκευών παρέχοντας τους φυσικές ετικέτες IoT. Αυτά μπορούν, μέσω της κοινής ραδιοφωνικής διεπαφής, να επικοινωνούν με έναν εξωτερικό αναγνώστη RFID. Οι αισθητήρες IoT παίζουν σημαντικό ρόλο στη μετάφραση ενδείξεων από τον φυσικό κόσμο σε χρησιμοποιήσιμα δεδομένα που μπορούν να επικοινωνηθούν μέσω του δικτύου IoT. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα πολυπλοκότητας και κόστους μεταξύ διαφορετικών ειδών αισθητήρων, ανάλογα με το ποια πληροφορία θεωρείται σχετική για συλλογή. Παρακάτω παρέχονται μερικά παραδείγματα αισθητήρων IoT:

- Αισθητήρας εγγύτητας (ή Proximity Sensor), ο οποίος εκπέμπει ένα σήμα (το οποίο μπορεί να είναι υπέρυθρο, υπέρηχος ή ηλεκτρομαγνητικός εν γένει) και καταγράφει παραλλαγές στα σήματα επιστροφής. Αυτή η μορφή αισθητήρα έχει το πλεονέκτημα ότι αφαιρεί την ανάγκη για φυσική επαφή. Οι αισθητήρες εγγύτητας θα μπορούσαν να είναι επαγωγικοί, χωρητικοί, υπερηχητικοί, φωτοηλεκτρικοί ή μαγνητικοί και χρησιμοποιούνται συχνά για εφαρμογές ασφάλειας και αποδοτικότητας σε πολλά είδη βιομηχανιών. Πολλά σύγχρονα αυτοκίνητα είναι επίσης εξοπλισμένα με αισθητήρες εγγύτητας για να βοηθήσουν τους οδηγούς να σταθμεύουν και να βλέπουν εμπόδια γύρω από το αυτοκίνητο. Οι αισθητήρες εγγύτητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό, την καταμέτρηση και τον προσδιορισμό της θέσης των αντικειμένων και τη μέτρηση της κίνησης των αντικειμένων μέσα στο σύστημα.
- Αισθητήρας θέσης (ή Position Sensor), ο οποίος είναι χρήσιμος κατά την ανίχνευση κινήσεων ενός αντικειμένου σε μια συγκεκριμένη περιοχή.
- Αισθητήρας πληρότητας ή παρουσίας (ή Occupancy/Presence Sensor), ο οποίος ανιχνεύει αντικείμενα σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Οι αισθητήρες πληρότητας μπορούν για παράδειγμα να παρακολουθούν θερμοκρασίες, φως και υγρασία.

- Άλλα παραδείγματα αισθητήρων είναι οι αισθητήρες κίνησης, αισθητήρες ταχύτητας, αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες πίεσης, χημικοί αισθητήρες, αισθητήρες ποιότητας νερού, οπτικοί αισθητήρες και αισθητήρες γυροσκοπίου (Sehrawat & Gill, 2019).

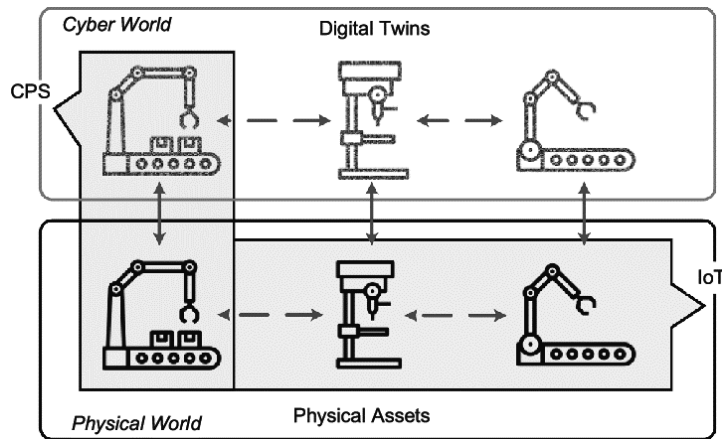
Η βασική πρόκληση είναι η εξασφάλιση της ικανότητάς τους να ενεργούν και να αντιδρούν έξυπνα και αξιόπιστα σε ένα δίκτυο όπου απαιτείται μεγαλύτερη διαλειτουργικότητα. Η εστίαση των μελλοντικών αισθητήρων θα κινηθεί προς δυνατότητες λογισμικού που υπερβαίνουν τη μέτρηση.

Είναι σημαντικό για τους αισθητήρες να έχουν την ικανότητα αυτοπροσδιορισμού και εξερεύνησης σε ένα δίκτυο, καθώς και αυτοπαρατήρησης, για να προσδιορίσουν πότε οι μετρήσεις είναι ή θα γίνουν λάθος σύντομα. Τέτοιες ευκαιρίες «διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων» είναι γνωστές εδώ και μια δεκαετία, αλλά η διαμόρφωση αισθητήρων για αυτοπαρατήρηση είναι δαπανηρή. Ένας σπασμένος αισθητήρας δεν αποτελεί πρόβλημα εάν το γνωρίζετε εκ των προτέρων και μπορείτε να λάβετε διορθωτικά μέτρα. Οι βέλτιστες βιομηχανικές διαδικασίες θα περιλαμβάνουν αισθητήρες που συνδέονται με την αυτόματη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων και θα προειδοποιούν ότι καταστρέφονται, προτού αυτό συμβεί. (Drath, 2019)

2.5.3. Κυβερνοφυσικά συστήματα (Cyber-physical systems ή CPS)

Ένα κυβερνοφυσικό σύστημα ορίζεται ευρέως ως ένα σύστημα που ενσωματώνει τον φυσικό και τον ψηφιακό κόσμο. Μέσω αισθητήρων, το σύστημα μπορεί να επικοινωνήσει τις συνθήκες του φυσικού κόσμου στον ψηφιακό κόσμο και αντίστροφα, επιτρέποντας στο αντίστοιχο περιουσιακό στοιχείο να προσαρμοστεί και να βελτιώσει την αποδοτικότητά του. Αυτό δημιουργεί έναν βρόχο πληροφοριών που ρέει μέσω του συστήματος αυτόνομα, χωρίς καμία ανθρώπινη παρέμβαση.

Παραδείγματα των CPS είναι τα βιομηχανικά συστήματα ελέγχου, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, έξυπνα δίκτυα και σχεδόν όλες οι συσκευές που περιλαμβάνονται στο Internet of Things (Zanero, 2017). Στην εικόνα 2.3 βλέπουμε πως γίνεται η συσχέτιση του Digital Twin, του CPS και του IoT.



Εικόνα 2.2. Συσχέτιση Digital Twin, CPS και IoT (Lu, et al., 2019)

Το Cyber-physical system και το digital twin είναι δύο βασικά στοιχεία για την υλοποίηση έξυπνων συστημάτων παραγωγής (Lee, et al., 2013). Το CPS ενισχύει την επικοινωνία μεταξύ έξυπνων οντοτήτων παραγωγής (αισθητήρες, ενεργοποιητές, έλεγχος κ.λπ.) και υπολογιστικούς πόρους στον κυβερνοχώρο για να διευκολύνει την παρακολούθηση, τη συλλογή δεδομένων, την αντίληψη, την ανάλυση και τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο των πόρων παραγωγής. Το ψηφιακό δίδυμο ενσωματώνει ιστορικά δεδομένα και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνονται από φυσικά συστήματα με μοντέλα βασισμένα στη φυσική και προηγμένα αναλυτικά στοιχεία για τη δημιουργία ψηφιακών ομολόγων με υψηλή ακεραιότητα, επίγνωση και προσαρμοστικότητα για την παροχή υπηρεσιών πρόβλεψης σε κατασκευαστικές οντότητες. Ενισχύει τη διαφάνεια και τη σκοπιμότητα των λειτουργιών στο CPS και διευκολύνει την παρακολούθηση, την προσομοίωση, τη βελτιστοποίηση και τον έλεγχο κυβερνοφυσικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο (Tao, et al., 2019). Ένα CPS που βασίζεται σε digital twin (DT-CPS) θα πρέπει συνεχώς να αποκτά, να ενσωματώνει, να αναλύει, να προσομοιώνει και να συγχρονίζει δεδομένα σε πολλαπλά στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος για να παρέχει υπηρεσίες πρόβλεψης κατ' απαίτηση σε διαφορετικούς χρήστες τόσο σε φυσικό όσο και σε κυβερνοχώρο. Τα βασικά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις για την ενσωμάτωση του digital twin στο CPS συνοψίζονται παρακάτω:

- Ολιστική συνδεσιμότητα και έξυπνα αντικείμενα: Τα στοιχεία παραγωγής πρέπει να είναι εξοπλισμένα με έξυπνους αισθητήρες με δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και ανταλλαγής δεδομένων με άλλα στοιχεία του δικτύου. Αυτές οι συνεχείς συναλλαγές δεδομένων απαιτούν μια ασφαλή, αξιόπιστη και υψηλής ταχύτητας πλατφόρμα.
- Προηγμένες αναλύσεις: Είναι απαραίτητο να αυτοματοποιηθεί ολόκληρη η διαδικασία προεπεξεργασίας, αντίληψης, ανάλυσης, εκμάθησης και εκτέλεσης δεδομένων χωρίς την ανάγκη εκτεταμένης ανθρώπινης παρέμβασης και χειροκίνητης μηχανικής χαρακτηριστικών. Αυτή η διαδικασία φέρνει λειτουργίες αυτοδιαμόρφωσης, αυτοπροσαρμογής και αυτομάθησης στα

συστήματα παραγωγής, γεγονός που αυξάνει την παραγωγικότητα, την ταχύτητα, την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα (Lee, et al., 2019; Donovan, et al., 2015).

- Συνεργατική λήψη αποφάσεων: Τα δεδομένα από πολλούς πόρους και οι περιορισμοί σε πραγματικό χρόνο πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επίτευξη μιας παγκόσμιας βέλτιστης λύσης. Σε αυτή τη διαδικασία, αξιολογείται η σκοπιμότητα, η αποτελεσματικότητα και τα σχέδια εκτέλεσης διαφορετικών παραγγελιών (Lee, et al., 2019).
- Αυτόνομη και γρήγορη κατασκευή και ενημερώσεις μοντέλων: Ο συγχρονισμός δεδομένων και η προηγμένη αντιστοίχιση μοντέλων μεταξύ εικονικών και φυσικών συστημάτων εγγυώνται την ελάχιστη διαφορά μεταξύ εικονικών στοιχείων και των φυσικών αντιστοίχων τους, η οποία είναι απαραίτητη για έλεγχο σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποίηση, πρόβλεψη κ.λπ.
- Αυτόνομος χειρισμός διαταραχών και έλεγχος ανθεκτικότητας: Τα κατασκευαστικά συστήματα πρέπει να ανταποκρίνονται αυτόνομα και ανθεκτικά σε αστοχίες προκειμένου να αποτρέπονται καταστροφικές λειτουργικές διακοπές.

2.5.4. Μεγάλα Δεδομένα (Big Data)

Τα μεγάλα δεδομένα ή αλλιώς big data αναφέρονται σε μεγάλα σύνολα πολύπλοκων δεδομένων, δομημένων και μη δομημένων, τα οποία οι παραδοσιακές τεχνικές επεξεργασίας και/ή αλγόριθμοι δεν μπορούν να λειτουργήσουν. Στόχος τους είναι να αποκαλύψουν κρυμμένα μοτίβα και έχουν οδηγήσει σε μια εξέλιξη από ένα πρότυπο επιστήμης το οποίο βασίζεται σε μοντελοποίηση, σε ένα πρότυπο επιστήμης το οποίο βασίζεται σε δεδομένα. Σύμφωνα με μελέτη των (Boyd & Crawford, 2012) «βασίζεται στην αλληλεπίδραση της:

- Τεχνολογίας: μεγιστοποίηση υπολογιστικής ισχύος και αλγοριθμικής ακρίβειας για συλλογή, ανάλυση, σύνδεση και σύγκριση μεγάλων συνόλων δεδομένων.
- Ανάλυσης: βασίζεται σε μεγάλα σύνολα δεδομένων για τον εντοπισμό προτύπων προκειμένου να υποβληθούν οικονομικές, κοινωνικές, τεχνικές και νομικές αξιώσεις.
- Μυθολογίας: η ευρέως διαδεδομένη πεποίθηση ότι τα μεγάλα σύνολα δεδομένων προσφέρουν μια υψηλότερη μορφή ευφυΐας και γνώσης που μπορεί να δημιουργήσει γνώσεις που ήταν αδύνατες προηγουμένως, με την αύρα της αλήθειας, της αντικειμενικότητας και της ακρίβειας.»

Επιστήμονες της IBM αναφέρουν ότι τα μεγάλα δεδομένα έχουν τέσσερις διαστάσεις, τον όγκο, την ταχύτητα, την ποικιλία και την ακρίβεια. Σύμφωνα με την (Gartner,

2021) τα μεγάλα δεδομένα είναι «περιουσιακά στοιχεία πληροφοριών μεγάλου όγκου, υψηλής ταχύτητας και/ή μεγάλης ποικιλίας που απαιτούν οικονομικά αποδοτικές, καινοτόμες μορφές επεξεργασίας πληροφοριών που επιτρέπουν βελτιωμένη διορατικότητα, λήψη αποφάσεων και αυτοματοποίηση διαδικασιών». Παρακάτω θα δούμε την περιγραφή των τεσσάρων διαστάσεων σύμφωνα με τους (Katal, et al., 2013):

- **Όγκος:** Τα τρέχοντα δεδομένα είναι σε petabytes, που είναι ήδη προβληματικό. Προβλέπεται ότι τα επόμενα χρόνια θα αυξηθεί σε zettabytes (ZB). Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση της χρήσης κινητών συσκευών και κοινωνικών δικτύων.
- **Ταχύτητα:** Αναφέρεται τόσο στον ρυθμό λήψης δεδομένων όσο και στον ρυθμό ροής δεδομένων. Η αυξημένη αξιοπιστία σε ζωντανά δεδομένα προκαλεί προκλήσεις για παραδοσιακές αναλύσεις καθώς τα δεδομένα είναι πολύ μεγάλα και συνεχώς σε κίνηση.
- **Ποικιλία:** Δεδομένου ότι τα δεδομένα που συλλέγονται δεν ανήκουν σε συγκεκριμένη κατηγορία ή από μία πηγή, υπάρχουν πολυάριθμες ακατέργαστες μορφές δεδομένων, που λαμβάνονται από τον ιστό, κείμενα, αισθητήρες, e-mail κ.λπ. που είναι δομημένες ή αδόμητες. Αυτή η μεγάλη ποσότητα προκαλεί αποτυχία παλιών παραδοσιακών αναλυτικών μεθόδων στη διαχείριση μεγάλων δεδομένων.
- **Ακρίβεια:** Η ασάφεια στα δεδομένα είναι ο κύριος στόχος σε αυτήν τη διάσταση η οποία συνήθως προκαλείται από θόρυβο και ανωμαλίες εντός των δεδομένων που διαχειριζόμαστε.

Στην εποχή του IoT, όλο και περισσότερες συσκευές είναι συνδεδεμένες στο ίντερνετ οπότε μεγάλοι όγκοι δεδομένων συλλέγονται από RFID, αισθητήρες, πύλες κλπ και μεταδίδονται μέσω του IoT. Εκτός αυτού, το mobile internet, η κοινωνική δικτύωση, το ηλεκτρονικό εμπόριο κ.λπ., διευρύνουν σε μεγάλο βαθμό τις εφαρμογές του διαδικτύου. Ως αποτέλεσμα, διάφορα δεδομένα αναπτύσσονται ραγδαία. Σε διάφορους κλάδους, η λήψη αποφάσεων βασίζεται όλο και περισσότερο σε δεδομένα και σε ανάλυση και όχι σε εμπειρία. Τα δεδομένα γίνονται τα σημαντικά στοιχεία της ανθρώπινης κοινωνίας και έχει έρθει η εποχή των μεγάλων δεδομένων (Bughin, et al., 2010).

Το digital twin χρησιμοποιείται σε τομείς που έχουν πολλαπλά στοιχεία με αποτέλεσμα πολλαπλές παραμέτρους. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα που συλλέγονται από αυτές τις πηγές καταλήγουν να είναι ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων υψηλών διαστάσεων. Επιπλέον, εάν οι χρονικές συχνότητες των δεδομένων που συλλέγονται από αυτά τα διαφορετικά στοιχεία δεν ταιριάζουν, τα δεδομένα που προκύπτουν μπορεί να κατακερματιστούν. Επομένως, υπάρχουν χρονικές καθυστερήσεις στα δεδομένα χρονοσειρών. Επιπλέον, η συλλογή δεδομένων από πολλαπλά

διασυνδεδεμένα και μη συνδεδεμένα στοιχεία, με συγχρονισμό υψηλής ροής και ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων, είναι ένα δύσκολο έργο από άποψη τεχνολογίας, υλοποίησης, κόστους και πόρων (Min, et al., 2019).

Οι (Min, et al., 2019) εντοπίζουν δύο βασικά ζητήματα που σχετίζονται με την εφαρμογή ψηφιακού δίδυμου στον πραγματικό κόσμο με το στοιχείο δεδομένων του:

- Καθώς ένα δυναμικό περιβάλλον απαιτεί ένα καλά ερευνημένο εργαλείο, απαιτούνται καλύτερα συγκεκριμένα και πρακτικά πλαίσια για την εφαρμογή μεγάλων δεδομένων στο συνεχώς μεταβαλλόμενο περιβάλλον του digital twin.
- Ζητήματα επεξεργασίας δεδομένων για δεδομένα χρονοσειρών: Τα δεδομένα που συλλέγονται από συσκευές IoT στο εργοστάσιο έχουν μεγάλες διαστάσεις. Επιπλέον, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορεί να έχουν διαφορετικούς χρονικούς κύκλους.

Οι συγγραφείς εντοπίζουν τα παραπάνω προβλήματα και λύνουν το πρόβλημα της χρήσης δεδομένων από διαφορετικές χρονικές συχνότητες, προτείνοντας μια μέθοδο παραγωγής δεδομένων χρονοσειρών ίδιας συχνότητας.

Οι (Tao, et al., 2018) κάνουν μια προσπάθεια να ορίσουν τα βήματα για την προεπεξεργασία δεδομένων, την εξόρυξη δεδομένων και τη βελτιστοποίηση δεδομένων για το digital twin, τα οποία είναι απαραίτητα για μεγάλα σύνολα δεδομένων. Μια άλλη εργασία των (Tao, et al., 2018) συζητά τους περιορισμούς της συγκέντρωσης μεγάλων συνόλων δεδομένων. Η εργασία αξιολογεί επίσης τα προβλήματα στη διαχείριση δεδομένων ειδικά για τον τομέα PLM, όπως η ύπαρξη διπλών δεδομένων, η απουσία ανάλυσης μεγάλων δεδομένων και η ύπαρξη αποσυντεθειμένων δεδομένων σε διαφορετικές φάσεις του PLM. Η εργασία προτείνει το digital twin ως λύση για τη σύγκριση αυτών των ασυνεπών δεδομένων με πραγματικές τιμές στο PLM. Οι (Lu, et al., 2019) επισημαίνουν ότι η γνώση τομέα θα μπορούσε να βοηθήσει στην αντιμετώπιση προβλημάτων δεδομένων που λείπουν.

Οι (Qi & Tao, 2018) συγκρίνουν και αντιπαραβάλλουν τα μεγάλα δεδομένα και το digital twin, στο πλαίσιο του smart manufacturing και του Industry 4.0. Θεωρούν ότι ο κύριος ρόλος του digital twin είναι η κυβερνο-φυσική ενοποίηση, έτσι ώστε το digital twin να διατηρεί μια ακριβή αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος, η οποία θα μπορούσε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη και την ανατροφοδότηση αποφάσεων βελτιστοποίησης στο πραγματικό σύστημα.

Οι (Huang, et al., 2020; Suhail, et al., 2022) παρουσιάζουν μια λύση blockchain για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ακεραιότητας των δεδομένων σε ένα σύστημα. Παρά το γεγονός ότι είναι πολλά υποσχόμενο για τα συστήματα υγείας, τα χρηματοπιστωτικά συστήματα και τις διβιομηχανικές συνεργασίες, αυτή η ιδέα προσθέτει στην πολυπλοκότητα του χειρισμού δεδομένων. Η προσθήκη τεχνολογίας blockchain στο digital twin και η βελτιστοποίησή του με τα υπόλοιπα στοιχεία θα

ήταν η επόμενη πρόκληση μετά την ενσωμάτωση λύσεων μεγάλων δεδομένων στο digital twin (Lu, 2019).

Οι πιο πρόσφατες μέθοδοι διαχείρισης δεδομένων μπορούν να διευκολύνουν τη συμπερίληψη της υλοποίησης μεγάλων δεδομένων στο digital twin. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι το υβριδικό νέφος, όπου οι πελάτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν πολλαπλούς προμηθευτές cloud μαζί με συστήματα πληροφοριών και να διαχειρίζονται το προκύπτον κυμαινόμενο κόστος σύμφωνα με την απαίτηση, συνδυάζοντας με ασφάλεια ιδιωτικά και περισσότερα από ένα δημόσια σύννεφα (Zhang, et al., 2022).

Ένα άλλο εργαλείο είναι η επαυξημένη διαχείριση δεδομένων, η οποία χρησιμοποιεί μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης για την αυτοματοποίηση των εργασιών διαχείρισης δεδομένων. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στη μείωση των χειροκίνητων εργασιών διαχείρισης δεδομένων κατά 45%, εξοικονομώντας έτσι πόρους και αυξάνοντας την ταχύτητα ανάπτυξης (Defize, et al., 2021).

Σε σχέση με τη ροή δεδομένων και πληροφοριών, η έννοια του πλαισίου «ψηφιακό νήμα» παρέχει μια πλήρη άποψη δεδομένων ενός προϊόντος, από την έναρξή του μέχρι τον τελικό του στόχο, δηλαδή σε όλο τον κύκλο ζωής του, αντί για μεμονωμένα σιλό πληροφοριών (Singh & Willcox, 2018). Παρέχει μια άποψη της συνεχούς ροής πληροφοριών, η οποία μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των σχεδίων προϊόντων, την ανακάλυψη βελτιωμένων στρατηγικών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων με βάση την επισκόπηση δεδομένων. Έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως στην αεροδιαστημική και στρατιωτική για τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας και της εμπλοκής με το ψηφιακό δίδυμο, καθώς το ψηφιακό νήμα μπορεί να τροφοδοτήσει το ψηφιακό δίδυμο με δεδομένα και ενημερώσεις.

Παρά το γεγονός ότι εξαρτώνται από τον εκάστοτε τομέα εφαρμογής, υπάρχουν προκλήσεις σχετικά με τα δεδομένα στο digital twin που υπάρχουν σε όλους τους τομείς, όπως είναι ο χειρισμός δεδομένων (υψηλής διάστασης, χρονοσειρές, επικοινωνία δεδομένων πολλαπλών μέσων και πολλαπλών πηγών, η αβεβαιότητα που διαμορφώνεται σε δεδομένα πρότυπα μεταφοράς ή στα δεδομένα που μεταφέρονται. Σε μεγάλους οργανισμούς τα δεδομένα χρονοσειράς συλλέγονται από πολυάριθμες συσκευές IoT, με αποτέλεσμα υψηλές διαστάσεις για το σύνολο δεδομένων. Επιπλέον, συλλέγοντας δεδομένα από πολύ μεγάλο αριθμό συσκευών IoT, η αντιπαράβολή του σύμφωνα με τις χρονικές συχνότητες και η προεπεξεργασία του για είσοδο στη μηχανική εκμάθηση είναι μια άλλη πρόκληση. Ο χειρισμός αυτών των μεγάλων συνόλων δεδομένων απαιτεί επίσης κατάλληλους πόρους για τα βήματα αποθήκευσης και προεπεξεργασίας.

2.5.5. Μηχανική Μάθηση (Machine Learning)

Η μηχανική μάθηση είναι ένας από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τεχνικούς τομείς σήμερα. Συνδυάζει στοιχεία τόσο από την επιστήμη των υπολογιστών όσο και από την επιστήμη της στατιστικής και μπορεί να οριστεί ως ένα σύστημα υπολογιστών του οποίου η απόδοση βελτιώνεται αυτόματα μέσω εμπειρίας. Με απλά λόγια, η μηχανική μάθηση επικεντρώνεται σε δύο ερωτήσεις: «Πώς μπορεί κανείς να κατασκευάσει συστήματα υπολογιστών που βελτιώνονται αυτόματα μέσω της εμπειρίας και ποιοι είναι οι θεμελιώδεις στατιστικοί-υπολογιστικοί-θεωρητικοί νόμοι που διέπουν όλα τα συστήματα μάθησης, συμπεριλαμβανομένων των υπολογιστών, των ανθρώπων και των οργανισμών;» (Mitchell, 2006).

Οι όροι μηχανική μάθηση και τεχνητή νοημοσύνη (AI) χρησιμοποιούνται συχνά εναλλάξ. Ωστόσο, η μηχανική μάθηση θεωρείται ένα υποσύνολο της τεχνητής νοημοσύνης, ο οποίος είναι ένας ευρύτερος όρος που περιλαμβάνει ολόκληρο το πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης. Επομένως, ενώ η μηχανική μάθηση είναι ίδια με την AI, η AI δεν είναι απαραίτητα η ίδια με τη μηχανική μάθηση (Camerer, 2019).

Υπάρχει μια τεράστια ποικιλία εφαρμογών στις οποίες χρησιμοποιείται η μηχανική μάθηση όπως η αναγνώριση ομιλίας, η μηχανική όραση, η επεξεργασία γλωσσών και ο έλεγχος ρομπότ. Για ορισμένα συστήματα μηχανικής μάθησης, θα μπορούσε να είναι πιο αποτελεσματικό να εκπαιδευτεί το σύστημα τροφοδοτώντας το με παραδείγματα εισόδων και εξόδων αντί να κωδικοποιηθεί χειροκίνητα. Σήμερα, η μηχανική μάθηση εφαρμόζεται σταδιακά σε διάφορους τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, η εκπαίδευση, η βιομηχανική παραγωγή, το μάρκετινγκ, η εξυπηρέτηση των καταναλωτών και η εφοδιαστική αλυσίδα (Mitchell, 2006).

Οι δομές μηχανικής μάθησης θα μπορούσαν να παρέχουν σε ένα Digital Twin την ικανότητα ανάλυσης και λήψης αποφάσεων με βάση δεδομένα τα οποία λαμβάνει σε πραγματικό χρόνο. Με βάση αυτά τα δεδομένα, το Digital Twin θα μπορούσε επίσης να κάνει βελτιστοποιήσεις και προβλέψεις για πιθανά μελλοντικά αποτελέσματα (Hasse, et al., 2019).

Οι συμβατικές μέθοδοι που βασίζονται στη γνώση βασίζονται σε εφάπαξ αποτελέσματα μηχανικής μάθησης, ενώ ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια συνεχής διαδραστική διαδικασία. Η ικανότητα μηχανικής εκμάθησης σε πραγματικό χρόνο είναι αυτό που διαφοροποιεί ένα Digital Twin από έναν προσομοιωτή ή ένα εργαλείο παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Η ανάλυση δεδομένων είναι ουσιαστικής σημασίας, καθώς μία από τις βασικές χρήσεις ενός Digital Twin είναι να μπορεί κανείς να παράγει αξιόπιστα και με ακρίβεια πώς θα συμπεριφερόταν ένα φυσικό περιουσιακό στοιχείο σε συνθήκες που δεν έχουν ακόμη προκύψει, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που λαμβάνει – με άλλα λόγια – για «δοκιμή» του φυσικού περιουσιακού στοιχείου σε απρόβλεπτη κατάσταση. Η άλλη βασική χρήση του machine learning στο Digital Twin είναι η πρόβλεψη ενός επικείμενου

προβλήματος που χρειάζεται προσοχή, ενώ αποκαλύπτει τις ατέλειες στο σύστημα (ανίχνευση ανωμαλιών) (Celebi & Aydin, 2016).

Ένα έργο που εξερευνά το ψηφιακό δίδυμο με τη μηχανική μάθηση είναι η έρευνα των (Min, et al., 2019). Παρουσιάζει μια απόδειξη της ιδέας για τη χρήση μηχανικής μάθησης με ψηφιακό δίδυμο στην πετροχημική βιομηχανία, χρησιμοποιώντας αλγόριθμους όπως τυχαίο δάσος, AdaBoost, XGBoost, δέντρο απόφασης ενίσχυσης κλίσης (GBDT), LightGBM και νευρωνικά δίκτυα. Ωστόσο, δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την ακριβή μεθοδολογία υλοποίησης και το λογισμικό για το digital twin και πώς υλοποιήθηκε ολόκληρη η απόδειξη της ιδέας σε βρόχο ανάδρασης σε πραγματικό χρόνο.

Μια άλλη εργασία, των (Dröder, et al., 2018), συζητά τη χρήση ενός λογισμικού προσομοίωσης μαζί με τη μηχανική μάθηση για ένα προϊόν και το χαρακτηρίζει ως «η προσέγγιση του ψηφιακού διδύμου». Αυτό είναι αποτέλεσμα ασυνέπειας σε μια ενοποιημένη αρχιτεκτονική και ορισμό του ψηφιακού διδύμου, καθώς η κλήση ενός λογισμικού προσομοίωσης χωρίς σύγχρονη σύνδεση σε πραγματικό χρόνο με το φυσικό προϊόν ως ψηφιακό δίδυμο μπορεί να είναι σωστή σύμφωνα με ορισμένους ορισμούς και ανακριβή, σύμφωνα με άλλους. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για μια τεχνολογία να ορίζονται τα στοιχεία της, να ορίζονται και να διαφοροποιούνται από άλλες τεχνολογίες.

Η «αυτοεξελισσόμενη» φύση του digital twin, όπου μπορεί να βελτιωθεί από τα αληθινά αποτελέσματα των προβλέψεών του, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο με τη χρήση μηχανικής μάθησης. Η μηχανική μάθηση μπορεί επίσης να βοηθήσει στη δημιουργία ανθεκτικών digital twin. Η πολλά υποσχόμενη εργασία των (Cronrath, et al., 2019) χρησιμοποιεί μηχανική μάθηση στο digital twin όχι ως μηχανισμό ανάδρασης/αναλυτικό εργαλείο, αλλά ως επίλυση σφαλμάτων. Χρησιμοποίησαν ενισχυτική μάθηση για να κάνουν το ψηφιακό δίδυμο ανθεκτικό είτε σε σφάλματα δεδομένων είτε σε σφάλματα μοντέλου και για να μάθουν να διορθώνουν αυτές τις ασυνέπειες από μόνο του.

Οι πιο πρόσφατες μέθοδοι στην έρευνα μηχανικής μάθησης, όπως η continual learning (Lopez-Paz & Ranzato, 2017) και η federated learning (Yang, et al., 2019) θεωρούνται εξαιρετικά σχετικές και δυνητικά χρήσιμες στο digital twin. Με τη continual learning ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης ενημερώνεται με την εισερχόμενη ροή δεδομένων. Αν και δυνητικά επιρρεπείς σε λανθασμένα δεδομένα, νέες ερευνητικές μέθοδοι και αποτελέσματα έχουν αρχίσει να αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα όπως των (Kirkpatrick, et al., 2017). Αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει στην εφαρμογή της «αυτοεξελισσόμενης» ιδιότητας του digital twin.

Η federated learning στοχεύει στην αντιμετώπιση σεναρίων όπου οι ανταγωνιστικές εταιρείες ή συνεργάτες δεν θέλουν να μοιραστούν τα δεδομένα τους, για λόγους ιδιωτικότητας και ασφάλειας. Στην federated learning, μόνο οι παράμετροι του

μοντέλου μοιράζονται με τους συνεργάτες, ενώ τα δεδομένα δεν φεύγουν ποτέ από τον κεντρικό υπολογιστή. Μαζί με την τεχνολογία του blockchain, η federated learning θα μπορούσε να προσφέρει βελτιωμένες λύσεις απορρήτου σε βιομηχανικές εφαρμογές που βασίζονται στο IoT (Lu, et al., 2020).

Οι ακόλουθες τεχνικές προκλήσεις σχετίζονται με την έλλειψη μηχανικής μάθησης σε υπάρχουσες υλοποιήσεις digital twin:

- Κοινή βελτιστοποίηση για όλα τα υποπροβλήματα: Για την περίπτωση των αεροδιαστημικών βιομηχανιών πχ, πολλαπλές παράμετροι οδηγούν σε ένα πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Ανάλογα με το μέγεθος του κλάδου, ο αριθμός των παραμέτρων που εμπλέκονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μηχανικής μάθησης μπορεί να είναι τεράστιος. Αν και κάθε κλάδος έχει μικρότερα προβλήματα βελτιστοποίησης που επιλύονται σε διάφορα υποεπίπεδα, ο αποτελεσματικός συνδυασμός αυτών των υποπροβλημάτων σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και η επιλογή των σωστών εργαλείων μηχανικής εκμάθησης είναι μια πρόκληση που απαιτεί γνώση τόσο του τομέα όσο και της μηχανικής μάθησης. Μπορούν να γίνουν καλύτερες προβλέψεις ολόκληρου του φυσικού περιουσιακού στοιχείου, εάν ληφθούν υπόψη τα περισσότερα στοιχεία του περιουσιακού στοιχείου, με αποτέλεσμα ένα κοινό πρόβλημα βελτιστοποίησης με βάση τη μηχανική μάθηση. Αυτό το είδος ενοποιημένου μοντέλου θα διευκολύνει και θα σταθμίσει τις προτεραιότητες σε ένα σύστημα και θα εκτελέσει συστηματικές αναλύσεις.
- Deep learning με digital twin: Η εφαρμογή λύσεων βαθιάς μάθησης απαιτεί υπολογιστικούς πόρους, τεχνογνωσία και έρευνα (Jiang, et al., 2021; Liu, et al., 2019). Η διαχείριση δεδομένων υψηλών διαστάσεων, με τα διάφορα άλλα λογισμικά που χρησιμοποιεί ένας κλάδος, και ο συνδυασμός τους με δεξιότητες και εξοπλισμό ειδικών σε βάθος εκμάθησης είναι μια κουραστική εργασία. Νέες μέθοδοι όπως η continual learning (Lopez-Paz & Ranzato, 2017) και η federated learning (Yang, et al., 2019) είναι πολλά υποσχόμενες για τη χρήση του digital twin και απαιτούν περαιτέρω έρευνα. Επίσης, μέθοδοι όπως η συνεχής εκμάθηση απαιτούν συγχρονισμό υψηλής πιστότητας για συνεχή ανάδραση, η οποία εξαρτάται από τις συσκευές IoT και τη σύνδεση δικτύου. Αυτό μπορεί να είναι εξαιρετικά περίπλοκο για μεγάλα συστήματα που έχουν διαφορετικούς λανθάνοντες χρόνους και μορφές δεδομένων.
- Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των διαθέσιμων δεδομένων και ως εκ τούτου βασίζονται σε αυτά τα δεδομένα. Η διαθεσιμότητα δεδομένων καλής ποιότητας αποτελεί προαπαιτούμενο και πρόκληση, καθώς η ανάκτηση/επεξεργασία αυτών των δεδομένων μπορεί να εξαρτάται από διάφορους άλλους παράγοντες, όπως οι

διαθέσιμοι πόροι για την αποθήκευση των δεδομένων και οι κάρτες γραφικών για την επεξεργασία δεδομένων υψηλών διαστάσεων.

2.5.6. Υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing)

Το cloud computing είναι ένα μοντέλο που επιτρέπει την κοινή πρόσβαση δικτύου σε υπολογιστικούς πόρους. Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό νέφος, ο χρήστης μπορεί να έχει πρόσβαση σε μια ομάδα πόρων που ανήκουν και συντηρούνται από τρίτους μέσω του διαδικτύου. Η πρόσβαση σε αυτούς τους πόρους είναι ανεξάρτητη από τη φυσική τους θέση. Παραδείγματα υπολογιστικών πόρων που χρησιμοποιούνται στο cloud computing είναι η αποθήκευση δεδομένων, οι βάσεις δεδομένων, η υπολογιστική ισχύς και οι υπηρεσίες όπως η επεξεργασία αναλυτικών δεδομένων (Arora & Parashar, 2013).

Από την πλευρά ενός Digital Twin, η ανάπτυξη και η συντήρηση ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ και αποθήκευση, καθώς παράγει συνεχώς τεράστιους όγκους δεδομένων που πρέπει να υποβληθούν σε επεξεργασία. Μια υπηρεσία cloud θα μπορούσε επομένως να είναι μια καλή επιλογή για πολλούς οργανισμούς που επιθυμούν να διατηρήσουν το κόστος σε χαμηλά επίπεδα διατηρώντας παράλληλα την ευελιξία που αυτά προσφέρουν. Όπως για παράδειγμα η υπηρεσία της Microsoft Azure η οποία δεν χρεώνει κάποιο κόστος εκ των προτέρων ή τέλος τερματισμού, παρά μόνο για τα δεδομένα που οι πελάτες καταναλώνουν (Azure, 2021)

Το νέφος μπορεί επίσης να είναι επωφελές όταν πρόκειται για τη δημιουργία υποδομής για την αποθήκευση δεδομένων. Τα νέφη περιέχουν σημαντικά μέτρα ασφαλείας, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι όλα τα δεδομένα είναι κρυπτογραφημένα από και προς τον χρήστη (end to end encryption) σε κάθε κέντρο δεδομένων. Με τους δημόσιους παρόχους cloud, τα δεδομένα κρυπτογραφούνται επίσης σε ηρεμία (encryption at rest). Αυτό σημαίνει ότι όταν αποθηκεύονται δεδομένα σε ένα δίσκο δεδομένων, τα δεδομένα παραμένουν κρυπτογραφημένα ακόμη και αν ο δίσκος δεδομένων χαθεί ή κλαπεί. Επιπλέον, οι πάροχοι cloud έχουν αυστηρά μέτρα φυσικής ασφάλειας στα κέντρα δεδομένων τους, επομένως δεν μπορεί να ειπωθεί ότι υπάρχει πιο σημαντικός αυξημένος κίνδυνος με την αποθήκευση δεδομένων στο cloud και όχι σε λύση εσωτερικού δικτύου. Πολλές μεγαλύτερες εταιρείες χρησιμοποιούν ιδιωτικούς εργολάβους για τις υπηρεσίες cloud τους όπως π.χ. η GE Aviation χρησιμοποιεί τις υπηρεσίες της Azure για να δημιουργήσει ένα ψηφιακό δίδυμο ενός αεροπλάνου. (Azure, 2021)

2.5.7. Διεπαφή προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interface ή API)

Τα API επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ εφαρμογών όπως βάσεις δεδομένων, δίκτυα και αισθητήρες IoT. Τα API είναι δομικά στοιχεία που έχουν δημιουργηθεί από

προγραμματιστές για επαναχρησιμοποίηση, οπότε δεν χρειάζεται κάποιος να ξανακάνει τον προγραμματισμό από την αρχή. Ένα σαφές παράδειγμα αυτού είναι το API των χαρτών της Google που μπορεί να ενσωματωθεί απρόσκοπτα με περιεχόμενο από κάποιον για να δει σημεία ενδιαφέροντος που βρίσκονται κοντά στον χάρτη. Σε αυτή την περίπτωση, δεν χρειάζεται κάποιος να προγραμματίσει έναν εντελώς νέο χάρτη, κάτι που εξοικονομεί χρόνο και πόρους (Congrad, et al., 2015). Καθώς πολλοί σύγχρονοι οργανισμοί εργάζονται με υπολογιστικό νέφος, τα API βοηθούν στην αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων μεταξύ νεφών, συσκευών και άλλων συστημάτων. Στην παρακάτω εικόνα 2.3. μπορούμε να δούμε το ρόλο των API στη δημιουργία μιας εφαρμογής.



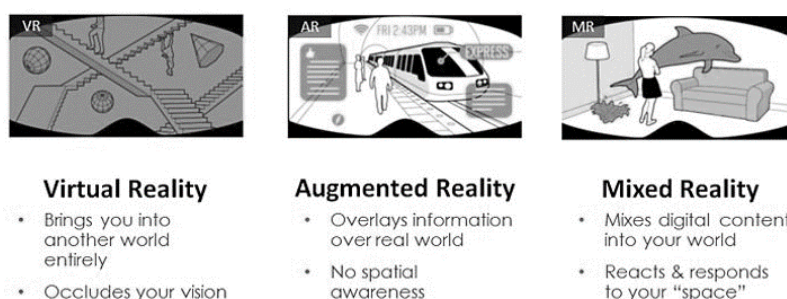
Εικόνα 2.3. Ο ρόλος των API στην δημιουργία εφαρμογής (Wodehouse, 2016)

Όσον αφορά την ασφάλεια των δεδομένων που περιέχονται στο ψηφιακό δίδυμο, το πιο σημαντικό στοιχείο είναι ότι υπάρχουν API και σαφή δικαιώματα πρόσβασης. Η διαχείριση ανοιχτών API καθιστά τη διαχείριση χρηστών ακόμη πιο σημαντική. Εάν μια εταιρεία παρέχει δικαιώματα σε ορισμένους χρήστες να αποκτήσουν πρόσβαση σε δεδομένα, ο μεγαλύτερος κίνδυνος ασφάλειας έγκειται στον κίνδυνο παραβίασης των λογαριασμών δεδομένων των χρηστών. Ως εκ τούτου, η σταθερή διαχείριση ασφάλειας και κωδικού πρόσβασης από χρήστες API είναι υποχρεωτική. Ενώ μπορεί σίγουρα να υπάρχουν συνδυασμοί ανοιχτών και ιδιωτικών API, οι περισσότερες εταιρείες είναι πιθανό να ξεκινήσουν με ιδιωτικά για τη διαχείριση πληροφοριών που θα παραμείνουν εντός του οργανισμού, επιτρέποντας μόνο σε σαφείς υποομάδες πληροφοριών να διαβιβάζονται σε τρίτους.

2.5.8. Επαυξημένη, εικονική και μικτή πραγματικότητα (Augmented, Virtual και Mixed Reality ή AR, VR και MR)

Η επαυξημένη και η εικονική πραγματικότητα γίνονται και τα δύο από τα δημοφιλέστερα εργαλεία όσον αφορά την ενίσχυση της εμπειρίας του χρήστη. Η εικονική πραγματικότητα είναι μια τεχνολογία που μιμείται τον πραγματικό κόσμο και πώς ο χρήστης τον βιώνει εικονικά δημιουργώντας έναν εικονικό κόσμο. Αυτός ο εικονικός κόσμος μπορεί να είναι οτιδήποτε, από τη δημιουργία ενός προσομοιώματος υψηλής πιστότητας του πραγματικού κόσμου έως την προσομοίωση ενός συγκεκριμένου μέρους της εμπειρίας του χρήστη. Αντίθετα, η επαυξημένη πραγματικότητα προσθέτει ένα επίπεδο πληροφοριών στον πραγματικό κόσμο αντί να

δημιουργεί έναν εντελώς νέο εικονικό κόσμο. Ένα απτό παράδειγμα καθημερινής επαυξημένης πραγματικότητας χρησιμοποιείται από ορισμένες εφαρμογές έξυπνων τηλεφώνων, όπου προστίθενται στοιχεία σαφώς ορατά μέσω της κάμερας του τηλεφώνου που δεν φαίνονται στον φυσικό κόσμο (Ge, et al., 2017). Τέλος, υπάρχει η μικτή πραγματικότητα, όπου γίνεται η συγχώνευση πραγματικών και εικονικών κόσμων για τη παραγωγή νέων περιβαλλόντων, όπου πραγματικά και ψηφιακά αντικείμενα συνυπάρχουν και αλληλοεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο. Η μικτή πραγματικότητα προϋποθέτει την τοποθέτηση εικονικών πραγματικοτήτων μέσα σε έναν πραγματικό χώρο, με τέτοιο τρόπο ώστε, η νέα εικόνα (εικονική πραγματικότητα) να είναι σε θέση να αλληλοεπιδράσει ως ένα βαθμό με την πραγματικότητα του φυσικού χώρου. Στην εικόνα 2.5 βλέπουμε ένα παράδειγμα του πώς οι πραγματικότητες που αναλύσαμε παραπάνω διαφέρουν μεταξύ τους.



Εικόνα 2.3. Διαφορές μεταξύ AR, VR και MR (Saxena, 2018)

Στο πλαίσιο ενός Digital Twin, τόσο η επαυξημένη όσο και η εικονική πραγματικότητα μπορούν να είναι χρήσιμα εργαλεία για την προβολή και τον έλεγχο του ψηφιακού δίδυμου είτε σε οθόνη (2D) είτε σε φυσικό χώρο (3D) (Ke, et al., 2019). Οι προαναφερθείσες τεχνολογίες όπως το IoT, το cloud computing, τα API και η μηχανική εκμάθηση παρέχουν και επεξεργάζονται όλη την απαραίτητη υποδομή και τα δεδομένα προκειμένου να δημιουργήσουν και να απεικονίσουν ένα ψηφιακό δίδυμο είτε σε επαυξημένη είτε και σε εικονική πραγματικότητα.

2.6 Σύνοψη κεφαλαίου

Τα τελευταία χρόνια, ο όρος «ψηφιακό δίδυμο» έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στους τομείς της μηχανικής, της παραγωγής, των logistics και άλλων κλάδων. Υπάρχει πληθώρα ορισμών για το τι συνιστά ένα ψηφιακό δίδυμο. Ο πιο κοινός ορισμός θέτει το ψηφιακό δίδυμο ως ένα εικονικό αντίγραφο ενός φυσικού αντικειμένου, συστήματος ή διαδικασίας που δημιουργείται χρησιμοποιώντας δεδομένα και προσομοίωση.

Αυτή η τεχνολογία έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος του Industry 4.0, όπου η αυτοματοποίηση και τα δεδομένα οδηγούν το επόμενο κύμα παραγωγής και

βιομηχανικής καινοτομίας. Το ψηφιακό δίδυμο το επιτυγχάνει μέσω της ενσωμάτωσης του σε διάφορες τεχνολογίες όπως αισθητήρες IOT, RFID ή κυβερνοφυσικά συστήματα κλπ. Οι επιχειρήσεις μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών τους, να μειώσουν το κόστος και να βελτιώσουν την ικανοποίηση των αναγκών του πελάτη.

Η έννοια του ψηφιακού δίδυμου έχει τις ρίζες της στην αεροδιαστημική βιομηχανία, όπου οι μηχανικοί χρησιμοποίησαν ψηφιακά μοντέλα για να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά των αεροσκαφών και των εξαρτημάτων τους. Με την πάροδο του χρόνου, αυτή η τεχνολογία έχει εξελιχθεί για να περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής έως τη βελτίωση του σχεδιασμού των προϊόντων και της εμπειρίας του πελάτη.

Για παράδειγμα στον βιομηχανικό εξοπλισμό, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της απόδοσης του εξοπλισμού, την πρόβλεψη των αναγκών συντήρησης και τη βελτίωση της απόδοσης.

Συμπερασματικά, τα digital twins είναι μια ισχυρή τεχνολογία που έχει τη δυνατότητα να μεταμορφώσει ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών. Καθώς το Industry 4.0 συνεχίζει να εξελίσσεται, τα ψηφιακά δίδυμα είναι πιθανό να γίνουν ένα όλο και πιο σημαντικό εργαλείο για τις επιχειρήσεις που θέλουν να παραμείνουν ανταγωνιστικές και να καινοτομήσουν.

3. Οφέλη και προκλήσεις χρήσης του Digital Twin

3.1 Εισαγωγή

Προτού οι εταιρείες μπορέσουν να επενδύσουν στην τεχνολογία του Ψηφιακού Διδύμου, πρέπει να κατανοήσουν την αξία της και πώς μπορούν να εκμεταλλευτούν τα οφέλη της. Μέχρι πρόσφατα, η κατασκευή ενός ψηφιακού δίδυμου ήταν πολύ ακριβή και υπήρχε η θεωρία πως δεν πρόσφερε τόσα πολλά οφέλη.

Ωστόσο, τώρα που υπάρχει περισσότερος χώρος αποθήκευσης και οι τιμές των υπολογιστών έχουν μειωθεί, οι εταιρείες είναι δυνατό να λάβουν μεγάλη επιχειρηματική αξία από τη χρήση αυτής της τεχνολογίας. Όταν οι επιχειρήσεις λαμβάνουν υπόψη την εμπορική αξία του Digital Twin, θα πρέπει να δίνουν έμφαση στα προβλήματα που σχετίζονται με την απόδοση τους και την κατάσταση στην αγορά. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του ψηφιακού δίδυμου είναι ότι δεν αλλοιώνεται στο πέρασμα του χρόνου όπως το φυσικό του δίδυμο και δεν εφησυχάζεται. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο για φυσικά περιουσιακά στοιχεία ή για ανθρώπινους πόρους. Το Digital Twin, βρίσκεται πάντα στη διαδικασία συνεχούς εκμάθησης και εκτέλεσης ανάλυσης δεδομένων στα αντικείμενα που προσομοιώνει και αυτό οδηγεί στη δημιουργία νέων επιχειρηματικών ευκαιριών.

Το Ψηφιακό Δίδυμο μαζί με την τεχνητή νοημοσύνη, μπορεί να δημιουργήσει ένα έξυπνο μοντέλο και να εφαρμοστεί σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα. Η χρήση εικονικής πραγματικότητας μπορεί να δημιουργήσει εναλλακτικές επιλογές και να βοηθήσει στη βελτίωση εργασιών όπως η φόρτωση οχημάτων. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτούνται σύγχρονες προσεγγίσεις αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων βάσει δεδομένων και προσομοίωσης από τη λειτουργία και τη βελτιστοποίηση σύνθετων επιχειρήσεων βιομηχανικής παραγωγής και logistics. Τα ψηφιακά συστήματα των επιχειρήσεων είναι πολύπλοκα, επομένως η βέλτιστη λύση μπορεί να είναι διαφορετική, ανάλογα με την υπάρχουσα κατάσταση. Στη λήψη αποφάσεων, η έννοια του ψηφιακού δίδυμου μπορεί να εφαρμοστεί ολιστικά, καλύπτοντας ολόκληρο τον κύκλο ζωής μιας συσκευής ή μιας διαδικασίας σχηματίζοντας μια κλειστή αλυσίδα εφοδιασμού. (DHL, 2019)

Στις επόμενες ενότητες θα αναλυθούν οφέλη αλλά και προκλήσεις χρησιμοποίησης του Ψηφιακού Διδύμου, τόσο στον τομέα της βιομηχανικής παραγωγής όσο και της εφοδιαστικής αλυσίδας.

3.2. Οφέλη Digital Twin

Σύμφωνα με την (McKinsey & Company, 2022), σε περιόδους αβεβαιότητας και συνεχόμενων αναταραχών, η τεχνολογία του Ψηφιακού Διδύμου μπορεί να βελτιώσει την ορατότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας και την απόδοση της παραγωγής. Ειδικότερα, η τεχνολογία μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες να αυξήσουν τα έσοδα έως και 10%, να βελτιώσουν το χρόνο διάθεσης των προϊόντων τους στην αγορά έως και 50% και να αναβαθμίσουν την ποιότητα τους έως και 25%. Επίσης, έχει παρατηρηθεί στον τομέα της αεροναυπηγικής πως με τη χρήση του Digital Twin μειώθηκαν οι χρόνοι ανάπτυξης προϊόντων κατά 30% με 40%. Το digital twin βοηθάει την επικοινωνία με τους πελάτες κατά την διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων, βοηθώντας την εταιρεία να επικυρώνει και να βελτιώνει την έρευνα και ανάπτυξη. Οι πιο πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν πως η αγορά των digital twin μόνο στην Ευρώπη θα αξίζει 7 δισεκατομμύρια ευρώ μέχρι το τέλος του 2025 με ετήσιο ποσοστό ανάπτυξης 30% με 45%.

Πριν προχωρήσουμε σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου το Digital Twin μπορεί να ωφελήσει με τη χρήση του, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι τα δεδομένα που αξιοποιεί το ψηφιακό δίδυμο είναι ολιστικά καθώς δεν προέρχονται μόνο από τον φυσικό κόσμο, αλλά και από τα εικονικά μοντέλα. Επιπλέον, ορισμένα δεδομένα προέρχονται από τη σύνθεση πληροφοριών, τη στατιστική, τη συσχέτιση, την ομαδοποίηση, την εξέλιξη, την παλινδρόμηση και τη γενίκευση. Εκτός από τις πολλές και διαφορετικές πηγές δεδομένων που επεξεργάζεται, τα εργαλεία απόκτησης δεδομένων είναι επίσης διαφορετικά. Χρησιμοποιεί τόσο εργαλεία από τον φυσικό κόσμο (π.χ. αισθητήρες και RFID), αλλά και μοντέλα από τον εικονικό κόσμο, κάτι που δεν μπορούν να κάνουν τεχνολογίες όπως τα Big Data. Επομένως, το digital twin έχει πιο ολοκληρωμένα δεδομένα προς χρήση. Επίσης το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να επιτύχει την κοινή χρήση δεδομένων και την ενοποίηση μεταξύ διαφορετικών φάσεων του κύκλου ζωής του προϊόντος, επεκτείνοντας έτσι το εύρος εφαρμογής των δεδομένων τους. (Qi & Tao, 2018)

Θα πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των δοκιμών που διενεργούνται μέσω του Ψηφιακού Διδύμου είναι πιο κατανοητή και απτή, καθώς τα Ψηφιακά Δίδυμα χρησιμοποιούν εργαλεία όπως εικόνα, βίντεο, εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα ταυτόχρονα. Για παράδειγμα, σε σχέση με τα Big Data, που το αποτέλεσμα τους είναι μόνο δεδομένα, προκειμένου να επαληθευτούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης, θα πρέπει πρώτα να γίνει προσομοίωση μέσω της φυσικής διαδικασίας, η οποία είναι σχετικά αργή. Εν αντιθέσει, τα ψηφιακά δίδυμα με τη δική τους λειτουργία εικονικής προσομοίωσης, μπορούν να ολοκληρώσουν την προ-επαλήθευση των αποτελεσμάτων τους στον εικονικό κόσμο. Επομένως, το ψηφιακό δίδυμο είναι πιο προηγμένο και βολικό όσον αφορά την οπτικοποίηση και την επαλήθευση αποτελεσμάτων. (Qi & Tao, 2018)

Η αυξανόμενη ζήτηση για αυτοματισμούς σε διάφορους κλάδους είναι αναμενόμενοι παράγοντες που θα πυροδοτήσουν την υψηλή ζήτηση για το Digital Twin κατά την περίοδο πρόβλεψης ζήτησης. Καθώς ανακάμπτουμε από την πανδημία COVID-19, οι λύσεις που προσφέρει το Digital Twin είναι έτοιμες να διαδραματίσουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο σε διαφορετικούς κλάδους. Τα πλεονεκτήματα της δημιουργίας Digital Twin είναι πολύ ευρεία 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 Digital Twin έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν μια εξαιρετικά προηγμένη ψηφιακή επανάσταση για να κάνουν τον κόσμο καλύτερο μέρος για την ανθρωπότητα. Στο μέλλον, το Digital Twin θα επεκταθεί σε ακόμη περισσότερες χρήσεις στις βιομηχανίες. Οι λύσεις που προσφέρει θα συνδυαστούν με περισσότερες τεχνολογίες, όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (AR), θα προστεθούν δυνατότητες από το AI για καλύτερες συνδέσεις, πληροφορίες και αναλυτικά στοιχεία. Επιπλέον, όλο και περισσότερες τεχνολογίες μας δίνουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούμε λύσεις Digital Twin, αφαιρώντας την ανάγκη να ελέγχουμε το «πραγματικό» αντικείμενο. Αυτές οι εκθετικά υψηλότερες γνώσεις και αναλυτικά στοιχεία, με τη σειρά τους, οδηγούν σε ακόμη περισσότερες δυνατότητες για εφαρμογές των λύσεων Digital Twin σε πολύπλοκες λειτουργίες. (Attaran & Bilge, 2023)

Το Digital Twin είναι επομένως μια τεχνολογία που δυνητικά ωφελεί κάθε κύκλο ζωής προϊόντος/υπηρεσίας και τα πλεονεκτήματα του σχετίζονται με τρεις βασικούς πυλώνες:

- Βελτιστοποίηση της έρευνας και ανάπτυξης (R&D) στο μέγιστο βαθμό
- Αύξηση της παραγωγικής απόδοσης
- Διαχείριση του κύκλου ζωής των προϊόντων

Παρακάτω, συγκεντρώνονται πιο αναλυτικά οι περιπτώσεις όπου η εφαρμογή του Digital Twin μπορεί να προκαλέσει πολλαπλά οφέλη.

1. Το Digital Twin αποτελεί την ιδανική λύση όταν η δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων είναι δαπανηρή, απαιτεί πόρους και είναι χρονοβόρα. Ενδεικτικοί κλάδοι που εμπίπτουν στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι η αεροδιαστημική, η εφοδιαστική αλυσίδα και η βιομηχανική παραγωγή. Εναλλακτικά από την κατασκευή πολλαπλών φυσικών πρωτοτύπων για να γίνονται δοκιμές πάνω σε ένα προϊόν, το digital twin προσφέρει μια πολύ πιο αποτελεσματική λύση για τις επιχειρήσεις. (Botin, et al., 2022)
2. Αναφορικά με τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων προϊόντων, η τεχνολογία του Ψηφιακού Διδύμου μειώνει έως και 50% τον χρόνο αλλά και το κόστος ανάπτυξης τους, σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις της αγοράς (Raj & Evangeline, 2020). Ως επέκταση, η παραγωγή των προϊόντων απλοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό με τη χρήση του Ψηφιακού Διδύμου. Επίσης, προϊόντα στα

οποία απαιτούνται δοκιμές σε ακραίες συνθήκες, η διενέργεια των σχετικών δοκιμών είναι δύσκολη ή δεν είναι δυνατό να εκτελεστεί στα εργαστήρια (όπως στον κλάδο της αεροδιαστημικής) αυτές μπορούν εναλλακτικά να προσομοιωθούν από το Digital Twin. Μέσω της συνεχούς ανάπτυξης, οι επιχειρήσεις μπορούν να αλλάξουν αποτελεσματικά το σχεδιασμό, την παραγωγή, τις πωλήσεις και τη συντήρηση των προϊόντων τους.

3. Περιπτώσεις/σενάρια που απαιτούν παρακολούθηση και κατάστρωση σχεδίων μετριασμού του ρίσκου σε πραγματικό χρόνο για την αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων, που μπορεί να συμβεί επί παραδείγματι στον κλάδο της υγείας και εφοδιαστικής αλυσίδας. Η παρακολούθηση της κατάστασης του φυσικού περιουσιακού στοιχείου σε πραγματικό χρόνο και οι προβλέψεις για ένα επικείμενο πρόβλημα μπορεί μην είναι αποτελεσματικές. Το Digital Twin μπορεί να είναι λοιπόν ιδιαίτερα χρήσιμο για εκείνους τους οργανισμούς που πρέπει να λάβουν πολύ γρήγορες αποφάσεις, για να αποτρέψουν κρίσιμες καταστάσεις για τις λειτουργίες τους (Grievies & Vickers, 2017).
4. Κύκλοι ζωής προϊόντων/υπηρεσιών με πολλαπλές και περίπλοκες παραμέτρους, οι οποίες θα μπορούσαν να βελτιστοποιηθούν από κοινού (όπως αυτές στην παραγωγή και στην αλυσίδα εφοδιασμού). Για πολύ μεγάλους οργανισμούς, η συντήρηση και η παρακολούθηση όλων των επιμέρους στοιχείων μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολη υπόθεση. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο όλων των επιμέρους στοιχείων και οι κοινές ολιστικές αναλύσεις σε τέτοια τεράστια μοντέλα μπορεί να είναι επωφελής (Botin, et al., 2022).
5. Αναφορικά με την προβλεπτική συντήρηση του εξοπλισμού, το Digital Twin παρέχει μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας για την Προβλεπτική Συντήρηση του εξοπλισμού, στην οποία μπορούν σε πραγματικό χρόνο να εφαρμοστούν, τόσο η διάγνωση όσο και η πρόβλεψη. Με το συνδυασμό προηγμένων αλγορίθμων και ψηφιακών μοντέλων υψηλής πιστότητας που κατέχει, η διάγνωση και η πρόγνωση σφαλμάτων επιτυγχάνουν υψηλότερη ακρίβεια και συνάμα ενισχύεται η αξιοπιστία του εξοπλισμού. Επίσης, καθώς το ψηφιακό δίδυμο δημιουργεί πολυάριθμα συνθετικά δεδομένα η επίλυση προβλημάτων με ανεπαρκή δεδομένα στον πραγματικό κόσμο, διευκολύνεται. Εκτός από τρεις παραπάνω βελτιώσεις, υπάρχουν και άλλα οφέλη, όπως η εξοικονόμηση κόστους και ο υβριδισμός διαφορετικών μεθόδων (You, et al., 2022)
6. Ο ποιοτικός έλεγχος των προϊόντων είναι σημαντικό μέρος κάθε διαδικασίας παραγωγής και η βελτίωση της συνολικής ποιότητας μπορεί να διευκολυνθεί με τη χρήση των ψηφιακών διδύμων. Οι εταιρείες μπορούν να εντοπίσουν ελαττώματα και αστοχίες στα προϊόντα τους έγκαιρα μέσω των δεδομένων που λαμβάνονται από το ψηφιακό δίδυμο, να ανακαλύψουν τις ριζικές αιτίες των προβλημάτων ποιότητας ώστε να τα εξαλείψουν (Zhu & Ji, 2022)

Το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να οδηγήσει σε τεράστιες μειώσεις κόστους, να συνδράμει σε υλοποίηση συντομότερων κύκλων σχεδίασης, να εξοικονομήσει πόρους και χρόνο για τη δημιουργία φυσικών πρωτοτύπων αλλά και να προβλέψει έγκαιρα τους επικείμενους κινδύνους και να τους μετριάσει. Αυτή η μείωση κόστους θα

μπορούσε ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί ως δείκτης μέτρησης της απόδοσης του Digital Twin για εταιρείες που προσανατολίζονται στην αύξηση του κέρδους τους.

3.2.2 Οφέλη Digital Twin στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η πολυπλοκότητα των διαδικασιών της εφοδιαστικής αλυσίδας σε συνδυασμό με τις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη τη λήψη των σωστών αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Μια ενιαία απόφαση απαιτεί από τους διαχειριστές της εφοδιαστικής αλυσίδας όχι μόνο να συλλέγουν και να αναλύουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων αλλά και να γνωρίζουν πώς να ενεργούν βάσει των πληροφοριών γρηγορότερα και καλύτερα από τους ανταγωνιστές τους.

Σύμφωνα με την Gartner, ένα ψηφιακό δίδυμο στην εφοδιαστική αλυσίδα μπορεί να αποτελέσει τη λύση στο ανωτέρω ζήτημα, καθώς μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετικά λεπτομερή και δυναμική ψηφιακή προσομοίωση της απόδοσης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Χρησιμοποιώντας τεχνητή νοημοσύνη (AI) και προηγμένα αναλυτικά στοιχεία, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί όχι μόνο να αντικατοπτρίζει την παρούσα κατάσταση όλων των διαδικασιών που υπάγονται στην Εφοδιαστική Αλυσίδα, αλλά και να προβλέψει το μέλλον της λαμβάνοντας υπόψιν έναν άπειρο αριθμό παραγόντων και περιορισμών. Μέσω του Ψηφιακού Διδύμου υπάρχει ορατότητα σε όλες τις διαδικασίες σε οποιοδήποτε επίπεδο, με ταυτόχρονη υπόδειξη των ρίσκων και των σημείων συμφόρησης τους. Επίσης, δυναμικά υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεστούν άπειρα σεναρίων «what-if» χωρίς τη διακινδύνευση ενός κοστοβόρου λάθους στην πραγματική ζωή. Πιο συγκεκριμένα, για τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, τα digital twins μπορούν να βοηθήσουν στην ανάλυση των ρίσκων, των KPIs, της ζήτησης και των επιπέδων αποθέματος, των δεδομένων των προμηθευτών και πωλήσεων και πολλά άλλα για να προτείνουν τη βέλτιστη πορεία δράσης υπό οποιοσδήποτε συνθήκες. (Hirppold, 2021)

Η πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο μέσω του ψηφιακού δίδυμου επιτρέπει μεγαλύτερη ακρίβεια και διορατικότητα, έτσι ώστε οι επιχειρήσεις να μπορούν να λαμβάνουν πιο έξυπνες και πιο στρατηγικές αποφάσεις σχετικά με τις απαιτήσεις αποθεμάτων. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι οργανισμοί έκαναν προβλέψεις για το αναγκαίο απόθεμα με βάση τα ιστορικά δεδομένα, την εποχικότητα και μέσω εμπειρικών μαθηματικών μοντέλων. Δεδομένων των ραγδαίων εξελίξεων των τελευταίων ετών και του αντίκτυπου που είχε –και συνεχίζει να έχει– στις αλυσίδες εφοδιασμού (με πιο πρόσφατο παράδειγμα την πανδημία COVID-19), αυτά τα δεδομένα δεν αντικατοπτρίζουν τις σημερινές λειτουργίες και ως εκ τούτου δεν είναι αξιόπιστος τρόπος για την πρόβλεψη των αναγκαίων αποθεμάτων. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να ενδυναμώσουν τους οργανισμούς και να προσφέρουν έγκαιρη πρόβλεψη για το αναγκαίο απόθεμα τους. (Technative, 2022)

Σύμφωνα με μελέτη της (DHL, 2019), τα έξι βασικότερα οφέλη που μπορεί να επιφέρει το Ψηφιακό Δίδυμο στην Εφοδιαστική Αλυσίδα είναι:

1. Πρόβλεψη της απόδοσης των υλικών συσκευασίας: Τα περισσότερα προϊόντα που διακινούνται μέσω δικτύων logistics είναι συσκευασμένα. Για τη συσκευασία τους χρησιμοποιούνται είτε συσκευασίες μιας χρήσης ή επαναχρησιμοποιούμενα δοχεία. Η ανάπτυξη, η παρακολούθηση και η διαχείριση της συσκευασίας είναι μια τεράστια πρόκληση στα logistics. Ένας από τους κύριους λόγους για αυτό είναι η ανάπτυξη του ηλεκτρονικού εμπορίου, αλλά επίσης συμβάλλει και η ποικιλία των εποχιακών συσκευασιών. Αυτό οδηγεί σε τεράστια παραγωγή αποβλήτων καθώς και σε μειωμένη λειτουργική απόδοση λόγω ανεπαρκούς χρησιμοποίησης ποσοτήτων. Η τεχνολογία Digital Twin μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη ισχυρότερων, ελαφρύτερων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον υλικών συσκευασίας. Το ψηφιακό δίδυμο είναι πολύ αποτελεσματικό ακόμη και για τη συντήρηση του στόλου εμπορευματοκιβωτίων, καθώς και για την παρακολούθηση επαναχρησιμοποιούμενων δεξαμενών και την ανίχνευση προβλημάτων.
2. Βελτίωση προστασίας αποστολής: Τα ψηφιακά δίδυμα έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν τον συμβατικό τρόπο παράδοσης προϊόντων. Συνδυάζοντας δεδομένα προϊόντος και συσκευασίας, οι εταιρείες μπορούν να ανακαλύψουν πώς οι διαφορετικές συνθήκες συσκευασίας μπορούν να επηρεάσουν ένα συγκεκριμένο προϊόν ακόμη και πριν από την πρώτη παράδοσή του. Αυτό θα βοηθήσει τους προμηθευτές να ελαχιστοποιήσουν τις ζημιές στα προϊόντα μέσω βελτιώσεων της συσκευασίας. Τα ψηφιακά δίδυμα προσθέτουν περισσότερη αξία συνεχίζοντας τη συλλογή δεδομένων, γεγονός που βοηθά στον εντοπισμό πιθανών αδυναμιών από την παραγωγή έως την παράδοση. Τα δεδομένα από ένα ψηφιακό δίδυμο αποστολής συλλέγονται από αισθητήρες που μεταδίδουν πολλαπλά σημεία δεδομένων κατά την πρόοδο μιας πραγματικής αποστολής. Καθώς μπορούν να ανακτηθούν δεδομένα από τους τελευταίους έξι μήνες, μπορούν να εντοπιστούν επαναλαμβανόμενες τάσεις. Αυτό θα δώσει στους αναλυτές μια ιδέα για την απόδοση της αλυσίδας εφοδιασμού, επιτρέποντάς τους να προστατεύσουν και να ενισχύσουν τις μελλοντικές τους λειτουργίες.
3. Βελτίωση υποδομών: Στα πλαίσια της αρχικής κατασκευής μιας αποθήκης, καθώς το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να συλλέγει πληροφορίες σχετικά με το χώρο και τα υλικά, βοηθάει τις εταιρείες να σχεδιάζουν καλύτερα την υποδομή που ταιριάζει στις ανάγκες τους εκτελώντας πρώτα δοκιμές με ψηφιακά δίδυμα.
4. Εκπαίδευση προσωπικού: Για να βοηθήσουν το προσωπικό να παραμείνει μπροστά από την καμπύλη μάθησης, οι εταιρείες μπορούν να αναπτύξουν εργαλεία εκπαίδευσης εικονικής πραγματικότητας ή συστήματα επιλογής επαυξημένης πραγματικότητας με φορητές συσκευές όπως το Google Glass Enterprise Edition ή το Microsoft HoloLens — εργαλεία που χρησιμοποιούνται ήδη από την αλυσίδα εφοδιασμού της DHL. Η μηχανική

εκμάθηση σημαίνει επίσης ότι η συντήρηση του εξοπλισμού μπορεί εύκολα να προβλεφθεί και τα προβλήματα να εξαλειφθούν στην αρχή.

5. Εισαγωγή διαχείρισης λειτουργιών σε μεγάλα παγκόσμια κέντρα: Η διαχείριση εγκαταστάσεων σε μεγάλους κόμβους logistics, όπως αεροδρόμια και λιμάνια εμπορευματοκιβωτίων, είναι συχνά πολύπλοκη και μπορεί να βαλτώσει από ατελή συστήματα ή ανθρώπινα λάθη. Στην Ολλανδία, για παράδειγμα, το λιμάνι του Ρότερνταμ συνεργάζεται με την IBM για να δημιουργήσει ένα ψηφιακό δίδυμο που θα βοηθήσει το λιμάνι να δοκιμάσει σενάρια και να κατανοήσει καλύτερα πώς να βελτιώσει τη λειτουργική απόδοση. Το αντίγραφο θα παρακολουθεί τις κινήσεις των πλοίων, τις υποδομές, τον καιρό, τα γεωγραφικά δεδομένα και τα δεδομένα βάθους νερού με 100% ακρίβεια. Με τις τεχνολογίες Internet of Things (IoT), το λιμάνι θα μπορεί να προβλέψει τον βέλτιστο χρόνο, με βάση τη στάθμη του νερού, για να φτάσει και να αναχωρήσει ένα πλοίο από το λιμάνι, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι η μέγιστη ποσότητα φορτίου φορτώνεται στο πλοίο. Εάν είναι επιτυχής, η πρωτοβουλία ψηφιοποίησης αναμένεται να συντομεύσει τους χρόνους ελλιμενισμού στο θαλάσσιο λιμάνι, που επί του παρόντος κοστίζει περίπου 80.000 δολάρια ΗΠΑ (70.317 ευρώ) ανά ώρα.
6. Δημιουργία δυναμικού δικτύου παράδοσης: Καθώς γίνεται η παράδοση, ένα ψηφιακό δίδυμο θα έχει λεπτομέρειες για ολόκληρο το δίκτυο του ταξιδιού, είτε αυτό εκτελείται στον αέρα, θαλάσσια ή χερσαία. Με την πρόοδο στη δορυφορική και αεροφωτογραφία, η πλοήγηση με τη βοήθεια ψηφιακών δίδυμων θα είναι σύντομα ο κανόνας. Ένα ψηφιακό δίδυμο ενός οδικού δικτύου θα περιέχει πληροφορίες όπως η κατάσταση της κυκλοφορίας, η διάταξη του και η κατασκευή του δρόμου. Άλλα δεδομένα, όπως τα πρότυπα ζήτησης και οι χρόνοι ταξιδιού, θα φανούν χρήσιμα στον σχεδιασμό των διαδρομών διανομής και των τοποθεσιών αποθήκευσης αποθεμάτων. Στο μέλλον, αυτές οι πληροφορίες θα διαδραματίσουν επίσης καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη τεχνολογιών αυτόνομης παράδοσης, οι οποίες δοκιμάζονται με τους πελάτες της DHL σήμερα.

3.3 Βέλτιστες πρακτικές χρήσης Digital Twin στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

Όπως έχει γίνει αντιληπτό από τις παραπάνω υποενότητες του κεφαλαίου, η εμφάνιση των ψηφιακών δίδυμων έχει εγκαινιάσει μια νέα εποχή διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, προσφέροντας μια αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο οι οργανισμοί σχεδιάζουν, εκτελούν και βελτιστοποιούν τις διαδικασίες εφοδιαστικής αλυσίδας από άκρο σε άκρο. Σε αυτή την ενότητα θα γίνει αναφορά των βέλτιστων πρακτικών που διέπουν την επιτυχημένη ανάπτυξη ψηφιακών δίδυμων τόσο στον τομέα των διαδικασιών όσο και το εκτελεστικό σκέλος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αντλώντας στοιχεία από ποικιλία πραγματικών μελετών περίπτωσης, από εφαρμογές διάφορων εταιρειών, θα προκύψει μια σαφέστερη κατανόηση του πώς τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να συνεισφέρουν στη βελτίωση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας οδηγώντας τους οργανισμούς πιο κοντά στη λειτουργική αριστεία σε ένα συνεχώς εξελισσόμενο τοπίο.

3.3.1 Ψηφιακά Δίδυμα στον Σχεδιασμό

Εταιρείες όπως η PepsiCo, η Coca-Cola, η Nestle και η Unilever έχουν επενδύσει στο λεγόμενο Digital Planning Twin - ένα ψηφιακό δίδυμο για τον προγραμματισμό της ζήτησης που ουσιαστικά δημιουργεί μια εικονική αναπαράσταση της επιχείρησης σε κάθε επίπεδο, καθώς και μια πολύ ρεαλιστική αναπαράσταση της συνάρτησης της ζήτησης τους και του οικονομικού της μοντέλου. Για αυτούς τους μεγάλους ομίλους που διαθέτουν τεράστιες αλυσίδες εφοδιασμού και εκτείνονται σε πολλές χώρες και περιοχές, η χρήση digital twin καθίσταται απολύτως απαραίτητη για την τήρηση της ζήτησης με παράλληλη διατήρηση της αποτελεσματικότητας. Οι εταιρείες που αναφέραμε έχουν πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τα επίπεδα αποθεμάτων, τους κύκλους παραγωγής, χρόνους αποστολής και έτσι μπορούν να προγραμματίσουν καλύτερα για απροσδόκητα γεγονότα όπως φυσικές καταστροφές ή απεργίες εργαζομένων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τη διαθεσιμότητα των προϊόντων ή τους χρόνους παράδοσης. (Higginbotham, 2023)

3.3.2 Ψηφιακά Δίδυμα στη διαχείριση αποθεμάτων

Η Walmart, χρησιμοποιεί επίσης ψηφιακά δίδυμα. (Nanda, 2023) Στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της διάταξης του καταστήματός τους, δοκιμάζοντας διαφορετικές διαμορφώσεις και σχέδια. Με την προσομοίωση διαφόρων διατάξεων, μπορούν να αξιολογήσουν παράγοντες όπως η τοποθέτηση του προϊόντος και η διάταξη των διαδρόμων στο κατάστημα. Αφού δοκιμάσουν, μπορούν να επιλέξουν αυτό που παρέχει μια φιλική προς τον πελάτη ρύθμιση.

Επιπλέον, η τεχνολογία χρησιμοποιείται επίσης στο σύστημα διαχείρισης αποθεμάτων τους. Η Walmart δημιούργησε πρώτα το ψηφιακό δίδυμο των καταστημάτων της και συμπλήρωσε ένα εικονικό απόθεμα. Στη συνέχεια μπορεί να

αναλύσει και θα βελτιστοποιήσει τα επίπεδα αποθέματος, την τοποθέτηση προϊόντων και τις στρατηγικές αναπλήρωσης.

Με την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων, μπορεί να αξιολογήσει τον αντίκτυπο των αλλαγών στη ζήτηση, των εποχιακών διακυμάνσεων ή των διαταραχών της αλυσίδας εφοδιασμού στη διαχείριση αποθεμάτων. Αυτό τους επιτρέπει περαιτέρω να προσαρμόσουν τα συστήματα και τις διαδικασίες τους και αναφέρουν οφέλη όπως:

- Ελαχιστοποίηση αποθεμάτων
- Βελτίωση διαθεσιμότητας των προϊόντων
- Ενίσχυση της ικανοποίησης των πελατών

Η υιοθέτηση του ψηφιακού δίδυμου βοήθησε τη Walmart να βελτιώσει τις εμπειρίες των πελατών της και να αυξήσει τη λειτουργική της αποτελεσματικότητα.

3.3.3 Ψηφιακά Δίδυμα Συσκευασίας

Η συντριπτική πλειονότητα των προϊόντων που κινούνται μέσω δικτύων logistics το κάνουν με μορφή προστατευτικού περιβλήματος. Η εφαρμογή ψηφιακών δίδυμων για υλικά βοηθά στην ανάπτυξη ισχυρότερων, ελαφρύτερων, πιο φιλικών προς το περιβάλλον υλικών συσκευασίας. Σε προσπάθειες βελτίωσης της βιωσιμότητας, οι εταιρείες διερευνούν την εφαρμογή μιας σειράς νέων υλικών συμπεριλαμβανομένων των κομποστοποιήσιμων πλαστικών και υλικά με υψηλό ποσοστό ανακυκλωθέντων από τον καταναλωτή. Ψηφιακό Δίδυμο υλικού όπως αυτό που αναπτύχθηκε από το Math2Market θα μπορούσε να βοηθήσει τις εταιρείες να κατανοούν και προβλέπουν την απόδοση νέων υλικών σε εφαρμογές συσκευασίας. Αυτά τα δίδυμα μπορούν να μοντελοποιήσουν τη συμπεριφορά του υλικού κάτω από θερμοκρασίες και κραδασμούς που αντιμετωπίζουν κατά τη μεταφορά τους. Ακόμη, η Finnair Cargo χρησιμοποιεί ψηφιακά δίδυμα ευαίσθητων αποστολών για να έχουν ορατότητα στο αντικείμενο και στη κατάσταση της συσκευασίας του κατά τη μεταφορά. (DHL, 2019)



Εικόνα 3.4 Ψηφιακό Δίδυμο υλικού συσκευασίας, FinnairCargo

3.3.4 Ψηφιακά Δίδυμα στις Αποστολές

Η ενσωμάτωση του περιεχομένου μιας συσκευασίας ή δοχείου στο ψηφιακό του δίδυμο είναι το επόμενο βήμα για τις εταιρείες. (DHL, 2019) Είναι ήδη κοινή πρακτική η αποστολή ευαίσθητων προϊόντων υψηλής αξίας, όπως φαρμακευτικών προϊόντων και ευαίσθητων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, με αισθητήρες που παρακολουθούν τη θερμοκρασία, τον προσανατολισμό της συσκευασίας, τους κραδασμούς και τους κραδασμούς. Οι πιο πρόσφατες παραλλαγές αυτών των αισθητήρων, όπως αυτές που αναπτύχθηκαν από τις Roambee, Blulog, Kizy και άλλες, ενσωματώνουν αισθητήρες που προσφέρουν ένα αυξανόμενο πλήθος σημείων δεδομένων που επιτρέπουν τη συνεχή μετάδοση δεδομένων κατά την εξέλιξη μιας αποστολής.

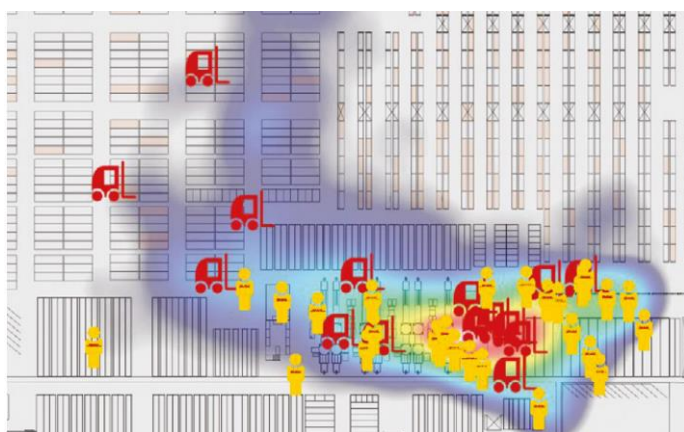
3.3.5 Ψηφιακά Δίδυμα Αποθηκών και κέντρων διανομής

Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να παρέχουν σημαντικές βελτιώσεις στο σχεδιασμό, τη λειτουργία και βελτιστοποίηση υποδομών logistics όπως αποθήκες, κέντρα διανομής, και εγκαταστάσεις cross-dock. (DHL, 2019) Τα ψηφιακά δίδυμα αποθήκης μπορούν να υποστηρίξουν το σχεδιασμό και τη διάταξη νέων εγκαταστάσεων, επιτρέποντας στις εταιρείες να βελτιστοποιήσουν τη χρήση του χώρου και να προσομοιώσουν την κίνηση των προϊόντων, του προσωπικού και του εξοπλισμού. Κατά τις εργασίες της αποθήκης, το digital twin μπορεί να ενημερώνεται συνεχώς με δεδομένα που συλλέγονται από τις διάφορες τεχνολογίες αυτοματισμού που γίνονται όλο και πιο διαδεδομένες στις αποθήκες. Αυτά περιλαμβάνουν συστήματα καταμέτρησης αποθεμάτων που βασίζονται σε drone, αυτοματοποιημένα κατευθυνόμενα οχήματα, συστήματα συλλογής εμπορευμάτων και αυτοματοποιημένο εξοπλισμό αποθήκευσης και ανάκτησης. Τα ψηφιακά δίδυμα θα επιτρέψουν επίσης περαιτέρω βελτιστοποίηση της απόδοσης αυτών των συστημάτων αυτοματισμού, για παράδειγμα χρησιμοποιώντας δεδομένα αισθητήρων, προσομοίωση και τεχνολογίες παρακολούθησης για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας διατηρώντας παράλληλα τα απαιτούμενα επίπεδα απόδοσης. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ολοκληρωμένα τρισδιάστατα δεδομένα εγκαταστάσεων για τη βελτίωση της παραγωγικότητας του προσωπικού της αποθήκης. Οι εταιρείες μπορούν να αναπτύξουν εργαλεία εκπαίδευσης εικονικής πραγματικότητας, για παράδειγμα, ή συστήματα επιλογής επαυξημένης πραγματικότητας χρησιμοποιώντας φορητές συσκευές όπως το Google Glass Enterprise Edition ή το Microsoft HoloLens – εργαλεία που χρησιμοποιούνται ήδη σήμερα από την DHL. Τα γυαλιά επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας που χρησιμοποιούνται για το vision picking παρέχουν μια πολύτιμη ροή δεδομένων για μόχλευση σε ψηφιακά δίδυμα αποθήκης.



Εικόνα 3.5 Vision picking μέσω γυαλιών επαυξημένης και εικονικής πραγματικότητας, DHL

Η DHL χρησιμοποιεί επίσης για τις αποθήκες της, χάρτες θερμότητας που βασίζονται στο διαδίκτυο της τεχνολογίας των πραγμάτων (IoT) για τη βελτιστοποίηση της λειτουργικής αποτελεσματικότητας και θέτει τις βάσεις για ασφαλέστερες εργασιακές πρακτικές στις Αποθήκες.



Εικόνα 3.6 Χρήση χαρτών θερμότητας για ασφαλέστερες εργασιακές πρακτικές, DHL

Η Coca Cola 3E, δημιούργησε το ψηφιακό δίδυμο της αποθήκης της στο Σχηματάρι (Industry Editor, 2023), μέσω του οποίου, το λογισμικό προσομοίωσης μπορεί να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες της αποθήκης, να αυξήσει την αποδοτικότητα, το Picking, την αναπλήρωση, να σχεδιάσει μια νέα αποθήκη ή να βελτιστοποιήσει μία υπάρχουσα, ή και να βοηθήσει στη σχεδίαση για αυτοματοποίηση και πρόβλεψη χωρητικότητας. Η εφαρμογή ψηφιακού διδύμου στις λειτουργίες της αποθήκης της Coca Cola Τρία Έψιλον, είχε πολλαπλά οφέλη. Εφαρμόζοντας αλλαγές, όπως μεταφορά ραφιών, νέα fast loading areas και αλλαγή ροών πέτυχε:

- Καλύτερες ροές μέσα στην αποθήκη και αποφυγή συμφόρησης.
- Αύξηση όλων των βασικών δεικτών KPIs.
- Καλύτερη χρήση των ραφιών.
- Καλύτερη παραγωγικότητα σε Φορτώσεις και Throughput.
- Καλύτερη αξιοποίηση του στόλου περνοφόρων.

3.3.6 Ψηφιακά Δίδυμα υποδομών logistics

Η ροή των αγαθών από τον προορισμό τους μέχρι τον καταναλωτή εξαρτάται από την ενορχήστρωση πολλαπλών στοιχείων, συμπεριλαμβανομένων των πλοίων, των φορτηγών και των αεροσκαφών, των συστημάτων παραγγελιών και πληροφοριών και, κυρίως, των ανθρώπων. Αυτό το περίπλοκο περιβάλλον πολλών ενδιαφερομένων μπορεί να φανεί με μεγαλύτερη σαφήνεια σε μεγάλους παγκόσμιους κόμβους εφοδιαστικής, όπως αεροδρόμια φορτίου και λιμάνια εμπορευματοκιβωτίων. Ένα έργο βρίσκεται τώρα σε εξέλιξη στη Σιγκαπούρη για τη χρήση ψηφιακών δίδυμων για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων. Η Λιμενική Αρχή της Σιγκαπούρης συνεργάζεται με μια κοινοπραξία εταιρών, συμπεριλαμβανομένου του Εθνικού Πανεπιστημίου της Σιγκαπούρης, για να αναπτύξει ένα ψηφιακό δίδυμο του νέου megahub της χώρας για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Ο καθηγητής του πανεπιστημίου Lee Hoo Hay ηγείται της τεχνικής και ερευνητικής ανάπτυξης της πρωτοβουλίας. Σύμφωνα με εκείνον, η τεχνολογία ψηφιακού δίδυμου γίνεται επιτέλους πραγματικότητα χάρη στη τεχνολογική πρόοδο. «Η βελτιστοποίηση που βασίζεται στην προσομοίωση, τη βιομηχανία 4.0 και το διαδίκτυο των πραγμάτων υπάρχει εδώ και αρκετό καιρό. Ωστόσο, ήταν πραγματικά η έκρηξη της τεχνητής νοημοσύνης και οι προγνωστικές της ικανότητες που έδωσαν στα ψηφιακά δίδυμα μεγάλη ώθηση στη δημιουργία αξίας. Στο παρελθόν, η δημιουργία χωρικών μοντέλων ψηφιακά ήταν συναρπαστική, αλλά απέτυχε να είναι κάτι περισσότερο από ένας τρόπος να απεικονιστεί ένα αντικείμενο στατικά. Σήμερα, όλα τα δεδομένα που έχουμε από αισθητήρες, ιστορικές επιδόσεις και εισροές σχετικά με τη συμπεριφορά προσφέρεται για σύνδεση με το χωρικό μοντέλο και πρόβλεψη μελλοντικής συμπεριφοράς αλλάζοντας διαφορετικές εισροές. Ουσιαστικά τα δεδομένα και οι δυνατότητες πρόβλεψης κάνουν το χωρικό μοντέλο να ζωντανεύει».

Το συγκεκριμένο έργο της Σιγκαπούρης αποφέρει ήδη οφέλη κατά τη φάση σχεδιασμού του. Η κοινοπραξία χρησιμοποιεί τα ψηφιακά της μοντέλα για να επισπεύσει τη δημιουργία πιθανών διατάξεων και χρησιμοποιεί συστήματα προσομοίωσης για την αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας. Τελικά, η Λιμενική Αρχή ελπίζει ότι το ψηφιακό δίδυμο θα τη βοηθήσει να βελτιστοποιήσει τη διαχείριση της νέας εγκατάστασης. Χρησιμοποιώντας την προσομοίωση, για παράδειγμα, θα είναι σε θέση να επιλέξει τη βέλτιστη θέση ελλιμενισμού για ένα σκάφος οποιουδήποτε μεγέθους, λαμβάνοντας υπόψη τα περιουσιακά στοιχεία, τον χώρο και το προσωπικό που απαιτείται για τις εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης και την ανάγκη να μοιραστούν αυτοί οι πόροι μεταξύ πολλών σκάφη ανά πάσα στιγμή. Ενώ η Σιγκαπούρη έχει ένα τολμηρό όραμα για την εφαρμογή ψηφιακών δίδυμων σε υποδομές logistics μεγάλης κλίμακας, η τελική επιτυχία οποιασδήποτε τέτοιας πρωτοβουλίας εξαρτάται από την προθυμία –και την τεχνική ικανότητα– όλων των εμπλεκόμενων φορέων. Ένα «ζωντανό» ψηφιακό δίδυμο ενός λιμανιού ή

αεροδρομίου θα απαιτεί από κάθε οργανισμό που χρησιμοποιεί την εγκατάσταση να λειτουργεί και να διατηρεί ένα ψηφιακό δίδυμο των δικών του περιουσιακών στοιχείων και προσωπικού και να μοιράζεται σχετικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο με άλλους χρήστες. (DHL, 2019)

3.3.7 In-plant logistics

Οι απαιτήσεις της παραγωγής μέσω Ψηφιακού Διδύμου θα θέτουν επίσης νέες απαιτήσεις στις ροές υλικών εντός του εργοστασίου. Οι εταιρείες μπορεί να χρειαστεί να προσαρμόσουν τις διαδικασίες τους για παράδοση ακριβώς στην ώρα της γραμμής και τις στρατηγικές αναπλήρωσης *kanban* για να προσαρμόσουν μικρότερους χρόνους παράδοσης και υψηλότερη πολυπλοκότητα προϊόντος. Θα πρέπει επίσης να χειρίζονται τα δεδομένα υλικών και εξαρτημάτων με μεγαλύτερη αυστηρότητα, για να διασφαλίσουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα των προϊόντων που κατασκευάζουν συσχετίζονται με τους σωστούς σειριακούς αριθμούς εξαρτημάτων ή κωδικούς παρτίδας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η προσαρμογή των παραγωγικών εργασιών για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των ψηφιακών προϊόντων και των επιχειρηματικών μοντέλων που βασίζονται στο *digital twin* θα απαιτήσει νέες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό των σταθμών εργασίας και της διάταξης των εγκαταστάσεων. Οι εταιρείες μπορεί να θέλουν να μεταβούν από την επεξεργασία κατά παρτίδες στη ροή ενός τεμαχίου, για παράδειγμα, ή να προσαρμόσουν τα συστήματα αποθήκευσης και χειρισμού υλικών για να αντιμετωπίσουν πιο περίπλοκες και μεταβλητές απαιτήσεις υλικού. Τα ψηφιακά δίδυμα θα μπορούσαν, να βοηθήσουν τις εταιρείες όπως τώρα συμβαίνει στη DHL, να διαχειριστούν αυτήν την πρόσθετη πολυπλοκότητα, ενσωματώνοντας προηγμένα συστήματα αποθήκευσης και χειρισμού ή μέσω της χρήσης τεχνολογιών AR για να βοηθήσουν το προσωπικό να εντοπίζει και να επιλέγει τα εξαρτήματα γρήγορα.



Εικόνα 3.7 Βελτίωση *in-plant* ροών μέσω Ψηφιακού Διδύμου, DHL

3.4 Προκλήσεις του Digital Twin

Επί του παρόντος, τα μοντέλα Digital Twin αντιμετωπίζουν τις ακόλουθες προκλήσεις, ορισμένες από τις οποίες είναι περισσότερο κρίσιμες, ανάλογα με τον τομέα που εφαρμόζεται το Digital Twin. Αυτές οι προκλήσεις είναι κυρίως τεχνικού ενδιαφέροντος.

Αρχικά, σε ότι αφορά το κομμάτι των υποδομών, η υποδομή πληροφορικής είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέρη της ανάπτυξης ενός αποτελεσματικού ψηφιακού δίδυμου που είναι σε θέση να εκτελεί τα καθήκοντά του. Για να πετύχει αυτή η τεχνολογία και να μπορέσουν οι εταιρείες να επωφεληθούν από αυτήν, είναι ζωτικής σημασίας να υπάρχει μια υποδομή πληροφορικής που να είναι καλά συνδεδεμένη και να λειτουργεί ομαλά το οποίο αποτελεί πρόκληση. (Magomadon, 2020). Λόγω των τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων δικτύου, η μοντελοποίηση δεδομένων δεν θα πρέπει μόνο να διασφαλίζει τις λειτουργίες του μοντέλου αλλά και να λαμβάνει υπόψη την ευελιξία και την επεκτασιμότητα του. Κατά συνέπεια, η κατασκευή ενός αποτελεσματικού και λειτουργικού μοντέλου είναι πιο περίπλοκη. Σε περίπτωση υψηλής ζήτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, η προσομοίωση και η επαλήθευση του μοντέλου στο δίκτυο του ψηφιακού διδύμου θα οδηγήσει σε παράταση του χρόνου λειτουργίας του συστήματος. Επομένως, διαφορετικοί μηχανισμοί επεξεργασίας πρέπει να προστεθούν σε διαφορετικά σενάρια εφαρμογών δικτύου. Ταυτόχρονα, οι απαιτήσεις σε πραγματικό χρόνο θα βελτιώσουν περαιτέρω τις απαιτήσεις απόδοσης λογισμικού και υλικού. Επιπλέον, το δίκτυο επικοινωνίας έχει συνήθως πολλά στοιχεία, ευρεία κάλυψη και μεγάλο χρόνο εξυπηρέτησης. Επομένως, το ψηφιακό δίδυμο είναι αναπόφευκτο να είναι ένα τεράστιο και πολύπλοκο σύστημα το οποίο με τη πάροδο των ετών αναμένεται πως θα γίνει ακόμα πιο απαιτητικό. (Lv, 2023) Επιπλέον, ο αμφίδρομος συγχρονισμός υψηλής πιστότητας είναι ιδιαίτερα δύσκολος για βιομηχανίες μεγάλης κλίμακας, απαιτεί πόρους και σύνδεση IoT υψηλής ροής. (Semeraro, et al., 2021)

Η διαλειτουργικότητα (interoperability) με το υπάρχον λογισμικό που χρησιμοποιείται σε έναν κύκλο ζωής παραγωγής. Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν διάφορα λογισμικά για εργασίες όπως την απογραφή, τη διαχείριση προϊόντων και τις ευρύτερες λειτουργίες τους. Η συμβατότητα του Digital Twin με αυτά είναι ένα περίπλοκο ζήτημα, η αντιμετώπιση του οποίου μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση στην υλοποίηση του Ψηφιακού Διδύμου στις βιομηχανίες. (Flumerfelt, et al., 2019) Καθώς το Digital Twin απαιτεί διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφόρων στοιχείων και εργαλείων σε πραγματικό χρόνο και τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων, η συναρμολόγηση αυτών μπορεί να είναι χρονοβόρα για έναν κλάδο και μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητους περισπασμούς. Υπάρχει λοιπόν ανάγκη να δημιουργηθούν ταχύτερες και πιο αποτελεσματικές διεπαφές επικοινωνίας όπως το 5G. Σύμφωνα με τον (Russell, 2020) υπάρχει επείγουσα απαίτηση για χρήση της τεχνολογίας 5G για έξυπνες πόλεις, όπως η δυνατότητα σύνδεσης πολλών περισσότερων αισθητήρων και συσκευών, η πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα

υψηλής ταχύτητας, η βελτιωμένη αξιοπιστία και η εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Οι συγγραφείς πιστεύουν ότι είναι πολύ σημαντικό να επιτραπεί η συνδεσιμότητα δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για την αποτελεσματική χρήση του DT.

Θα πρέπει επίσης, να τεθούν υπό συζήτηση και τα ζητήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση δεδομένων, όπως το απόρρητο, η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, η ασφάλεια IoT και η ψηφιακή διακυβέρνηση. Με το ψηφιακό δίδυμο να λειτουργεί σε πολλούς βιομηχανικούς εταίρους και στις τοποθεσίες απογραφής, οι ανησυχίες γύρω από θέματα ασφάλειας είναι αναπόφευκτες. Όχι μόνο οι ανησυχίες για τον τρόπο που τα δεδομένα μπορούν να κοινοποιηθούν, αλλά και η διαρροή δεδομένων παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να είναι επικίνδυνη για μια επιχείρηση. Ως εκ τούτου, η κοινή χρήση δεδομένων μετατρέπεται σε σημαντικό ζήτημα για το DT. Η πολυπλοκότητα της κοινής χρήσης δεδομένων εμποδίζει τους προγραμματιστές να βρουν πιο ολοκληρωμένες ιδέες. (Flumerfelt, et al., 2019)

Το ψηφιακό δίδυμο έχει επίσης υψηλό κόστος υλοποίησης λόγω της αυξημένης ποσότητας αισθητήρων και υπολογιστικών πόρων που απαιτούνται. Λόγω του ακριβούς κόστους των εφαρμογών Ψηφιακού Διδύμου, η προσβασιμότητά τους περιορίζεται από την έλλειψη τέτοιων πόρων, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η αύξηση της ποσότητας των απαιτούμενων αισθητήρων συνοδεύεται επίσης από πρόσθετη πολυπλοκότητα όσον αφορά τη συνδεσιμότητα και την επεξεργασία δεδομένων. (Botin, 2023). Η χρήση του Digital Twin συνεπάγεται και πρόσθετες δαπάνες, όπως για παράδειγμα χρηματικό κόστος για την έρευνα. Δεδομένου ότι η εφαρμογή του Digital Twin και το κέρδος από αυτήν είναι μια μακροχρόνια διαδικασία, η εφαρμογή του σε ένα σύντομης διάρκειας έργο μπορεί να αποβεί δαπανηρή για μία εταιρεία. Η κατασκευή ενός λογισμικού για το Digital Twin απαιτεί επίσης τη συγκρότηση μιας έμπειρης και καταρτισμένης ομάδας προγραμματιστών, ώστε να δοκιμάσουν την καταλληλότητα του λογισμικού για το εκάστοτε έργο. Επιπλέον, όπως κάθε τεχνολογία, το Ψηφιακό Δίδυμο πρέπει επίσης να ενημερωθεί σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εξελίξεις στις τεχνολογίες στις οποίες βασίζεται (IoT, Μεγάλα Δεδομένα, Μηχανική Μάθηση). Οι βιομηχανίες με μακροχρόνια χρήση Digital Twin θα πρέπει επομένως να επενδύουν συνεχώς σε αυτήν την έρευνα, κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε πρόσθετο κόστος. (Sharma, et al., 2020)

Η έλλειψη προτύπων, πλαισίων και κανονισμών για εφαρμογές Digital Twin (standardization), είναι μια ακόμη πρόκληση προς επίλυση. Σύμφωνα με τους (Harrison, et al., 2021), οι υλοποιήσεις των ψηφιακών διδύμων είναι περιορισμένες λόγω έλλειψης προτύπων και αναγνωρισμένης διαλειτουργικότητας, ειδικά στον βιομηχανικό τομέα. Η ανάπτυξη προτύπων είναι ζωτικής σημασίας καθώς μια τεχνολογία γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη και τίθεται το ζήτημα της διαλειτουργικότητας. Η τεχνολογία DT εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τεχνολογίες IoT, δηλαδή λαμβάνει δεδομένα από έξυπνα προϊόντα και συσκευές που

ενεργοποιούνται από το IoT. Ωστόσο, η τρέχουσα κατάσταση των προτύπων στον τομέα του IoT απαιτεί μεγάλη βελτίωση και αυτό, φυσικά, επηρεάζει την τυποποίηση του DT.

Επίσης, για να λειτουργήσει σωστά το ψηφιακό δίδυμο, όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιεί πρέπει να ταξινομηθούν και να παρουσιαστούν με κατάλληλο τρόπο προκειμένου να τροφοδοτηθούν στους απαιτούμενους αλγόριθμους και εργαλεία. Επομένως, απαιτείται μια συνεχής ροή δεδομένων υψηλής ποιότητας. Η ασυνέπεια στα δεδομένα ελλοχεύει κίνδυνο απόδοσης στο ψηφιακό δίδυμο, καθώς θα οδηγήσει σε μη ποιοτικά ή ελλιπή δεδομένα. Ως εκ τούτου, η ποιότητα και η ποσότητα των δεδομένων IoT είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τις πληροφορίες που συλλέγονται, οι οποίες παρουσιάζουν την ανάγκη προσεκτικού σχεδιασμού και ανάλυσης εκ των προτέρων προκειμένου να εφαρμοστούν στα ψηφιακά δίδυμα. (Eleftheriou & Anagnostopoulos, 2022)

Για παράδειγμα, σε ένα εργοστάσιο η ανάλυση δεδομένων έχει ευρύ φάσμα, το οποίο περιλαμβάνει τους δείκτες απόδοσης, της δυναμικότητας, της κατανάλωσης ενέργειας, της ποιότητας, και του κόστους. Κάθε ένας παράγοντας από τους προαναφερθέντες συνδέεται και με άλλους παράγοντες οπότε η συλλογή και η μοντελοποίηση τους είναι δύσκολη. Αν λάβουμε υπόψιν την περίπτωση βαφής ενός βραχίονα ρομπότ, οι σχετιζόμενοι παράμετροι περιλαμβάνουν τον κατασκευαστή του χρώματος, την αναλογία μείγματος βαφής, τη θερμοκρασία περιβάλλοντος και την υγρασία. Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψιν και παραγωγικά δεδομένα, όπως την ταχύτητα κίνησης του βραχίονα ρομπότ, την πίεση του ακροφυσίου και τον ρυθμό ροής της βαφής. Αυτά τα δεδομένα αντλούνται και επηρεάζονται από διαφορετικούς παράγοντες. Για παράδειγμα, η αναλογία μείγματος βαφής εξαρτάται από την εμπειρία των εργαζομένων και δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, καθιστώντας τη διαδικασία μοντελοποίησης και ανάλυσης πολύ δύσκολη. Η πρόβλεψη και η ανάλυση της ποιότητας του προϊόντος και της δυναμικότητας της γραμμής παραγωγής περιλαμβάνει ακόμη και πολύπλοκους παράγοντες. Επομένως, η δημιουργία ψηφιακού δίδυμου σε μια βιομηχανική μονάδα είναι μια μακροπρόθεσμη, συνεχής διαδικασία εξερεύνησης και συσσώρευσης δεδομένων στην οποία δεν μπορούν να υπάρχουν συντομεύσεις. (Lv, 2023)

Η διαδικασία παραγωγής είναι συχνά απρόβλεπτη και αλλάζει ως αποτέλεσμα των διαρκώς μεταβαλλόμενων προτιμήσεων των καταναλωτών, των τεχνολογιών και του σχεδιασμού των προϊόντων. Αυτό συχνά επιδεινώνεται από τη νομοθεσία και τις διαφορές που υπάρχουν από χώρα σε χώρα. Η μη δυνατότητα πρόβλεψης οδηγεί σε ακόμη περισσότερες πολυπλοκότητες στη διαδικασία παραγωγής και απαιτείται η ανάπτυξη δομών, οι οποίες είναι πιο περίπλοκες, προκειμένου να ξεπεραστούν αυτές οι πολυπλοκότητες. (Magomadov, 2020)

Τέλος, οι προσδοκίες των χρηστών είναι μια ακόμη πρόκληση για την εφαρμογή της τεχνολογίας. Αν και το ψηφιακό δίδυμο έχει επιταχυνθεί από ερευνητές και ηγέτες του κλάδου, όπως η Siemens και η GE, οι προσδοκίες των χρηστών είναι μια άλλη

πρόκληση, καθώς το ψηφιακό δίδυμο μοιάζει με τεχνολογία που σε συνδυασμό με AI, Deep Learning και IoT μπορεί να λύσει πολλά από τα προβλήματά τους. Οι προσδοκίες των χρηστών θα πρέπει να τίθενται, να συζητούνται και να αξιολογούνται συνεχώς σε όλη τη διαδικασία ανάπτυξης των συστημάτων ψηφιακού δίδυμου. (Eleftheriou & Anagnostopoulos, 2022)

Κλείνοντας, οι πιο σημαντικές προκλήσεις που ενδέχεται να παρεμποδίσουν την ανάπτυξη της τεχνολογίας Digital Twin περιλαμβάνουν το υψηλό κόστος εγκατάστασης, την αυξημένη ζήτηση ενέργειας και αποθήκευσης, τις προκλήσεις ενοποίησης με υπάρχοντα συστήματα ή το ιδιόκτητο λογισμικό και την πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής του αλλά και της συλλογής δεδομένων. Η εφαρμογή του Digital Twin απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε τεχνολογικές πλατφόρμες (αισθητήρες, λογισμικό), ανάπτυξη υποδομών, συντήρηση, έλεγχο ποιότητας δεδομένων και λύσεις ασφάλειας. Επιπλέον, η συντήρηση της υποδομής του μπορεί να είναι δαπανηρή, απαιτώντας σημαντικές επενδύσεις σε λειτουργίες. Η τεχνολογία θα πρέπει ακόμα να ξεπεράσει ορισμένες προκλήσεις απορρήτου, λόγω της ευαίσθητης φύσης των δεδομένων που απαιτείται να χρησιμοποιήσει. Εν κατακλείδι, το υψηλό πάγιο κόστος και η πολύπλοκη υποδομή των Digital Twins αναμένεται να επιβραδύνουν την ανάπτυξη του. Είναι σημαντικό οι προκλήσεις αυτές να ληφθούν σοβαρά υπόψιν, παρ' όλα αυτά χρησιμοποιώντας τα Ψηφιακά Δίδυμα, η βιομηχανική παραγωγή θα κατορθώσει να αυξήσει την προστιθέμενη αξία στις εφαρμογές τους και να αποτελέσει ενεργό μέρος της 4^{ης} Βιομηχανικής Επανάστασης.

3.4 Σύνοψη κεφαλαίου

Χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών, τα ψηφιακά δίδυμα γνωρίζουν άνευ προηγουμένου ανάπτυξη, κρίνοντας τόσο από τις δημοσιευμένες επιστημονικές έρευνες, όσο και από τις μεγάλες επενδύσεις από τον ιδιωτικό τομέα και τη χρήση των Ψηφιακών Διδύμων στις λειτουργίες τους. Αυτό δεν θα ήταν δυνατό χωρίς προηγμένες τεχνολογίες όπως το IoT, η ανάλυση δεδομένων και η τεχνητή νοημοσύνη, που είναι πλέον οι πιο σημαντικοί καταλύτες για τα Ψηφιακά Δίδυμα.

Ενώ επί του παρόντος η πλειοψηφία των εφαρμογών των ψηφιακών δίδυμων αφορά στον τομέα της παραγωγής και στην εφοδιαστική αλυσίδα, μπορούμε ήδη να εντοπίσουμε και περιπτώσεις χρήσης σε άλλους τομείς, όπου αυτές οι εφαρμογές έχουν αποδειχθεί ευεργετικές. Επομένως, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι τα οφέλη του Ψηφιακού Διδύμου έχουν ευρύ φάσμα και μεγάλη απορρόφηση από πολλούς κλάδους. Επί του παρόντος, με την άνοδο του Industry 4.0, μπορούμε ήδη να εντοπίσουμε μια αλλαγή με μεγάλες εταιρείες όπως η General Electric, που προσπαθεί να δημιουργήσει ψηφιακά δίδυμα σε μεγάλη κλίμακα, επενδύοντας πολλά κεφάλαια στην ανάπτυξή τους. Προς το παρόν, η συνειδητοποίηση και η εφαρμογή αποτελεσματικών ψηφιακών δίδυμων είναι ακόμη ένα έργο σε εξέλιξη, καθώς ορισμένες προκλήσεις όπως η τυποποίηση, οι υποδομές πληροφορικής και τα

ζητήματα απορρήτου πρέπει να επιλυθούν σε κάποιο βαθμό. Επιπλέον, μια άλλη πολλά υποσχόμενη περίπτωση χρήσης ψηφιακών δίδυμων φαίνεται να είναι στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης καθώς στο μέλλον μπορεί κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν για να σωθούν ζωές. Ωστόσο, η τεχνολογία πρέπει ακόμα να ξεπεράσει ορισμένες προκλήσεις απορρήτου, λόγω της ευαίσθητης φύσης των δεδομένων.

Επιπλέον, συζητήσαμε αρκετές περιπτώσεις όπου τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητα των προϊόντων, να ωφελήσουν την συντήρηση του εξοπλισμού και να βελτιώσουν την παραγωγικότητα. Αντίστοιχα, στον τομέα της Εφοδιαστικής η δημιουργία δυναμικού δικτύου παράδοσης, η βελτίωση των παραδόσεων και η δυνατότητα ορθής διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως π.χ. ο έλεγχος της ζήτησης και των επιπέδων αποθέματος φαίνεται να είναι μερικά μόνο από τα οφέλη του Ψηφιακού Διδύμου στον κλάδο. Σε γενικές γραμμές βοηθά στην ολική επίγνωση της κατάστασης του φυσικού κόσμου των εταιρειών που το εφαρμόζουν.

Βέβαια, δε θα πρέπει να αμεληθούν οι προκλήσεις που ενέχει η εφαρμογή τους, οι οποίες αν μελετηθούν και αντιμετωπιστούν κατάλληλα, είναι σαφές ότι τα ψηφιακά δίδυμα, θα έχουν θετικό αντίκτυπο σε κάθε τομέα που τελικά θα επηρεάσει την καθημερινή ζωή.

4. Εφαρμογές του Ψηφιακού Διδύμου στις διαδικασίες της εφοδιαστικής αλυσίδας

4.1 Εισαγωγή

Οι εφαρμογές του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin) στην Παραγωγή και στη Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας, ειδικά ο ρόλος τους όσον αφορά την ιχνηλασιμότητα των λειτουργιών, τη συντήρηση μεταφορών, την προσομοίωση, τον απομακρυσμένο έλεγχο, την οπτικοποίηση περιουσιακών στοιχείων και στον σχεδιασμό (planning), εξετάζονται από πολλές δημοσιεύσεις στη βιβλιογραφία και μπορεί να αλλάξουν ριζικά το πρόσωπο της Βιομηχανικής Παραγωγής .

Το Industry 4.0 επέτρεψε τις τεχνολογικές εξελίξεις στα εργαλεία ανίχνευσης, παρακολούθησης και λήψης αποφάσεων. Αυτές οι εξελίξεις βοήθησαν στην ακριβή εφαρμογή του Digital Twin για την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η τεχνολογία Digital Twin μπορεί να βοηθήσει στην ικανοποίηση των πελατών κατανοώντας καλύτερα τις ανάγκες τους, αναπτύσσοντας βελτιώσεις σε υπάρχοντα προϊόντα, λειτουργίες και υπηρεσίες και συμβάλλοντας στην προώθηση νέων επιχειρηματικών καινοτομιών (Attaran & Bilge, 2023)

Χρησιμοποιώντας τη δύναμη του Digital Twin, οι εταιρείες παραγωγής μπορούν να προχωρήσουν από το να είναι απλά αντιδραστικές και να εξελιχθούν σε προγνωστικές και μπροστά από τις εξελίξεις. Μπορούν να προβλέψουν πότε ο εξοπλισμός φθείρεται ή χρειάζεται επισκευή, να βελτιώσουν την απόδοση του εξοπλισμού τους, να παρατείνουν τη ζωή τους και να μάθουν πώς να τον επανασχεδιάζουν για να επεκτείνουν τις δυνατότητές του. Επιπλέον, τα Digital Twins τους δίνουν τη δυνατότητα να σχεδιάζουν βάση αναλύσεων πριν το λανσάρισμα του προϊόντος και προσθέτουν ευφυΐα στις μη αυτόματες διαδικασίες για να βελτιώσουν την ορατότητα των αναγκών των πελατών, κ.λπ. Οι ακόλουθες υποενότητες περιγράφουν αυτές τις δυνατότητες των Digital Twins με περισσότερες λεπτομέρειες.



Εικόνα 4.8 Εξέλιξη της χρήσης των Digital Twins στην Βιομηχανία

4.2. Σχεδιασμός Εφοδιαστικής Αλυσίδας με χρήση Digital Twin

Το ψηφιακό δίδυμο έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει πληθώρα διαδικασιών που εμπλέκονται σε μια αλυσίδα εφοδιασμού. Στον παρακάτω πίνακα 4.2 φαίνονται οι διαδικασίες αλλά και πως το ψηφιακό δίδυμο εμπλέκεται σε αυτές.

Πίνακας 4.2 Συσχετισμός ψηφιακού διδύμου και διαδικασιών εφοδιαστικής αλυσίδας

Διαδικασία εφοδιαστικής αλυσίδας	Συνεισφορά ψηφιακού διδύμου
Σχεδιασμός	Ακριβέστερος και Μακροπρόθεσμος Σχεδιασμός
Πρόβλεψη Ζήτησης	Περισσότερα και Εγκυρότερα Δεδομένα
Aggregate Planning	Καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων της παραγωγής
Σχεδιασμός αποθέματος	Προγραμματισμός και επαλήθευση αποθεμάτων
Προμήθειες	Μείωση κόστους και βελτίωση της απόδοσης

4.2.1. Η σημασία του Ψηφιακού Διδύμου στον τομέα του Σχεδιασμού

Η πρόβλεψη της ζήτησης (Demand Forecasting) είναι θεμελιώδης για τον τομέα του Σχεδιασμού (Planning). Οι περισσότερες αποφάσεις λαμβάνονται βάση των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης ζήτησης προκειμένου να συντονιστούν οι προμήθειες (Sourcing), η παραγωγή και τα logistics. Για παράδειγμα, για τη διαχείριση του αποθέματος, οι μηχανικοί επί του παρόντος πρέπει να σχεδιάσουν την ποσότητα του κατάλληλου αποθέματος, τη διανομή σε κάθε αποθήκη αλλά και την προμήθεια που αναλογεί στο κάθε εργοστάσιο, σύμφωνα με την πρόβλεψη για τη ζήτηση των αγορών, την παραγωγικότητα και την τρέχουσα τιμή προμήθειας.

Σύμφωνα με τον (Hugos, 2018), υπάρχουν 4 μεγάλες τεχνικές πρόβλεψης της ζήτησης:

- Οι ποιοτικές τεχνικές, οι οποίες αποτελούν εμπειρικές προσεγγίσεις όπου οι μηχανικοί λαμβάνουν αποφάσεις με βάση την εμπειρία και τις γνώσεις τους.
- Οι περιστασιακές μέθοδοι, που αντιπροσωπεύουν υποθετικές προσεγγίσεις σύμφωνα με την παραδοχή ότι η ζήτηση συσχετίζεται με κάποιους παράγοντες και συνεπώς οι προβλέψεις γίνονται βάση των πιθανών αλλαγών αυτών των παραγόντων.

- Η χρονοσειρά, δηλαδή μια αναλυτική προσέγγιση όπου η πρόβλεψη γίνεται με βάση τάσεις και μοτίβα από ιστορικά δεδομένα και ζητήσεις από παλαιότερες χρονικές περιόδους.
- Η προσομοίωση, όπου χρησιμοποιείται λογισμικό υπολογιστή για την προσομοίωση μελλοντικών συνθηκών κάτω από διαφορετικές ρυθμίσεις.

Θα πρέπει να τονιστεί πως συνήθως εφαρμόζονται περισσότερες από μία τεχνικές ταυτόχρονα για να αυξηθεί η αξιοπιστία, η αποτελεσματικότητα και να βελτιστοποιηθεί το σχετικό κόστος.

Ωστόσο, με την άνοδο των τεχνολογιών πληροφορικής και το Industry 4.0, η ηλεκτρονική αλυσίδα εφοδιασμού τείνει να είναι πιο ψηφιοποιημένη και αυτοματοποιημένη. Για παράδειγμα, το IoT μπορεί να κάνει τη συλλογή και την ανταλλαγή δεδομένων πιο αποτελεσματική, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Big Data) μπορεί να κάνει πιο ακριβή την πρόβλεψη της ζήτησης ενώ η άνοδος της ρομποτικής μειώνει την ανθρώπινη παρέμβαση. Ως εκ τούτου, μια νέα προσέγγιση καλείται να εφαρμοστεί ώστε ο Σχεδιασμός να βελτιωθεί και να καταπολεμήσει σημαντικές προκλήσεις όπως ο μεγάλος ανταγωνισμός που μειώνει τα χρονικά περιθώρια παράδοσης των προϊόντων στον πελάτη, τα περιορισμένα δεδομένα προς ανάλυση και την αδυναμία επαλήθευσης της πρόβλεψης ζήτησης. (Kamble & Gunasekaran, 2019; Coracino, 2019)

Όπως έχει ήδη διατυπωθεί σε προηγούμενη ενότητα, το Ψηφιακό Δίδυμο έχει τρία σημαντικά χαρακτηριστικά που μπορούν να καταπολεμήσουν τις προαναφερθείσες προκλήσεις στον τομέα του Σχεδιασμού: τον συγχρονισμό μεταξύ Φυσικού Προϊόντος και Εικονικού Προϊόντος, την ολιστική και δυναμική άντληση δεδομένων και την υψηλής ποιότητας εικονική προσομοίωση των πιθανών σεναρίων. Συνεπώς, με την εφαρμογή του Ψηφιακού Διδύμου στο Σχεδιασμό, είναι εφικτή η γρήγορη δράση και απόκριση και συνάμα η μείωση του χρόνου παράδοσης. Επίσης, ο Σχεδιασμός θα μπορεί να βασίζεται σε πληροφορίες που ανακτώνται από ιστορικά δεδομένα και συμβάντα που έχουν ήδη καταγραφεί σε κάθε υπομονάδα στην Εφοδιαστική Αλυσίδα. Το Ψηφιακό Δίδυμο γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ του προσδιορισμού του στόχου, της συλλογής δεδομένων, της ανταλλαγής δεδομένων και της πραγματοποίησης των κατάλληλων ενεργειών.

Η δυναμική και ολιστική συλλογή των δεδομένων, όπως είναι φανερό, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακρίβεια της πρόβλεψης. Με τον συμβατικό τρόπο εκτέλεσης του Σχεδιασμού, τα ιστορικά δεδομένα δεν είναι αρκετά ώστε να περιγράψουν πλήρως τα εμπλεκόμενα περιβάλλοντα και την τρέχουσα κατάσταση των υπομονάδων ή των προϊόντων της αλυσίδας εφοδιασμού. Αντίθετα, το Ψηφιακό Δίδυμο συλλέγει δυναμικά δεδομένα από άφθονες πηγές όπως τα φυσικά προϊόντα, το περιβάλλον, τα ανταγωνιστικά ομότιμα προϊόντα, τους εμπλεκόμενους ανθρώπους, εικονικά μοντέλα, προσομοιώσεις, ακόμα και ιστορικά δεδομένα (Dos Santos, et al., 2020). Έτσι, αυτή η τεράστια γκάμα δεδομένων κάνει τις προβλέψεις και το Σχεδιασμό πιο ακριβείς και σε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα. Επίσης, ο Σχεδιασμός μπορεί και να επαληθευτεί, καθώς το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να προσομοιώσει τον Σχεδιασμό που εκτέλεσε πάνω σε ένα Εικονικό Προϊόν, το οποίο ο συμβατικός σχεδιασμός δεν μπορεί να φέρει εις πέρας. Έτσι, η επαλήθευση του Σχεδιασμού έχει

λιγότερες αποκλίσεις και με κάθε νέα χρήση του ψηφιακού διδύμου, ο Σχεδιασμός γίνεται ολοένα και πιο ποιοτικός.

4.2.2 Πρόβλεψη ζήτησης με χρήση Digital Twin

Η πρόβλεψη ζήτησης είναι το πρώτο βήμα του Σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα της πρόβλεψης καθορίζουν τα απαιτούμενα προϊόντα, τα κόστη και τα χρονοδιαγράμματα. Η πρόβλεψη της ζήτησης στην εποχή της ηλεκτρονικής αλυσίδας εφοδιασμού μετατοπίζεται από εμπειρική σε αναλυτική. Σε σύγκριση με το συμβατικό σχεδιασμό, γίνονται σημαντικές αλλαγές σε τρεις πυλώνες: ποια δεδομένα πρέπει να συλλέγονται από το Digital Twin, πώς συλλέγονται και πώς αυτά τα δεδομένα πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου το ψηφιακό δίδυμο να εκτελέσει την πρόβλεψη ζήτησης.

Σε ότι αφορά την ανάκτηση δεδομένων από το ψηφιακό δίδυμο, υπάρχει η δυνατότητα συλλογής δεδομένων από διαφορετικές πηγές, η οποία είναι δυναμική και μεταβλητή. Ενώ ο συμβατικός σχεδιασμός βασίζεται στην ανθρώπινη εμπειρία και τα ιστορικά δεδομένα, το ψηφιακό δίδυμο αντλεί δεδομένα αυτόματα από τέσσερις κύριες πηγές, σύμφωνα με τους (Singh, et al., 2022):

1. Φυσικών και εικονικών προϊόντων της αλυσίδας εφοδιασμού
2. Διαδικτυακούς πόρους
3. Σύνολα δεδομένων του ψηφιακού διδύμου
4. Ψηφιακά δίδυμα των προϊόντων

Από τα φυσικά και εικονικά προϊόντα της αλυσίδας εφοδιασμού, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να συλλέξει δεδομένα όπως το ποσοστό αστοχίας ενός μηχανήματος, τη ροή των προϊόντων μιας αποθήκης και την ποσότητα των υλικών. Από διαδικτυακούς πόρους, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να ανακτήσει δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον της αγοράς και τους πελάτες, όπως η τιμή του προϊόντος, η συνολική οικονομική κατάσταση των ανταγωνιστών και τα σχόλια των πελατών. Από σύνολα δεδομένων, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να ελέγχει ιστορικές περιπτώσεις και υλοποιημένα πλάνα. Από τα ψηφιακά δίδυμα των προϊόντων, η κατάσταση κάθε προϊόντος μπορεί να ανακτηθεί για να ελεγχθεί ο αριθμός των προϊόντων προς αντικατάσταση.

Το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να επεξεργάζεται δεδομένα που συλλέγονται για να βοηθήσει τους μηχανικούς να κάνουν προβλέψεις. Εκτός από τα ιστορικά δεδομένα στις τρέχουσες συνθήκες και τις ιστορικές περιπτώσεις με όμοια δεδομένα, μπορούν επίσης να εξαχθούν σύνολα δεδομένων ψηφιακών διδύμων. Εάν τα δεδομένα των ιστορικών περιπτώσεων και των τρεχουσών καταστάσεων ταιριάζουν αρκετά, τότε η πρόβλεψη της ζήτησης έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Εάν τα δεδομένα ιστορικών περιπτώσεων και οι τρέχουσες καταστάσεις ταιριάζουν εν μέρει, η πρόβλεψη ζήτησης θα προσαρμοστεί ανάλογα με τις διαφορές των δεδομένων με βάση τη σημαντικότητά τους. Η προσαρμογή θα ακολουθεί μοτίβα ή μαθηματικά μοντέλα που διερευνώνται από τα δεδομένα που συλλέγονται. Αν και ο συμβατικός σχεδιασμός συλλέγει επίσης δεδομένα για προβλέψεις, τα περιορισμένα δεδομένα και ο μεγάλος χρόνος

παράδοσης περιορίζουν σημαντικά την ακρίβεια και αποδοτικότητα σε σύγκριση με το σχεδιασμό που βασίζεται σε ψηφιακό δίδυμο (Yuchen, et al., 2020).

4.2.3 Aggregate Planning με χρήση Digital Twin

Ο συγκεντρωτικός σχεδιασμός (aggregate planning) ορίζεται ως η αντιστοίχιση της δυναμικότητας της παραγωγικής μονάδας, με τη πρόβλεψη της ζήτησης και το υπάρχον απόθεμα, με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος της παραγωγής να ελαχιστοποιηθεί. Για την ικανοποίηση των απαιτήσεων ζήτησης, συμπεριλαμβάνονται, η κανονική παραγωγή, η πλεονάζουσα παραγωγή και το απόθεμα. Οι μηχανικοί θα διανείμουν το απόθεμα των προϊόντων που παρέχεται για να ικανοποιήσουν ταυτόχρονα την παραγωγικότητα, το κόστος και την απόδοση των μηχανών. Σε ένα σύνθετο σύστημα παραγωγής με πολλά εργοστάσια και αποθήκες, η προσπάθεια αυτή ενέχει πολλές προκλήσεις (Kiran, 2013).

Με την εισαγωγή του ψηφιακού δίδυμου οι μηχανικοί μπορούν να παρακολουθούν και να εξάγουν τα δεδομένα της κανονικής παραγωγής, την πλεονάζουσα παραγωγή και το απόθεμα. Όταν τα Digital Twin εφαρμόζονται σε εργοστάσια και αποθήκες, τα επίπεδα παραγωγής και τα επίπεδα αποθέματος σε πραγματικό χρόνο θα καταγράφονται συνεχώς από το Digital Twin. Επιπλέον, θα καταγράφονται και τα δεδομένα των εργοστασίων και των αποθηκών για να υποδεικνύεται η κατάστασή τους. Καθώς αυτά τα δεδομένα συνεχίζουν να συσσωρεύονται, το Digital Twin θα υποδεικνύει συγκεκριμένα την παραγωγή και το απόθεμα κάθε εργοστασίου ή αποθήκης σε διαφορετικές συνθήκες. Επιπλέον, ορισμένες σημαντικές παράμετροι αξιολόγησης εξάγονται και από το Digital Twin, όπως το κόστος, η παραγωγικότητα, τα επίπεδα αποθεμάτων, οι αξιολογήσεις των εργαζομένων και οι αξιολογήσεις πελατών.

Δεύτερον, το Digital Twin βοηθά τους μηχανικούς να διανέμουν την προμήθεια σε κάθε γραμμή παραγωγής. Όταν οι μηχανικοί κάνουν ένα προσχέδιο για τη διανομή της προμήθειας στην κανονική παραγωγή, την πλεονάζουσα παραγωγή και το απόθεμα, το Digital Twin θα παρουσιάσει τις αντίστοιχες παραμέτρους όπως την απόδοση παραγωγής, το κόστος, το επίπεδο του αποθέματος και το ρίσκο, τα οποία θα καθορίσουν το πλάνο διανομής προμηθειών.

Τέλος, το Digital Twin βοηθά στην επαλήθευση του σχεδιασμού. Καθώς το Digital Twin βελτιώνει σημαντικά την ποιότητα της εικονικής μοντελοποίησης, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε ψηφιακά προϊόντα γίνονται πιο ακριβή. Τα υποψήφια πλάνα διανομής που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα μπορούν να επαληθευτούν μέσω εικονικής προσομοίωσης. Καθώς τα ιστορικά δεδομένα συνεχίζουν να συσσωρεύονται μαζί με τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στο σύνολο δεδομένων του Digital Twin, ο συγκεντρωτικός σχεδιασμός θα βελτιώνει συνεχώς την ποιότητα του. (Yuchen, et al., 2020)

4.2.4 Σχεδιασμός αποθέματος με χρήση Digital Twin

Όταν καθοριστεί ο συγκεντρωτικός σχεδιασμός, θα διεξαχθεί ο σχεδιασμός του αποθέματος. Ο σχεδιασμός αποθεμάτων είναι σχετικά ευέλικτος και υποκειμενικός, καθώς οι μηχανικοί διαχειρίζονται την κυκλική απογραφή, την εποχική απογραφή και την απογραφή ασφάλειας για να ικανοποιήσουν την κατανομή της προσφοράς στον συγκεντρωτικό σχεδιασμό. Η διαχείριση μεταξύ αυτών των τριών αποθεμάτων στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για την εξισορρόπηση της προσφοράς, του κόστους αποθέματος και του κόστους αλλαγής του αποθέματος.

Το Digital Twin προωθεί τον προγραμματισμό αποθεμάτων με παρόμοιες διαδικασίες όπως στο συγκεντρωτικό σχεδιασμό. Το Digital Twin της εφοδιαστικής αλυσίδας συλλέγει αρχικά δεδομένα σχετικά με το απόθεμα από το Digital Twin αποθηκών, προϊόντων και άλλες ομότιμες αλληλεπιδράσεις στην αλυσίδα εφοδιασμού. Είναι σημαντικό ότι στο επίπεδο των αποθηκών, οι πληροφορίες που παρουσιάζονται από το Digital Twin θα είναι σχετικά συγκεκριμένες και σαφείς, γεγονός που βοηθά τους μηχανικούς να επανεξετάσουν με σαφήνεια τις επιπτώσεις της διανομής αποθεμάτων. Καθώς τα δεδομένα συνεχίζουν να συσσωρεύονται, η μοντελοποίηση, η πρόβλεψη και οι προσομοιώσεις του Digital Twin τείνουν να είναι πιο ακριβείς. Όταν τα δεδομένα συγκεντρωθούν επαρκώς, το Digital Twin θα βοηθήσει τους μηχανικούς να επαληθεύσουν τον προγραμματισμό της απογραφής. (Yuchen, et al., 2020)

4.2.5 Διαχείριση προμηθειών με τη χρήση του Digital Twin

Σύμφωνα με έρευνα της (Forbes, 2021), η εισαγωγή των τεχνολογιών Industry 4.0 στις προμήθειες και η δημιουργία του “Procurement 4.0” είναι μέρος ενός ευρύτερου στόχου για πολλούς οργανισμούς. Οι εταιρείες θέλουν να επικεντρωθούν στη διαχείριση των προμηθειών ως κέντρο δημιουργίας αξίας και ως στρατηγικό ηγέτη. Η τεχνητή νοημοσύνη, ο αυτοματισμός και τα μεγάλα δεδομένα παρέχουν τη βάση για να επιτευχθεί αυτό το εγχείρημα, αξιοποιώντας τις δυνατότητες του Industry 4.0.

Η επαυξημένη πραγματικότητα (AR) είναι μια τεχνολογία που μπορεί να προσφέρει πολλές λύσεις για την βελτίωση της διαχείρισης προμηθειών. Μέσω της ψηφιοποίησης και της εικονικής πραγματικότητας, το AR μπορεί να ενσωματώσει ψηφιακά δεδομένα στο φυσικό περιβάλλον του χρήστη.

Το AR μπορεί να βελτιώσει τις προμήθειες μέσω:

- Απομακρυσμένων επισκέψεων σε τοποθεσίες προμηθευτών, με χρήση εικονικής πραγματικότητας (VR) για την αντιμετώπιση προβλημάτων, συναντήσεις με προμηθευτές ή για τον έλεγχο των α'υλών και υλικών.
- Κατευθυνόμενων αγορών, πράγμα που βελτιώνει την εμπειρία του χρήστη και τη διαφάνεια, καταγράφει όλα τα δεδομένα συναλλαγών και διασφαλίζει τη συμμόρφωση με τις πολιτικές αγορών
- Δημιουργίας πινάκων και heads-up displays (HUD) που παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες για την προμήθεια, τις διαπραγματεύσεις συμβάσεων και τη διαχείριση υλικών. Ένα μέλος της ομάδας που χρησιμοποιεί ακουστικά με

δυνατότητα AR θα μπορούσε να σαρώσει ένα στοιχείο και να λάβει άμεσες πληροφορίες σχετικά με τα τρέχοντα επίπεδα αποθέματός του, τις καλύτερες τιμές από μια σειρά πιθανών προμηθευτών και ενημερώσεις από τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και πηγές ειδήσεων του κλάδου που θα μπορούσαν να υποδεικνύουν πιθανά εμπόδια για την απόκτηση βασικών πρώτων υλών

- Δημιουργία ψηφιακού διδύμου μιας υπάρχουσας συσκευής ή εξαρτήματος ώστε το τμήμα Προμηθειών να συνεργαστεί με ομάδες μηχανικών και Έρευνας & Ανάπτυξης για να πειραματιστεί πάνω σε αυτά, χωρίς να επηρεάσει τον πραγματικό κόσμο. Μπορεί να μοντελοποιήσουν μια αλλαγή για να μετρήσουν τη βελτίωση της απόδοσης και να αξιολογήσουν τις ανοχές χρησιμοποιώντας εναλλακτικά υλικά που κοστίζουν λιγότερο ή να εκτελέσουν δοκιμές αντοχής για να αναθεωρήσουν τα χρονοδιαγράμματα συντήρησης και να αποφύγουν δαπανηρές διακοπές λειτουργίας.

Επίσης, οι συσκευές IoT σε συνδυασμό με το υπολογιστικό νέφος προσθέτουν πολύτιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από πολλές πηγές για ανάλυση, βελτίωση διαδικασιών και λήψη αποφάσεων. Μπορούν να εξυπηρετήσουν τις προμήθειες ως εξής:

- Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο όλων των υλικών, εξαρτημάτων και τελικών προϊόντων για την αποφυγή και τον μετριασμό των δαπανηρών διαταραχών της αλυσίδας εφοδιασμού.
- Αυτόματη αναπαραγγελία ανάλογα με το περιβάλλον βάσει διαθεσιμότητας υλικού, τιμολόγησης, συνθηκών αγοράς κ.λπ.
- Ενσωμάτωση με μοντέλα αγορών που βασίζονται σε blockchain για αυτόματη παροχή ασφαλών πληρωμών μετά την επιβεβαιωμένη παραλαβή των αγαθών.

4.3. Σύνοψη κεφαλαίου

Η τεχνολογία του Ψηφιακού Διδύμου ενεργοποιεί μια σημαντική ευκαιρία για την ενσωμάτωση του φυσικού κόσμου στον εικονικό, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζει ολόκληρη η Εφοδιαστική Αλυσίδα, από τον τομέα της πρόβλεψης ζήτησης μέχρι και την παράδοση των προϊόντων στον τελικό καταναλωτή.

Οι λύσεις Ψηφιακού Διδύμου μπορούν να βοηθήσουν τις εταιρείες να κινηθούν προς πιο έξυπνη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας και των logistics, βελτιστοποιώντας τις επιμέρους διαδικασίες Σχεδιασμού, Πρόβλεψης Ζήτησης, Διαχείρισης Αποθέματος, Προμηθειών κ.α διαδικασιών, κρίσιμων για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών τους.

Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση του ψηφιακού διδύμου, καθώς λόγω πολλών δεδομένων που συλλέγει και ανακτά από διάφορες πηγές, ιστορικά δεδομένα και real-time δεδομένα, παρέχει ακριβέστερη και ποιοτικότερη πρόβλεψη και άρα καλύτερο

σχεδιασμό, ελαχιστοποιώντας έτσι τα κόστη των εταιρειών, αξιοποιώντας αποτελεσματικότερα το απόθεμα αλλά και την δυναμικότητα του εξοπλισμού τους.

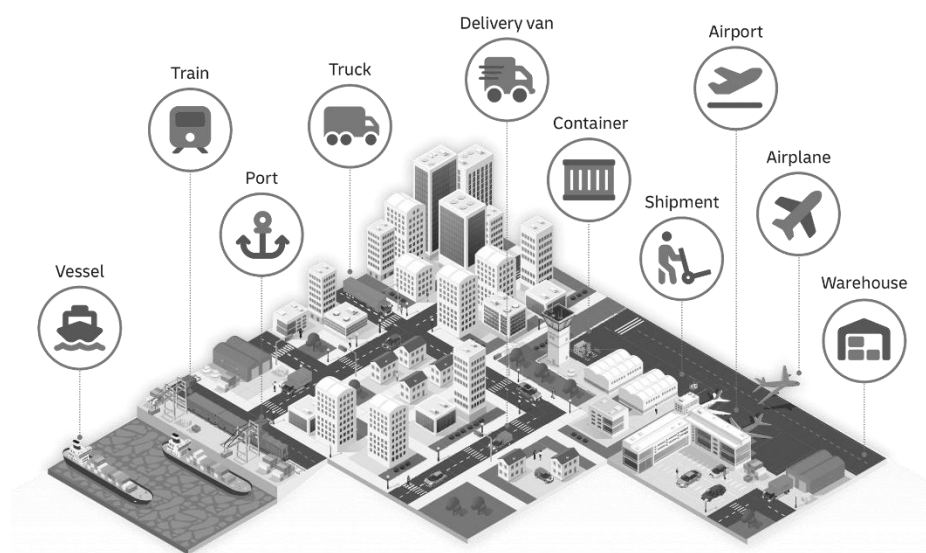
Γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου, το Ψηφιακό Δίδυμο επίσης παρέχει στον τομέα των προμηθειών μια σειρά εργαλείων για τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση της απόδοσης και τη δημιουργία αξίας σε όλες τις διαδικασίες Προμηθειών. Οι εταιρείες που ενστερνίζονται τις δυνατότητες του Procurement 4.0 μπορούν να ενισχύσουν την ανταγωνιστική τους βάση και να λάβουν πιο έξυπνες και πιο στρατηγικές επιχειρηματικές αποφάσεις.

5. Χρήση Ψηφιακού Διδύμου στο εκτελεστικό σκέλος της Εφοδιαστικής Αλυσίδας

5.1. Εισαγωγή

Τα εργοστάσια μπορούν να χρησιμοποιήσουν λύσεις Ψηφιακού Διδύμου σε πολλούς τομείς εκτέλεσης διαδικασιών logistics και εφοδιαστικής αλυσίδας. Για παράδειγμα, το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ακρίβειας και της αποτελεσματικότητας της διαχείρισης της εφοδιαστικής, την αποθήκευση, το χειρισμό υλικών, τη μεταφορά και τη ναυτιλία, τη διαχείριση στόλου και την αποτελεσματικότητα διαδρομής (Blomkvist Y, 2020). Το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες να προβλέπουν καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, να βελτιώσουν το σχεδιασμό της αποθήκευσης, να εντοπίσουν τις βέλτιστες διαδρομές μεταφοράς και να βοηθήσουν τον οργανισμό να δημιουργήσει μια πιο ανθεκτική αλυσίδα εφοδιασμού, με καλύτερη ορατότητα, χωρίς να αλλάξουν σημαντικά τα γενικά χαρακτηριστικά της.

Στα logistics, σύμφωνα με την (DHL, 2021), το βέλτιστο ψηφιακό δίδυμο θα ήταν ένα αντίγραφο σε πραγματικό χρόνο ενός ολόκληρου δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας. Στις επόμενες ενότητες θα γίνει λόγος για τη συμβολή του Ψηφιακού Διδύμου στη γενικότερη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας ενώ προχωρώντας θα αναλυθεί και η συνεισφορά του σε όλες τις επιμέρους εκτελεστικές λειτουργίες εφοδιαστικής (αποθήκη, μεταφορές & διανομή, επιστροφές).



Εικόνα 5.9 Εφαρμογές Digital Twin στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

Στον παρακάτω πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μελέτες περίπτωσης εφαρμογής του Ψηφιακού Διδύμου στο εκτελεστικό σκέλος της εφοδιαστικής αλυσίδας και μια σύντομη περιγραφή του οφέλους χρησιμοποίησής του.

Μελέτη Περίπτωσης	Όφελος ψηφιακού διδύμου
Δημιουργία πλατφόρμας Digital Twin για τη διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας	Ευελιξία, υψηλότερη απόκριση σε ξαφνικές διαταραχές και μείωση χρόνου εκτέλεσης εργασιών
Ψηφιακό Δίδυμο καταστήματος & αποθήκης εταιρείας λιανικής πώλησης	Αναγνώριση βέλτιστης «διαδρομή ανεφοδιασμού» και μείωση χρόνου εκτέλεσης εργασιών
Πλήρης αναπαράσταση ενός χώρου αποθήκης μέσω Ψηφιακού Διδύμου	Δυνατότητα αναπαράστασης δυνατότητας αποθήκευσης με απόκλιση 1,38% από το φυσικό δίδυμο
Truck platooning (διμοιρία φορτηγών)	Βελτίωση ροής κυκλοφορίας, αύξηση ασφάλειας και μείωση καταναλώσεων καυσίμου

5.2. Διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας

Ο αένας κύκλος του αυξανόμενου κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας επηρεάζει τα αποτελέσματα όλων των ενδιαφερόμενων μερών της. Ως αποτέλεσμα, οι βιομηχανίες, οι έμποροι λιανικής και οι διανομείς έχουν προσδιορίσει ως κρίσιμη παράμετρο τη μείωση του κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας τους. Επιπλέον, η εξαιρετική απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας έχει στρατηγική αξία που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ταχεία οικονομική απόσβεση και σε βελτιώσεις στην παραγωγικότητα και τα κέρδη (Attaran & Attaran, 2007). Επιπλέον, το Digital Twin μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της just-in-time ή just-in-sequence παραγωγής και στην ανάλυση των διαδρομών διανομής. Η τεχνολογία αυτή είναι επίσης χρήσιμη σε άλλες ζωτικές φάσεις της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένης της σύλληψης της ιδέας των προϊόντων, της ανάπτυξης προϊόντων και της διανομής προϊόντων. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνολογία Digital Twin μπορεί να λύσει τις προκλήσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας παρακολουθώντας δείκτες όπως αυτούς της απόδοσης της συσκευασίας, της διαχείρισης στόλου και της αποτελεσματικότητας των διανομών (Moshood, et al., 2021).

5.2.1 Μελέτη περίπτωσης διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω Digital Twin

Επιπροσθέτως, θα εξεταστεί μια ακόμη ενθαρρυντική μελέτη περίπτωσης από την JD.COM, τον μεγαλύτερο λιανοπωλητή της Κίνας βάσει εσόδων. Η εταιρεία αναδιαμόρφωσε το δίκτυο της εφοδιαστικής αλυσίδας κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, χρησιμοποιώντας μια πλατφόρμα Digital Twin. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή της βελτίωσε και βελτιώνει ακόμη σημαντικά την αποτελεσματικότητα απόκρισης της εταιρείας. (Wang, et al., 2022)

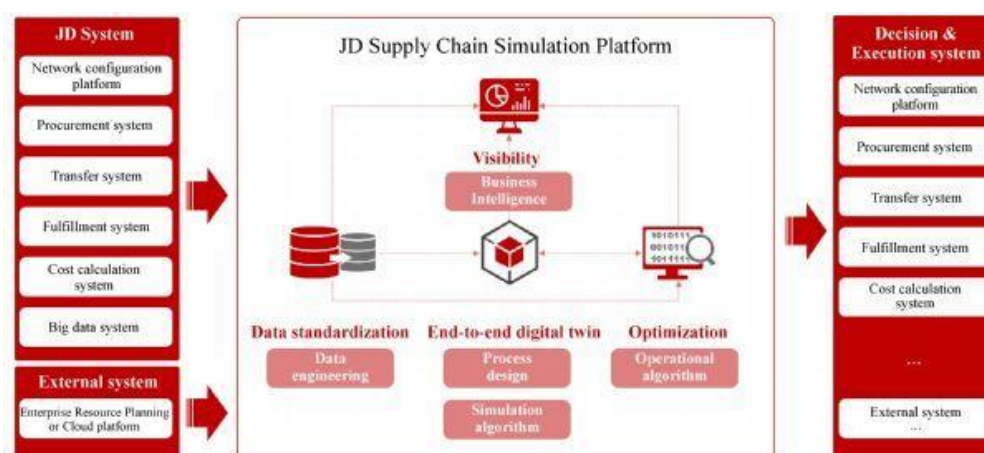
Εισαγωγικά, αξίζει να αναφέρουμε κάποια στοιχεία για τη συγκεκριμένη εταιρεία λιανεμπορίου. Η JD.COM διαχειρίζεται 41 μεγάλα πάρκα εφοδιαστικής αλυσίδας στην Κίνα, με σχεδόν 1300 αποθήκες και πάνω από 9 εκατομμύρια αυτολειτουργούμενες μονάδες τήρησης αποθεμάτων (Stock Keeping Units-SKU). Το εύρος των προϊόντων καλύπτει καταναλωτικά είδη συσκευασίας, συσκευές

πληροφοριών, οικιακές συσκευές, ρούχα, φρέσκα τρόφιμα, βιβλία και αυτοκίνητα. ο δίκτυο μεταφορών περιλαμβάνει πολλαπλές μεθόδους μεταφοράς, που περιλαμβάνουν χερσαία μεταφορά και ναυτιλία.

Αποφάσισε να επεκτείνει τον σχεδιασμό και τη λειτουργία της εφοδιαστικής της αλυσίδας χρησιμοποιώντας ψηφιακές και έξυπνες τεχνολογίες και μοντέλα πολλαπλών καναλιών. Για τη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών, οι παραδοσιακές μέθοδοι σχεδιασμού της αλυσίδας εφοδιασμού και οι αλγόριθμοι αντιμετώπισαν αυξανόμενες προκλήσεις, οι οποίες ενισχύθηκαν από το ξέσπασμα του COVID-19 από τα τέλη του 2019. Πρώτον, η πανδημία προκάλεσε εξαιρετική ζήτηση για μάσκες, αντισηπτικά, οικιακά προϊόντα καθαρισμού και τρόφιμα. Δεύτερον, οι συγκοινωνίες διακόπηκαν λόγω των lockdown. Τρίτον, τα προϊόντα ήταν εκτός αποθέματος λόγω της έλλειψης εργατικού δυναμικού, πρώτων υλών και διαταραχών των logistics. Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, εφάρμοσε μια πλατφόρμα Digital Twin για να υποστηρίξει τις δραστηριότητές της.

Η πλατφόρμα αυτή δημιουργεί ψηφιακές αναπαραστάσεις end-to-end για ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού στο κλάδο του λιανεμπορίου, οι οποίες αποτελούνται από πολλά διαφορετικά στάδια, η εταιρεία έχει μια ολοκληρωμένη δομή εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου τα προϊόντα παραδίδονται απευθείας από τα εργοστάσια και τους κατασκευαστές, στους καταναλωτές, μέσω μιας ενιαίας πλατφόρμας.

Αυτή η ολοκληρωμένη δομή εφοδιαστικής αλυσίδας έχει υψηλότερο επίπεδο συνεργασίας, πιο αποτελεσματική ανταλλαγή πληροφοριών και υψηλότερο επίπεδο ευελιξίας από την υπάρχουσα δομή της εφοδιαστικής αλυσίδας (Shen & Sun, 2021). Η πλατφόρμα είναι καλά δομημένη για να υποστηρίξει αυτήν την ολοκληρωμένη δομή της εφοδιαστικής αλυσίδας συνδέοντας αποτελεσματικά εσωτερικά και εξωτερικά συστήματα για να προσφέρει μια ολιστική αξία σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.10 Δομή της πλατφόρμας Digital twin της JD.COM.

Οι πηγές δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τον συγχρονισμό της φυσικής αλυσίδας εφοδιασμού και των ψηφιακών μοντέλων περιλαμβάνουν μία πλατφόρμα

διαμόρφωσης δικτύου, ένα σύστημα προμηθειών, ένα σύστημα μεταφοράς και ένα σύστημα πλήρωσης. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και οι αλγόριθμοι προσομοίωσης συνεργάζονται για να υποστηρίξουν τον ολοκληρωμένο σχεδιασμό της εφοδιαστικής αλυσίδας και τις έξυπνες λειτουργίες. Χρησιμοποιώντας απευθείας σύνδεση με συστήματα αποφάσεων και εκτέλεσης, αυτές οι βελτιστοποιημένες πληροφορίες μπορούν να εφαρμοστούν γρήγορα για να ανταποκρίνονται στις αλλαγές που υπάρχουν στο περιβάλλον. Εν τω μεταξύ, οι εισερχόμενες πληροφορίες οπτικοποιούνται για καλύτερη κατανόηση. Η πλατφόρμα αναμένεται να υποστηρίξει ένα ευρύ φάσμα επιχειρηματικών αποφάσεων για την JD.COM, από μακροπρόθεσμες στρατηγικές έως μεσοπρόθεσμα σχέδια και βραχυπρόθεσμες λειτουργίες. Η επόμενη υποενότητα εξετάζει ως παράδειγμα την αναδιαμόρφωση δικτύου της εφοδιαστικής αλυσίδας.

5.2.2 Αναδιαμόρφωση του δικτύου της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω της πλατφόρμας Digital Twin

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζουμε πώς η πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου της μελέτης περίπτωσης που αναλύσαμε στην προηγούμενη υποενότητα, βελτίωσε την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών για την αντιμετώπιση των προκλήσεων κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19.

Σε ένα τυπικό δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας δύο επιπέδων, τα κέντρα διανομής μπορεί ξαφνικά να μην έχουν τη δυνατότητα να διανείμουν αγαθά στις αποθήκες, επειδή τα περιφερειακά ξεσπάσματα της πανδημίας οδηγούν σε ταξιδιωτικούς περιορισμούς. Έτσι, η εταιρεία έπρεπε να αναδιαρθρώσει το δίκτυο της εφοδιαστικής της αλυσίδας ως απάντηση στους περιορισμούς που επιβλήθηκαν λόγω της πανδημίας. Οι παραγγελίες θα μπορούσαν να αναπληρωθούν από άλλα εναλλακτικά κέντρα διανομής ή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η στρατηγική backorder. Η υιοθέτηση εναλλακτικών κέντρων διανομής επηρέασε αρνητικά το ποσοστό εκπλήρωσης των παραγγελιών στην αρχική περιοχή εξυπηρέτησης και οδήγησε σε σημαντικό πρόσθετο κόστος μεταφοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τα απρόβλεπτα ξεσπάσματα COVID-19 σε διάφορα μέρη και στα ποικίλα στοκ αποθεμάτων μεγάλων SKU σε διαφορετικές περιοχές, ήταν δύσκολο να αξιολογηθεί εάν και πώς να αναδιαρθρωθεί το δίκτυο της αλυσίδας εφοδιασμού για την διαπεριφερειακή διανομή. Η πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου της εφοδιαστικής αλυσίδας της εταιρείας είναι σε θέση να εξετάζει διεξοδικά και σε βάθος τους αντικρουόμενους στόχους και να προσομοιώνει και να βελτιστοποιεί γρήγορα τις διαφορετικές στρατηγικές. Η χρήση της πλατφόρμας Digital Twin συνεπάγεται τα ακόλουθα βήματα:

1. Συμπερίληψη των μοντέλων προσομοίωσης στην πλατφόρμα Digital Twin: Υποστηρίζει τη δημιουργία μοντέλων συνδυάζοντας το φυσικό επίπεδο, το επίπεδο χρόνου, το επίπεδο διαδικασίας και επίπεδο κόστους για να χαρτογραφηθεί το πραγματικό περιβάλλον όσο το δυνατόν ακριβέστερα. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία μεγάλων δεδομένων για να δημιουργήσει αυτόματα τα βασικά δεδομένα για μοντέλα προσομοίωσης του συστήματος

παραγωγής. Οι βασικές πληροφορίες περιλαμβάνουν το εύρος των προϊόντων, την περιοχή, το κέντρο διανομής, τις πληροφορίες της αποθήκης και τον τύπο του πελάτη.

2. Αντικατοπτρισμός της τρέχουσας επιχειρηματικής κατάστασης:
Μετά την προετοιμασία, τα μοντέλα προσομοίωσης απαιτούν λεπτομερή δομή και παραμέτρους για να αντικατοπτρίζουν με ακρίβεια το υπάρχον σύστημα. Οι πρόσθετες ρυθμίσεις περιλαμβάνουν την τρέχουσα δομή δικτύου και τη στρατηγική αναπλήρωσης. Λαμβάνοντας ως παράδειγμα μία από τις περιπτώσεις κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, η ζήτηση στην περιοχή Shijiazhuang αναπληρώθηκε από δύο κέντρα διανομής στο Shijiazhuang και στο Πεκίνο. Με προσεκτική βαθμονόμηση των παραμέτρων, τα μοντέλα προσομοίωσης στην πλατφόρμα μπόρεσαν να αποτυπώσουν τη φυσική αλυσίδα εφοδιασμού από ορισμένους δείκτες (π.χ. τοπικό ποσοστό εκπλήρωσης παραγγελιών και κόστος μεταφοράς) με μέση ακρίβεια 96%.
3. Καθορισμός υποψηφίων εναλλακτικών σχεδίων:
Λαμβάνοντας το ίδιο παράδειγμα, λόγω των ταξιδιωτικών περιορισμών στο Πεκίνο, η χρήση των κέντρων διανομής στην Tianjin ορίστηκε ως εναλλακτικό σχέδιο.
4. Ανάλυση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων:
Η εταιρεία εφάρμοσε προηγμένους αλγόριθμους για τη βελτίωση του σχεδιασμού του δικτύου παράδοσης (Kang, et al., 2021). Στην παραπάνω περίπτωση, η εναλλακτική λύση αξιολογήθηκε βάσει του ποσοστού κύκλου εργασιών του αποθέματος, της διαθεσιμότητας αποθέματος, του ποσοστού διαχωρισμού παραγγελιών, του ποσοστού εκπλήρωσης τοπικών παραγγελιών, την εκπλήρωση παράδοσης παραγγελίας την ίδια ημέρα και του συνολικού κόστους. Ως αποτέλεσμα, μόνο ένα μέρος των SKU αναπληρώθηκε από το κέντρο διανομής στην Tianjin για να παραμείνει η εταιρεία σε υψηλό επίπεδο εξυπηρέτησης.

5.2.3 Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης

Συνοπτικά, η πλατφόρμα της JD.COM βελτιώνει σημαντικά τη λειτουργική αποτελεσματικότητά της, ως απάντηση σε ξαφνικούς περιορισμούς στην αλυσίδα εφοδιασμού κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19. Η πλατφόρμα υποστηρίζει τον ολιστικό σχεδιασμό της εφοδιαστικής αλυσίδας αντί να βελτιστοποιεί κάθε ένα ξεχωριστό στάδιο της ενιαίας αλυσίδας. Η πλατφόρμα επιτυγχάνει μια σημαντική ανακάλυψη στην αναπαράσταση της εφοδιαστικής αλυσίδας end-to-end στον εικονικό χώρο. Με τη διευκόλυνση των εργαλείων βελτιστοποίησης που βασίζονται σε δεδομένα, ο χρόνος απόκρισης στις διακοπές μειώνεται κατά μέσο όρο κατά 50%. Προηγουμένως, η αξιολόγηση της αναδιαμόρφωσης της εφοδιαστικής αλυσίδας με σχεδόν 200.000 SKU χρειάστηκε αρκετές ημέρες. Ο χρόνος εκτέλεσης μειώνεται σε λιγότερο από μία ώρα με τη βοήθεια αναλυτικών δεδομένων μεγάλων δεδομένων και εργαλείων βελτιστοποίησης στην πλατφόρμα Digital Twin.

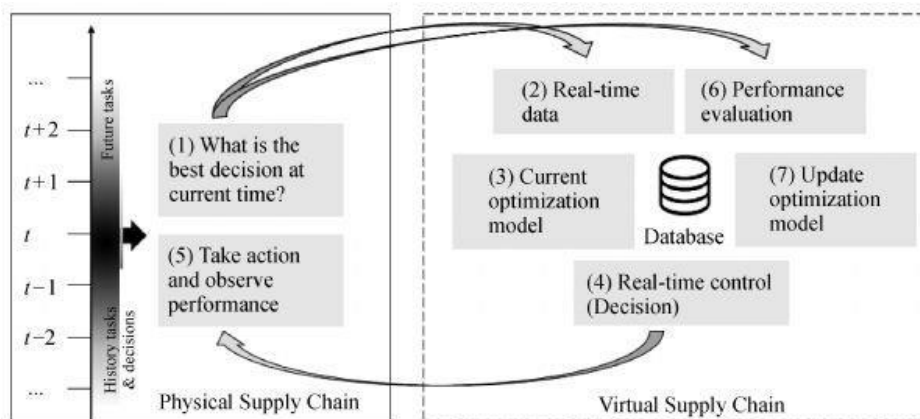
5.3 Βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας σε πραγματικό χρόνο

Σε ένα Digital Twin, η φυσική υπόσταση και το ψηφιακό μοντέλο συγχρονίζονται συχνά, κάτι που απαιτεί στιγμιαία βελτιστοποίηση των διαθέσιμων πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και σε επίπεδο συστήματος. Η χρήση των offline αποτελεσμάτων είναι ένας πολλά υποσχόμενος τρόπος ανταπόκρισης στις περιβαλλοντικές αλλαγές και στον περιορισμένο προϋπολογισμό. Μια απλή απεικόνιση αυτής της αρχής στη διαχείριση αποθεμάτων είναι η χρήση της τεχνολογίας αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τις πολιτικές αποθέματος που έχουν προκαθοριστεί στο κατάστημα λιανικής. (Bottani, et al., 2017)

Τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ιχνηλασιμότητας των προϊόντων, του ιστορικού του προϊόντος, του ποσού των πωλήσεων, της διαθεσιμότητας προϊόντων και του αποθέματος. Με τις πληροφορίες αποθέματος και διαθεσιμότητας προϊόντων, ένα κατάστημα μπορεί να εφαρμόσει πολιτικές αποθέματος με συνεχή έλεγχο, μόλις εντοπιστεί μια αλλαγή κατάστασης αποθέματος σε πραγματικό χρόνο.

Η λήψη όλων των αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο δεν είναι απαραίτητη και χρειάζεται να γίνει η επιλογή του σωστού ρυθμού συγχρονισμού. Στην πράξη, «σε πραγματικό χρόνο» (“real-time”), σημαίνει ότι ο χρόνος μεταξύ των αλλαγών του πραγματικού κόσμου είναι αμελητέος σε σχέση με την ανάγκη και την προβλεπόμενη χρήση των ψηφιακών μοντέλων από εφαρμογές ή χρήστες (Minerva, et al., 2020)

Γενικά, εφαρμόζονται δύο στρατηγικές για την ενεργοποίηση των αλγορίθμων σε “real-time” προβλήματα: Η στρατηγική ενεργοποίησης χρόνου (π.χ. λήψη αποφάσεων κάθε λεπτό) και η στρατηγική ενεργοποίησης συμβάντων (π.χ. λήψη αποφάσεων όταν φθάνει μια νέα ζήτηση). Οι (Heemels, et al., 2012) συζητούν σχετικά με την ενεργοποίηση χρόνου και την ενεργοποίηση συμβάντων στα συστήματα ελέγχου. Παρά τις υπολογιστικές καθυστερήσεις που εξετάζονται ρητά από τους συγγραφείς, στην πράξη εμφανίζονται περισσότεροι τύποι καθυστερήσεων. Η εικόνα 5.9 δείχνει ένα βασικό σχήμα απόφασης σε ένα Digital Twin εφοδιαστικής αλυσίδας. Σύμφωνα με τον (Power, 2011), ο «πραγματικός χρόνος» στην πράξη έχει πάντα καθυστέρηση μεταξύ των φυσικών αλλαγών της εφοδιαστικής αλυσίδας, της αντανάκλασης της αλλαγής της φυσικής αλυσίδας εφοδιασμού σε δεδομένα, σε ένα ή περισσότερα συστήματα καταγραφής και στη διαθεσιμότητα αλλαγμένων δεδομένων στα τρέχοντα μοντέλα βελτιστοποίησης. Η παραπάνω περίληψη εξετάζει μόνο τη διαδικασία από τον πραγματικό κόσμο στις εικονικές αναπαραστάσεις. Εάν ληφθεί υπόψη η διαδικασία ανάδρασης, επιπλέον καθυστέρηση μπορεί να δημιουργηθεί μεταξύ της διαθεσιμότητας των αποφάσεων που προτείνει το μοντέλο και της υλοποίησης της απόφασης από τον ενεργοποιητή (actuator) ή τον χρήστη, και της πραγματικής αλλαγής.



Εικόνα 5.11 Βασικό σχήμα απόφασης σε πραγματικό χρόνο σε ένα DIGITAL TWIN

Η διάρκεια της περιόδου απόφασης ποικίλλει μεταξύ των διαφορετικών εφαρμογών. (Ulmer, 2018) βελτιστοποιεί εκ νέου τη δρομολόγηση οχημάτων ως αντίδραση στα νέα αιτήματα πελατών και εν αναμονή μελλοντικών αιτημάτων. Οι (Sung, et al., 2021) εφάρμοσαν δύο διαφορετικούς αλγόριθμους offline σχεδιασμού διαδρομής για να δημιουργήσουν διαφορετικά σύνολα δεδομένων και αποσκοπούν έτσι στη βελτίωση του online σχεδιασμού διαδρομής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διάρκεια μιας περιόδου απόφασης μπορεί να είναι μικρή. Για παράδειγμα, τα αυτοματοποιημένα κατευθυνόμενα οχήματα ελέγχονται σε επίπεδο χιλιοστού του δευτερολέπτου και η αναδιαμόρφωση μιας γραμμής παραγωγής για να ανταποκρίνεται σε επείγουσες παραγγελίες προσδιορίζεται απευθείας. Προς συζήτηση είναι πως οι στρατηγικές μπορούν να συνδυαστούν, λαμβάνοντας υπόψιν τις καθυστερήσεις για να αποκτήσουν συγχρονισμό την κατάλληλη στιγμή και να ανταποκριθούν πρακτικά σε οποιοδήποτε αίτημα. Επίσης, το κενό μεταξύ online και offline μοντέλου έχει ακόμη αναπάντητα ερωτήματα όπως πόσο συχνά θα πρέπει να ελέγχονται και να ανανεώνονται τα offline μοντέλα, λαμβάνοντας υπόψιν τον χρόνο που απαιτείται για να επικυρωθεί η απόδοσή τους αλλά και να γίνουν οι ενέργειες βελτιστοποίησής τους.

5.3.1 Μελέτη περίπτωσης βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω Digital Twin

Η εταιρεία dm-drogerie market με έδρα τη Γερμανία, δραστηριοποιείται στον κλάδο των καλλυντικών, υγειονομικής περίθαλψης, προϊόντων οικιακής χρήσης καθώς και υγιεινών τροφίμων, μέσω περισσότερων από 3700 καταστημάτων σε δώδεκα ευρωπαϊκές χώρες, ενώ οι πωλήσεις της αγγίζουν τα 11,2 δισεκατομμύρια ευρώ. Αξίζει να αναφερθεί ότι κέρδισε το βραβείο German Logistics 2020 για την εφαρμογή Ψηφιακού Διδύμου Εφοδιαστικής Αλυσίδας. Για το νέο κέντρο εφοδιαστικής που ξεκίνησε να λειτουργεί κοντά στο Βερολίνο, η dm-drogerie market δημιούργησε Ψηφιακά Δίδυμα για τα 2000 καταστήματα της, συμπεριλαμβανομένων των ραφιών της αποθήκης και των τοποθεσιών των προϊόντων της σε αυτά. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν σε πραγματικό χρόνο επέτρεψαν στη dm-drogerie market να βελτιστοποιήσει τις νέες διαδικασίες του logistics hub της, που κυμαίνονται από την αποπαλετοποίηση έως το pick & pack, ενώ παράλληλα βελτιστοποίησε τη μικτή παλέτα για τον αποτελεσματικό ανεφοδιασμό σε κάθε κατάσταση. Επιπλέον, οι

εργαζόμενοι στα καταστήματα ήταν όλοι εξοπλισμένοι με smartphone έτσι ώστε να αναγνωρίζεται η βέλτιστη «διαδρομή ανεφοδιασμού» και να μειώνονται οι χρόνοι εκτέλεσης εργασιών. (Matyi & Tamas, 2021)

5.4 Digital Twin σε Αποθήκες

Τα τελευταία χρόνια, τα Αυτοματοποιημένα Συστήματα Αποθήκευσης και Ανάκτησης (AS/RS) έχουν γίνει μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για την αποθήκευση και την ανάκτηση αγαθών. Τα AS/RS είναι συστήματα υποβοηθούμενα από υπολογιστή και ρομπότ που μπορούν να αποθηκεύουν προϊόντα σε συγκεκριμένες τοποθεσίες και να τα ανακτούν χωρίς τη βοήθεια του χειριστή. Τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος AS/RS είναι οι ραφαρίες, ο εξοπλισμός αποθήκευσης και ανάκτησης, τα σημεία εισόδου/εξόδου (I/O) και οι ταινίες μεταφοράς (Lerher, et al., 2010). Τα κύρια πλεονεκτήματά τους σε σχέση με τα παραδοσιακά συστήματα αποθήκευσης, είναι η βελτιωμένη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου, το μειωμένο κόστος εργασίας, οι σύντομοι χρόνοι ανάκτησης προϊόντων και ο βελτιωμένος έλεγχος των αποθεμάτων (Boysen & Stephan, 2016)

Ενώ το Digital Twin εφαρμόζεται ήδη σε διάφορα βιομηχανικά πλαίσια, η διαθέσιμη βιβλιογραφία σχετική με την αυτοματοποιημένη αποθήκευση, είναι ακόμη ανεπαρκής. Κάποιες μελέτες ωστόσο, όπως των (Braglia, et al., 2019) αναφέρουν το Digital Twin αποθήκης ως μια προσομοίωση που συλλέγει δεδομένα από το φυσικό σύστημα, μέσω αισθητήρων αναγνώρισης ραδιοσυχνότητας (RFID), το οποίο έχει ως στόχο να βελτιστοποιήσει τη ροή των παλετών μέσα σε μια αποθήκη. Οι (Coehlo, et al., 2021), προτείνουν ένα εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων που βασίζεται σε προσομοίωση, για τα Digital Twin των in-house logistics, που καλύπτει δραστηριότητες όπως η παραλαβή, η αποθήκευση, το picking των παραγγελιών, το cross-docking και η αποστολή τους. Το σύστημα υποστήριξης αποφάσεων συνδέει το φυσικό σύστημα με το εικονικό σύστημα μέσω ενός επιπέδου υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένων των Συστημάτων Διαχείρισης Αποθήκης (WMS) και ERPs. Το Digital Twin των (Leng, et al., 2021) επικεντρώνεται στην αποθήκευση και διανομή καπνού και αποτελείται από δύο μέρη, το κοινό μοντέλο βελτιστοποίησης και τον κινητήρα ημι-φυσικής προσομοίωσης. Ο κυβερνοφυσικός συγχρονισμός πραγματοποιείται από μια πλατφόρμα λογισμικού που ασχολείται με την ενοποίηση δημόσιων πρωτοκόλλων και διεπαφών με τη βάση δεδομένων. Ομοίως, ο (Leung, et al., 2022) επικεντρώνουν το δικό τους Digital Twin στα μοντέλα Μηχανικής Μάθησης (ML) για από κοινού βελτιστοποίηση των λειτουργιών αναπλήρωσης με το order picking στο πλαίσιο της αστικής εφοδιαστικής. Στην περίπτωση τους, το φυσικό σύστημα περιλαμβάνει μόνο τη διαδικασία επιλογής παραγγελιών. Τέλος, προτείνεται ένα Digital Twin αποθήκης από τον (Chen, et al., 2020), οι οποίοι επικεντρώθηκαν στην παρακολούθηση των δραστηριοτήτων ενός μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος (UAV), μέσα σε ένα φυσικό εργαστήριο όπου η συλλογή και μετάδοση δεδομένων υποβοηθείται από αισθητήρες RFID και πρωτόκολλο επικοινωνίας 5G.

5.4.1 Μελέτη περίπτωσης Digital Twin σε αποθήκη

Η προτεινόμενη υλοποίηση Digital Twin που θα αναλυθεί στην υποενότητα αυτή, βασίζεται σε ένα φυσικό σύστημα το οποίο είναι εγκατεστημένο σε ένα εργαστήριο στο Πολυτεχνείο του Τορίνο και σε ένα ψηφιακό μοντέλο των λειτουργιών AS/RS, που αναπτύχθηκε μέσω Προσομοίωσης Διακριτών Συμβάντων (Discrete-Event Simulation) και Μοντελοποίησης Βασισμένης σε Παράγοντες (Agent-Based Modelling) (Ferrari, et al., 2022).

Στην τρέχουσα κατάσταση, η συγκεκριμένη εφαρμογή Digital Twin στην αποθήκη δεν επιχειρεί να καθιερώσει τη “real - time” φυσική επικοινωνία στον κυβερνοχώρο, αλλά να αναπαράγει το φυσικό σύστημα σε ένα εικονικό περιβάλλον ως Digital Shadow (DS) (Kritzinger, et al., 2018)

Το σύστημα AS/RS που είναι εγκατεστημένο στο εργαστήριο έχει συνολική επιφάνεια 68,6 m² και είναι εξοπλισμένο με:

1. Σύστημα δέσμευσης διαδρόμων Maxi Shuttle (MS), παρόμοιο με γερανό πρόσδεσης μίνι φορτίου που μετακινεί containers κατά μήκος τριών αξόνων χρησιμοποιώντας μονές, διπλές και πολλαπλές εντολές,
2. Ένα μονό ράφι αποθήκευσης ενός διαδρόμου που αποτελείται από επτά επίπεδα και οκτώ κολώνες, με θέσεις αποθήκευσης μονές, διπλές και πολλαπλών βαθών,
3. Ένα σύστημα ταινιών μεταφοράς εισόδου/εξόδου, παράλληλο με το διάδρομο και τοποθετημένο στις στήλες τέσσερα και οκτώ αντίστοιχα,
4. Δύο σταθμοί εργασίας εγκατεστημένοι μέσα στο ράφι αποθήκευσης, με ράφια ροής βαρύτητας (gravity flow racks) για λειτουργίες parts-to picker. Οι σταθμοί εργασίας βρίσκονται δίπλα στο AS/RS και έτσι όλα τα κομμάτια είναι άμεσα προσβάσιμα και έτσι μειώνεται ο χρόνος εκτέλεσης των παραγγελιών. Επίσης, οι σταθμοί εργασίας είναι εξοπλισμένοι με συστήματα pick-to-light για λειτουργίες parts-to-picker.

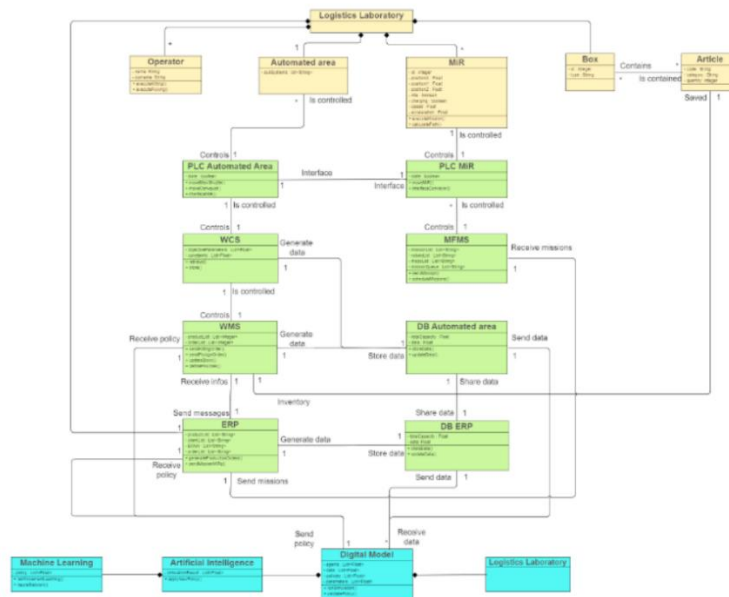
Μέσω του συστήματος ταινιών μεταφοράς εισόδου/εξόδου το AS/RS συνδέεται με ρομπότ που είναι υπεύθυνα για τις διαδικασίες χειρισμού υλικών εκτός του AS/RS. Το σύστημα που περιγράφηκε φαίνεται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.12 Οι σταθμοί εργασίας με σύστημα pick-to-light και διεπαφή MR

Η υποδομή πληροφορικής του AS/RS αποτελείται από ένα Warehouse Management System (WMS), για την προετοιμασία, την παρακολούθηση και την εκτέλεση δραστηριοτήτων αποθήκης συναλλακτικού χαρακτήρα και ενός Warehouse Control System (WCS), που αποτελεί μια εφαρμογή λογισμικού που κατευθύνει τις δραστηριότητες του AS/RS σε πραγματικό χρόνο. Ειδικότερα, οι εντολές picking χτίζονται στον κεντρικό υπολογιστή ανώτερου επιπέδου που αντιπροσωπεύεται από το WMS, και στη συνέχεια μεταδίδονται στο WCS. Στη συνέχεια, το WCS βελτιστοποιεί τις λειτουργίες και τις κινήσεις του AS/RS εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο Dijkstra που βασίζεται στη λίστα των container προς ανάκτηση. Αυτό οδηγεί σε μια λίστα δραστηριοτήτων που πρέπει να ολοκληρώσει το MR. Στη συνέχεια, αυτές οι πληροφορίες παραδίδονται στο φυσικό σύστημα μέσω του PLC, το οποίο στέλνει σήματα στους ενεργοποιητές (actuators) που είναι εγκατεστημένοι στον γερανό στοίβαξης και στους μεταφορικούς μίαντες.

Για την ανάπτυξη του ψηφιακού δίδυμου του εργαστηρίου δημιουργήθηκε ένα διάγραμμα κλάσεων Ενοποιημένης Γλώσσας Μοντελοποίησης (UML), δεδομένου ότι αυτός ο τύπος διαγραμμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματική περιγραφή των Digital Twin και της σύνδεσης μεταξύ των διαφόρων εμπλεκόμενων οντοτήτων (Azangoo, et al., 2020). Στο διάγραμμα που αναπτύχθηκε (Σχήμα 5.3), είναι δυνατόν να παρατηρηθεί η παρουσία τριών επιπέδων, τα οποία χαρακτηρίζονται από διαφορετικά χρώματα:



Σχήμα 5.3 Αρχιτεκτονική του ψηφιακού δίδυμου του εργαστηρίου εφοδιαστικής

1. Το φυσικό περιβάλλον (με κίτρινο χρώμα), το οποίο αναφέρεται στις οντότητες που έχουν φυσική θέση εντός του Εργαστηρίου και οι οποίες έχουν περιγραφεί παραπάνω.
2. Η υποδομή IT (με πράσινο χρώμα), η οποία περιλαμβάνει τα στοιχεία IT που λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ του φυσικού και του εικονικού χώρου.

3. Το εικονικό περιβάλλον (με μπλε χρώμα), το οποίο περιλαμβάνει όλες τις οντότητες που τοποθετούνται στον εικονικό χώρο, δηλαδή το ψηφιακό μοντέλο (DM).

Σε αυτή την ενότητα θα οριστεί εκτενέστερα το τρίτο επίπεδο του διαγράμματος. Στην αρχιτεκτονική του Digital Twin, το ψηφιακό μοντέλο χρησιμοποιείται ως εικονικό αντίγραφο του φυσικού εργαστηρίου Logistics. Αποτελείται επίσης από μια κλάση Τεχνητής Νοημοσύνης, η οποία προσφέρει τη δυνατότητα εκτέλεσης βελτιστοποιήσεων στο αντιγραμμένο σύστημα μέσω του ορισμού νέων διαδικασιών. Αυτό απαιτεί έναν τεράστιο όγκο δεδομένων που χρησιμοποιούνται ως είσοδος για τους αλγορίθμους ML. Αφού αναπαράγει με ακρίβεια το φυσικό σύστημα, το ψηφιακό μοντέλο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πηγή δεδομένων, εκτελώντας μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Πριν από την εφαρμογή των νέων πολιτικών που ορίζονται από την TN στο πραγματικό σύστημα, το μοντέλο εκτελεί μια επικύρωση για να συγκρίνει τη συμπεριφορά του συστήματος με τις παλιές πολιτικές. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί η αναμενόμενη βελτίωση, οι νέες πολιτικές εφαρμόζονται αυτόματα χωρίς την ανάγκη παρέμβασης ενός χειριστή. Αυτό αντικατοπτρίζει ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά ενός Digital Twin, δηλαδή την αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ φυσικού και εικονικού χώρου (Kritzinger, et al., 2018).

5.4.1.1 Υλοποίηση του Ψηφιακού διδύμου

Η δημιουργία ενός κατάλληλου ψηφιακού μοντέλου αποτελεί κρίσιμη πτυχή για μια επιτυχημένη εφαρμογή του Digital Twin. Μπορεί να δημιουργηθεί συγκεκριμένος τύπος ψηφιακού μοντέλου ανάλογα με τους στόχους εφαρμογής του Digital Twin (Neto, et al., 2021). Για την παρούσα μελέτη αναπτύχθηκε ένα υβριδικό μοντέλο που βασίζεται στο συνδυασμό DES & ABM. Το περιβάλλον που επιλέχθηκε για την κατασκευή του ψηφιακού μοντέλου είναι το AnyLogic, ένα λογισμικό προσομοίωσης πολλαπλών μεθόδων που βασίζεται σε Java και χρησιμοποιείται σε διάφορες βιομηχανίες (Borschev, et al., 2014). Στο τρέχον επίπεδο υλοποίησης Digital Twin, αναπαράγεται μόνο η αυτοματοποιημένη περιοχή του Εργαστηρίου Logistics καθώς και η κίνηση των container. Αντιθέτως στοιχεία όπως ο στόλος των ρομπότ MR, οι χειριστές και τα προϊόντα λείπουν.

Λόγω του υψηλού βαθμού πολυπλοκότητας που υπάρχει στο σύστημα η μοντελοποίηση είχε αρκετές προκλήσεις και ως εκ τούτου, τα στοιχεία του εργαστηρίου Logistics μοντελοποιήθηκαν χωριστά στο AnyLogic ως ανεξάρτητοι παράγοντες. Αυτό αποδείχτηκε χρήσιμο για την επίτευξη ενός υψηλού επιπέδου λεπτομέρειας στο εικονικό σύστημα. Για παράδειγμα, αντί να μοντελοποιηθεί το ράφι αποθήκευσης ως μια μοναδική οντότητα, μοντελοποιήθηκε μια συγκεκριμένη θέση αποθήκευσης στο ράφι. Κατά συνέπεια η προσομοίωση ολόκληρου του ραφιού αποθήκευσης, δημιουργείται ως το σύνολο του αριθμού παραγόντων ίσου με τον συνολικό αριθμό των θέσεων αποθήκευσης του ραφιού.

5.4.1.2 Εφαρμογή Digital Shadow

Σύμφωνα με τον (Akbari, 2018), ένα Digital Shadow μπορεί να οριστεί ως μια εξαιρετικά πιστή εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού στοιχείου που μπορεί να λαμβάνει και να ενσωματώνει δεδομένα. Εισάγεται σε μια υποδομή που επιτρέπει την αυτοματοποιημένη μονόδρομη ροή δεδομένων από τη κατάσταση του φυσικού αντικειμένου προς το ψηφιακό μοντέλο. Αυτό καθιστά το Digital Shadow απόλυτα συγχρονισμένο με το φυσικό του δίδυμο και, κατά συνέπεια, κάθε αλλαγή θα αντικατοπτρίζεται αμέσως στο ψηφιακό αντίγραφο μόλις εφαρμοστεί. Από τον προαναφερθέντα ορισμό, προκύπτει ότι προκειμένου να δημιουργηθεί το digital shadow, πρώτα πρέπει να δημιουργηθεί ένα μοντέλο καθοδηγούμενο από δεδομένα. Αυτό είναι μια τεχνική κατά την οποία τα δυναμικά στοιχεία του ψηφιακού μοντέλου εισάγονται στο εικονικό περιβάλλον με βάση δεδομένα που προέρχονται από το φυσικό σύστημα. Η επιλογή να ακολουθηθεί μια καθοδηγούμενη από δεδομένα προσέγγιση μοντελοποίησης αντί μιας στατικής βασίζεται στην γεγονός ότι η πρώτη δεν χρειάζεται χειροκίνητη ενημέρωση του μοντέλου, αλλά γίνεται αυτόματα παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία (Solomatine & Ostfeld, 2008; Janes & Yaffe, 2006).

Τα δεδομένα πηγάζουν από πίνακες που περιέχουν τις πληροφορίες που σχετίζονται με φυσικά στοιχεία του εργαστηρίου Logistics, δηλαδή τα χαρακτηριστικά των διαφόρων container, τις συντεταγμένες και τις διαστάσεις των θέσεων αποθήκευσης και τις παραμέτρους της μηχανής AS/RS. Παρά την αμετάβλητη φύση αυτών των δεδομένων, έχουν εισαχθεί σε εξωτερικούς πίνακες για να απλοποιηθεί η διαδικασία ενημέρωσης του ψηφιακού μοντέλου σε περίπτωση που επέλθει αλλαγή στο φυσικό σύστημα. Η δεύτερη πηγή αποτελείται από πίνακες που περιέχουν δυναμικά και λειτουργικά δεδομένα που αλλάζουν από προσομοίωση σε προσομοίωση, δηλαδή τη θέση κάθε container μέσα στο εργαστήριο, το επίπεδο αποθέματος για κάθε προϊόν και η λίστα των παραγγελιών που πρέπει να εκτελεστούν. Η σύνδεση μεταξύ του ψηφιακού μοντέλου με αυτό το είδος των πληροφοριών επιτρέπει την ανάκτηση δεδομένων και ανανέωση τους σε πραγματικό χρόνο με την βοήθεια του προγράμματος της Anylogic. (Ferrari, et al., 2022)

5.4.1.3 Αποτελέσματα μελέτης περίπτωσης

Το ψηφιακό μοντέλο επικυρώθηκε προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία του στην αναπαραγωγή της λειτουργίας και της απόδοσης του πραγματικού συστήματος. Ειδικότερα, αναλύθηκε η διαδικασία αποθήκευσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο αναπαριστά με πολύ μεγάλη ακρίβεια την απόδοση του πραγματικού συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, κατά μέσο όρο το μοντέλο έχει απόκλιση 1.38% στον υπολογισμό του συνολικού χρόνου αποθήκευσης. Το προτεινόμενο Digital Twin βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη και οι μελλοντικές βελτιώσεις θα αποσκοπούν στην ενίσχυση της υφιστάμενης φυσικής υποδομής και της υποδομής IT, καθώς και στην περαιτέρω ανάπτυξη του πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ του Ψηφιακού Διδύμου και του φυσικού συστήματος.

5.5 Μεταφορές & Διανομή

5.5.1. Διαχείριση μεταφορών

Τα ψηφιακά δίδυμα προσφέρουν άνευ προηγουμένου ορατότητα στην πρόοδο των προϊόντων ή του φορτίου, καθώς κινούνται κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού. Έχοντας πρόσβαση σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την τοποθεσία, τις συνθήκες και την κατάσταση του προϊόντος, οι επιχειρήσεις μπορούν να εντοπίσουν πιθανά εμπόδια και να τα διορθώσουν. Μια κοινή εφαρμογή είναι η χρησιμοποίηση ενός ψηφιακού διδύμου για να παρακολουθείται η θερμοκρασία και η υγρασία ενός ευπαθούς φορτίου, διασφαλίζοντας έτσι ότι μεταφέρεται σε βέλτιστες συνθήκες.

Η δυνατότητα βελτιστοποίησης διαδρομής αλλάζει το παιχνίδι, καθώς τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν την επιλογή της πιο γρήγορης διαδρομής βάσει δεδομένων κίνησης σε πραγματικό χρόνο. Το ψηφιακό δίδυμο είναι έτσι μια εξέλιξη του GPS που όχι μόνο καθοδηγεί, αλλά βρίσκει και την βέλτιστη διαδρομή ανά πάσα στιγμή, διασφαλίζοντας ότι οι παραδόσεις είναι αποδοτικές και η κατανάλωση καυσίμου χαμηλότερη.

5.5.2 Διαχείριση Στόλου

Η διαχείριση στόλου αποτελεί κρίσιμο στοιχείο πολλών επιχειρήσεων και οι εταιρείες χρησιμοποιούν το Ψηφιακό Δίδυμο για να βελτιστοποιήσουν τις λειτουργίες του στόλου τους. Δημιουργώντας μια εικονική αναπαράσταση ενός στόλου, οι εταιρείες μπορούν να παρακολουθούν την απόδοσή του, να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα και να διαχειρίζονται προληπτικά τον στόλο σε πραγματικό χρόνο.

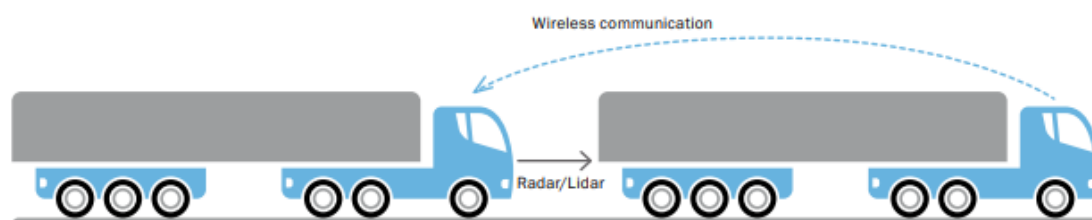
Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της συλλογής δεδομένων από το στόλο, όπως τοποθεσία, κατανάλωση καυσίμου και ανάγκες συντήρησης. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της απόδοσης μεμονωμένων οχημάτων και τον εντοπισμό τάσεων στην απόδοσή τους. Οι εταιρείες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν αυτά τα δεδομένα για να βελτιστοποιήσουν τις λειτουργίες του στόλου τους τόσο για την αποτελεσματικότητα τους αλλά και την εξοικονόμηση κόστους. Βοηθά στον στρατηγικό σχεδιασμό, όπως τη στάθμιση επιλογών, όπως για παράδειγμα επιλογή ταχύτερων διαδρομών μέσω αεροπλάνων αλλά και πιο οικονομικών επιλογών μέσω πλοίων. Επιπλέον, αυτή η προηγμένη μοντελοποίηση μπορεί να εντοπίσει κοινές ελλείψεις και διαταραχές της αλυσίδας εφοδιασμού, αποκαλύπτοντας τάσεις που μπορεί να είχαν παραβλεφθεί από τον ανθρώπινο παράγοντα. (Burak, 2023). Για παράδειγμα, η FedEx χρησιμοποιεί ψηφιακά δίδυμα για να χαρτογραφήσει τις καλύτερες διαδρομές για τα φορτηγά της και να παρακολουθεί τις αποστολές όλο το εικοσιτετράωρο.

Εκτός από την παρακολούθηση της απόδοσης του στόλου, το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για προγνωστικές αναλύσεις. Οι εταιρείες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα που συλλέγονται για να προβλέψουν πιθανές ζημιές των οχημάτων και να λάβουν προληπτικά μέτρα για την αντιμετώπισή τους. Αυτό βοηθά τις επιχειρήσεις να μειώσουν τις πιθανότητες δαπανηρών βλαβών, καθώς και να βελτιώσουν τη συνολική διαχείριση τους.

Τα στελέχη των Logistics με τη βοήθεια του Ψηφιακού Διδύμου έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώσουν τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι παραδόσεις, λαμβάνοντας αποφάσεις που βασίζονται σε δεδομένα αντί να βασίζονται σε συναισθήματα και προσωπικές εκτιμήσεις. Αυτό συνδράμει ιδιαίτερα στις περιπτώσεις των φορτωτών και μεταφορών εφοδιαστικής ψυχρής αλυσίδας που εξαρτώνται από την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς. (Burak, 2023)

5.5.2.1. Truck platooning

Υπάρχουν πολλές πρωτοβουλίες, ερευνητικές δραστηριότητες και μελέτες για τη δημιουργία διμοιρίας φορτηγών σε όλο τον κόσμο, με καθοδήγηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση, διάφορες κυβερνήσεις αλλά και τον κλάδο της εφοδιαστικής. Η διμοιρία φορτηγών είναι η σύνδεση δύο ή περισσότερων φορτηγών σε συνοδείες, χρησιμοποιώντας αυτοματοποιημένα συστήματα υποστήριξης οδήγησης. Αυτά τα οχήματα διατηρούν αυτόματα μια κοντινή απόσταση μεταξύ τους όταν συνδέονται για ορισμένα μέρη μιας διαδρομής. Το φορτηγό στην κεφαλή της διμοιρίας ενεργεί ως αρχηγός, με τα οχήματα πίσω να αντιδρούν και να προσαρμόζονται στις αλλαγές στην κίνησή του, π.χ. επιτάχυνση ή φρενάρισμα. Οι οδηγοί των συρόμενων οχημάτων παραμένουν υπό τον έλεγχο του οχήματός τους, ώστε να μπορούν να εγκαταλείψουν τη διμοιρία και να οδηγήσουν ανεξάρτητα. (ACEA, 2016)



Εικόνα 5.13 Truck Platooning (Janssen, et al., 2015)

Η δημιουργία διμοιρίας φορτηγών έχει μεγάλες δυνατότητες μείωσης του κόστους μεταφοράς, μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου λόγω της βελτιωμένης αεροδυναμικής από τη μειωμένη αντίσταση του αέρα, εξαλείφοντας την ανάγκη για προσεκτικό οδηγό στο δεύτερο όχημα και καλύτερη χρήση των στοιχείων του φορτηγού, με βελτιστοποίηση των χρόνων οδήγησης και ελαχιστοποίηση περιόδου αδράνειας. (Neubauer & Schildorfer, 2022) Σε κοινωνικό επίπεδο, η ασφάλεια στην οδήγηση αυξάνεται καθώς συνήθως το 90% όλων των ατυχημάτων προκαλούνται από τον άνθρωπο και η τεχνολογία truck platooning αποτρέπει ανθρώπινα λάθη, οδηγώντας σε λιγότερα ατυχήματα και ζημιές. Τέλος, οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και της ποιότητας του αέρα μειώνονται και η κυκλοφοριακή συμφόρηση μειώνονται. (Thonhofer, et al., 2022)

Γενικά, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού και της δρομολόγησης του στόλου. Οι εταιρείες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα που συλλέγονται για να δημιουργήσουν βελτιστοποιημένες διαδρομές για τα οχήματά τους και να προγραμματίσουν εργασίες συντήρησης για να εξασφαλίσουν ότι θα ολοκληρωθούν έγκαιρα. Τέλος με τη χρήση τεχνολογιών όπως το truck platooning, οι εταιρείες

μπορούν να εξοικονομήσουν από το υψηλό κόστος των καυσίμων και να μειώσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

5.5.2.2. Μελέτη Περίπτωσης Truck Platooning

Το Μάρτιο του 2022, ολοκληρώθηκε το ευρωπαϊκό project ENSEMBLE το οποίο διήρκησε για 4 χρόνια και συμμετείχαν 19 εταίροι όπως κατασκευαστές φορτηγών, προμηθευτές, η Ευρωπαϊκή ένωση Προμηθευτών Αυτοκινήτων καθώς και ερευνητικοί εταίροι. Το project υλοποιήθηκε με κόστος 20 εκατ. Ευρώ με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Ένωσης. (Connected Automated Driving, 2022)

Στο project ENSEMBLE, με επικεφαλής την TNO, όλοι οι ευρωπαϊκοί κατασκευαστές φορτηγών, DAF, Daimler Trucks, Iveco, Man trucks & bus, Renault trucks, Scania και Volvo trucks, συνεργάστηκαν για να ευθυγραμμίσουν την τεχνολογία platooning για να «μιλούν την ίδια γλώσσα». Δίπλα στους κατασκευαστές, συμμετείχαν οι προμηθευτές Bosch, Continental, ZF, NXP, Brembo και η Ευρωπαϊκή Ένωση Προμηθευτών Αυτοκινήτων (CLEPA).

Οι ερευνητικοί εταίροι IDIADA, Université Gustave Eiffel, KTH και Vrije Universiteit Brussel επέβλεψαν τις δοκιμές και ερεύνησαν τις διαφορετικές επιπτώσεις της ομαδοποίησης, π.χ. στις αντιδράσεις άλλων χρηστών του δρόμου, στην κυκλοφορία, στο οδικό φορτίο κ.λπ. Η ERTICO, διοργανωτής του ITS Europe, έκανε τη σύνδεση με τη Κοινότητα Platooning.

Το έργο ENSEMBLE όρισε δύο λειτουργίες platooning: Τη Διμοιρία ως Λειτουργία Υποστήριξης (Platooning as a Support Function - PSF) και Διμοιρία ως Αυτόνομη Λειτουργία (Platooning as an Autonomous Function - PAF). Η πρώτη λειτουργία, το PSF, μπορεί να αναπτυχθεί πιο γρήγορα. Είναι μια λειτουργία υποστήριξης οδηγού παρόμοια με το Adaptive Cruise Control (ACC), καθώς ρυθμίζει την απόσταση από το προπορευόμενο όχημα. Με τη χρήση της επικοινωνίας V2V (Vehicle 2 Vehicle), το PSF είναι ασφαλέστερο, καθώς η απότομη χρήση των φρένων εντοπίζονται ταχύτερα από ό,τι χρησιμοποιώντας συμβατικούς, ενσωματωμένους αισθητήρες, όπως π.χ. ραντάρ ή κάμερα. Επιπλέον, τα κύματα πέδησης μπορούν να μετριαστούν για να βελτιστοποιηθεί η απόδοση της κυκλοφορίας.

Το PAF προβλέπει έναν οδηγό στο πρώτο φορτηγό που ακολουθείται από το πολύ δύο φορτηγά με τον οδηγό εκτός βρόχου, που ταξιδεύουν από κόμβο σε κόμβο. Σε αυτήν την περίπτωση, η συνδεσιμότητα V2V μεταξύ των φορτηγών λειτουργεί ως ενεργοποιητής που επιτρέπει την αυτοματοποίηση των ακόλουθων οχημάτων. Το PAF τοποθετείται μεταξύ μιας λειτουργίας υποστήριξης και ενός πλήρως αυτόνομου φορτηγού.

Και για τις δύο λειτουργίες, ορίστηκαν περιπτώσεις χρήσης, προδιαγραφές και απαιτήσεις. Αυτό περιλαμβάνει το πρωτόκολλο επικοινωνίας V2V, ένα από τα κύρια αποτελέσματα του έργου. Καθορίζει όχι μόνο τα απαιτούμενα στοιχεία δεδομένων, αλλά και πότε και πώς αυτά πρέπει να διαβιβάζονται. Επιπρόσθετα, έχει προταθεί και δοκιμαστεί επιτυχώς ένα πλαίσιο ασφαλείας για την επικοινωνία που βασίζεται στο

υπάρχον PKI (Public Key Infrastructure) του ITS-G5 και πρόσθετη συμμετρική και ασύμμετρη κρυπτογράφηση.

Οι πρώτες συνεδρίες δοκιμών πραγματοποιήθηκαν σε μικρότερες ομάδες των δύο έως τεσσάρων φορητών από διαφορετικούς συνεργάτες. Οι διαφορετικές υλοποιήσεις των εταιρών δοκιμάστηκαν τόσο σε τροχιά όσο και σε δημόσιος δρόμος. Τα ακόλουθα συμπεράσματα προέκυψαν με βάση τα αποτελέσματα των διαφορετικών αξιολογήσεων επιπτώσεων που πραγματοποιήθηκαν στο έργο:

- Στην τρέχουσα οδική κατάσταση, τουλάχιστον το 15% όλων των φορητών θα μπορούσαν ήδη να επωφεληθούν από τη δημιουργία διμοιρίας χωρίς να χρειάζεται να αλλάξουν τη συμπεριφορά τους. Τα φορητά μπορούν να βρουν το ένα το άλλο χρησιμοποιώντας μια υπηρεσία αντιστοίχισης διμοιρίας.
- Η θετική επίδραση της διμοιρίας φορητών στη χωρητικότητα του δρόμου αυξάνεται όταν το ποσοστό των φορητών στη συνολική ροή κυκλοφορίας είναι υψηλό (περίπου 20%). Ωστόσο, αρνητικές επιπτώσεις στην οδική χωρητικότητα διαπιστώθηκαν σε περιοχές συγχώνευσης, όταν η συγχωνευμένη κυκλοφορία εισέρχεται στην κύρια κυκλοφορία με χαμηλότερη ταχύτητα. αυτός ο αρνητικός αντίκτυπος είναι υψηλότερος για μικρότερα χρονικά διαστήματα.
- Αυξάνεται η ασφάλεια της κυκλοφορίας, η άνεση του οδηγού και η οδική χωρητικότητα.
- Αναμένονται πιθανές μειώσεις στην κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές ρύπων, αλλά αυτό απαιτεί περαιτέρω δοκιμές υπό συνθήκες που αντιπροσωπεύουν πραγματικές λειτουργίες υλικοτεχνικής υποστήριξης.

5.6. Επιστροφές (Αντίστροφη Εφοδιαστική)

Εάν τα logistics περιγράφουν πώς τα προϊόντα κινούνται μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού από τις αποθήκες στους καταναλωτές, τότε η αντίστροφη εφοδιαστική περιγράφει πώς κινούνται τα πράγματα προς την αντίθετη κατεύθυνση. Με άλλα λόγια, ασχολείται με προϊόντα που επιστρέφουν από τον πελάτη στον προμηθευτή για διάφορους λόγους, όπως:

- Σπασμένα ή κατεστραμμένα προϊόντα
- Λάθη που έγιναν στην εκπλήρωση της παραγγελίας
- Αλλαγή γνώμης του πελάτη
- Ανακλήσεις προϊόντων
- Προγράμματα ανακύκλωσης ή ανταλλαγής προϊόντων

Η διαδικασία αντίστροφης εφοδιαστικής λειτουργεί με την εξουσιοδότηση επιστροφής προϊόντος, την αξιολόγηση της κατάστασης του προϊόντος κατά την παραλαβή, την ανάκτηση οποιασδήποτε αξίας προϊόντος (προσθήκη στο απόθεμα, πώληση με έκπτωση κ.λπ.) και την έγκριση τυχόν επιστροφών χρημάτων στον πελάτη.

Σύμφωνα με την (Grand View Research, 2021), η αγορά αντίστροφης εφοδιαστικής κοστίζει περίπου 840,7 δισεκατομμύρια δολάρια το 2021. Από το 2022 έως το 2028, ο

αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί κατά τον σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR), δηλαδή περίπου 12,4%.

Η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση μεταξύ των εταιρειών για τα οφέλη της αντίστροφης εφοδιαστικής θα συνεχίσει να τροφοδοτεί την ανάπτυξη και την καινοτομία σε αυτόν τον τομέα. Οι τεχνολογικές λύσεις που βελτιώνουν την αποδοτικότητα στην αλυσίδα εφοδιασμού μπορούν να βοηθήσουν στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών και της αποτελεσματικότητας της αντίστροφης εφοδιαστικής. (NewcastleSystems, 2023) Παρακάτω διαφαίνονται τεχνολογίες Ψηφιακού Διδύμου που μπορούν να βελτιστοποιήσουν την Αντίστροφη Εφοδιαστική.

5.6.1 RFID στην Αντίστροφη Εφοδιαστική

Το RFID είναι μια τεχνολογία που αρχίζει να αντικαθιστά τους παραδοσιακούς γραμμωτούς κώδικες. Σε αντίθεση με τους γραμμωτούς κώδικες, οι οποίοι πρέπει να διαβάζονται μεμονωμένα και παρέχουν περιορισμένα δεδομένα, οι ετικέτες RFID μπορούν να διαβαστούν αυτόματα όσο τα προϊόντα κινούνται προς οποιαδήποτε κατεύθυνση. Μπορούν επίσης να επικοινωνούν πιο ολοκληρωμένα δεδομένα, όπως περιγραφές προϊόντων, ημερομηνίες, θερμοκρασία και άλλα. Η χρήση RFID μπορεί να απλοποιήσει τη διαδικασία αντίστροφης εφοδιαστικής και να εξοικονομήσει κόστος. Παρέχει επίσης καλύτερη εμπειρία πελάτη, καθώς οι καταναλωτές θέλουν να μπορούν να παρακολουθούν τις αγορές και τις επιστροφές τους σε πραγματικό χρόνο.

5.6.2 Blockchain στην Αντίστροφη Εφοδιαστική

Η τεχνολογία Blockchain αποτελεί ένα διαφανές και ασφαλές μέσο παρακολούθησης της κυκλοφορίας των επιστρεφόμενων προϊόντων και δίνει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται καλύτερα τις επιστροφές και τις διαδικασίες ανακύκλωσης ή απόρριψής τους.

Πολλές επιχειρήσεις δεν έχουν ακόμη υιοθετήσει το blockchain. Αλλά αυτό θα μπορούσε να αλλάξει καθώς τα οφέλη αυτής της τεχνολογίας γίνονται πιο ξεκάθαρα. Αυτά περιλαμβάνουν: (Gonzalez, 2023)

- Βελτιωμένη ιχνηλασιμότητα: Οι επιχειρήσεις μπορούν να δημιουργήσουν ψηφιακά ιστορικά στοιχεία για κάθε προϊόν και να δείξουν την κίνησή τους μέσα στην αλυσίδα εφοδιασμού. Η τεχνολογία Blockchain μπορεί επίσης να βελτιώσει την ιχνηλασιμότητα στη διαδικασία αντίστροφης εφοδιαστικής ως εξής:
 - Παρακολούθηση επιστροφών: Όταν ένα προϊόν επιστρέφεται, μπορεί να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί το ιστορικό του και αν είναι κατάλληλο για μεταπώληση ή επαναχρησιμοποίηση. Δημιουργώντας ένα ψηφιακό αρχείο της κίνησης του προϊόντος μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού, η τεχνολογία blockchain μπορεί να βοηθήσει τις επιχειρήσεις να παρακολουθούν το ιστορικό ενός επιστρεφόμενου προϊόντος και να προσδιορίσουν την κατάστασή του.
 - Εντοπισμός σημείων συμφόρησης: Παρακολουθώντας την κίνηση των επιστρεφόμενων προϊόντων μέσω της διαδικασίας αντίστροφης εφοδιαστικής, οι επιχειρήσεις μπορούν να εντοπίσουν σημεία

συμφόρησης ή την όποια αναποτελεσματικότητα στη διαδικασία. Για παράδειγμα, εάν ένα υψηλό ποσοστό επιστρεφόμενων προϊόντων παρακρατείται σε ένα συγκεκριμένο στάδιο της διαδικασίας, αυτό θα μπορούσε να υποδηλώνει ένα πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί.

- **Αυξημένη αποτελεσματικότητα:** Χρησιμοποιώντας την τεχνολογία blockchain για την αυτοματοποίηση ορισμένων τμημάτων της διαδικασίας αντίστροφης εφοδιαστικής, μειώνεται ο χρόνος και το κόστος διαχείρισης των επιστροφών.
- **Βελτιωμένη χρήση περιουσιακών στοιχείων:** Το Blockchain μπορεί να επιτρέψει την επαναχρησιμοποίηση των επιστρεφόμενων προϊόντων, το οποίο μειώνει τις απώλειες και ενισχύει τη χρήση των περιουσιακών στοιχείων.
- **Καλύτερη διαφάνεια:** Επειδή το blockchain δημιουργεί ένα αποκεντρωμένο, διαφανές αρχείο συναλλαγών, διευκολύνεται η παρακολούθηση της κίνησης των προϊόντων μέσω της διαδικασίας αντίστροφης εφοδιαστικής.

Συνολικά, η χρήση της τεχνολογίας blockchain στην αντίστροφη εφοδιαστική έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα και τη διαφάνεια της διαδικασίας, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους για τις επιχειρήσεις και σε μια πιο βιώσιμη αλυσίδα εφοδιασμού.

5.6.3 Εστίαση στην πρόβλεψη ζήτησης βάσει δεδομένων

Εκτός από τη χρήση του RFID και το blockchain στον τομέα των επιστροφών, προαπαιτούμενο είναι η υιοθέτηση λύσεων ψηφιακής τεχνολογίας σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Λύσεις όπως ένα σύστημα διαχείρισης αποθήκης που αναφέρθηκε σε προηγούμενη υποενότητα μπορεί να βοηθήσει μια επιχείρηση να αυτοματοποιήσει τις διαδικασίες της και να δώσει περισσότερη ορατότητα σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.

Η βελτιωμένη διαφάνεια επιτρέπει στις επιχειρήσεις να προσαρμόζονται γρήγορα στις αλλαγές και να βελτιστοποιούν το κόστος. Εάν ένα μεγάλο ποσοστό ορισμένων προϊόντων επιστρέφεται λόγω ελαττωμάτων ή κάποιου άλλου ζητήματος, αυτό είναι κάτι που μπορεί να αντιμετωπίσει η επιχείρηση. Η χρήση ενός συστήματος διαχείρισης αποθεμάτων στο μέγιστο των δυνατοτήτων του μπορεί να εξοικονομήσει ώρες εργασίας και να μειώσει το κόστος μεταφοράς αποθεμάτων.

5.7 Προληπτική συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση επικεντρώνεται στην πρόβλεψη της χρονικής στιγμής που πρέπει να προγραμματιστεί η συντήρηση για ένα εξάρτημα ή εξοπλισμό ή σύστημα για να επιτευχθεί αύξηση του χρόνου λειτουργίας του μηχανήματος και ταυτόχρονη μείωση του κόστους (Attaran & Bilge, 2023). Τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να μοντελοποιήσουν τον εξοπλισμό ή ολόκληρες διαδικασίες παραγωγής για να εντοπίσουν αποκλίσεις που υποδεικνύουν την ανάγκη για προληπτική επισκευή ή συντήρηση. Ο στόχος είναι να εκτιμηθεί, να ανιχνευτεί ή να διαγνωστεί η τρέχουσα κατάσταση ενός εξαρτήματος ή εξοπλισμού ή ενός ολόκληρου συστήματος παραγωγής πιο έγκαιρα και πιο αποτελεσματικά. Αυτό θα αποτρέψει την βλάβη πριν αυτή παρουσιαστεί, η οποία είναι αρκετά δαπανηρή για μια επιχείρηση.

5.8 Διαλειτουργική συνεργασία

Τα Digital Twin χρησιμοποιούνται συχνά για τη συλλογή επιχειρησιακών δεδομένων σε μία χρονική περίοδο. Αυτά τα δεδομένα παρέχουν πληροφορίες για την απόδοση του προϊόντος, τη διανομή και την εμπειρία του τελικού καταναλωτή και μπορούν να κοινοποιηθούν στην μηχανική (engineering), την παραγωγή, τις πωλήσεις και το μάρκετινγκ. Οι εργαζόμενοι σε όλους τους κλάδους μπορούν όλοι να χρησιμοποιήσουν τα ίδια δεδομένα για να λάβουν πιο έγκυρες αποφάσεις. (Eklahare, 2022)

5.9 Κατανομή πόρων και logistics

Στον βιομηχανικό κλάδο, η περιττή μετακίνηση και διαχείριση υλικών, εξοπλισμού και εργασίας μπορεί να είναι σημαντικές πηγές απωλειών. Τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να βοηθήσουν στη μείωση αυτών των απωλειών, επιτρέποντας μια λιτή προσέγγιση στη διαχείριση των πόρων. Λύσεις που παρέχει το Ψηφιακό Δίδυμο περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της κατανομής των πόρων σε πραγματικό χρόνο και την παρακολούθηση των απωλειών της επιχείρησης, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα της διαδικασίας παραγωγής. Ένα παράδειγμα χρήσης του Digital Twin για την παρακολούθηση της προόδου της παραγωγής, είναι η ενσωμάτωση δεδομένων αισθητήρων από εξοπλισμό και οχήματα. Αυτό μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την τοποθεσία και τη χρήση των περιουσιακών στοιχείων της επιχείρησης σε πραγματικό χρόνο και να βοηθήσει στον εντοπισμό πιθανών σημείων συμφόρησης ή αναποτελεσματικότητας. Αυτά τα οφέλη του Digital Twin θα βοηθούσαν τον βιομηχανικό κλάδο να αποφύγει την υπερκατανομή των πόρων και να βελτιώσει τη διαχείριση του χρόνου (Attaran & Bilge, 2023).

5.10 Βοηθητικά συστήματα (utilities)

Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σημερινών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθιστά την ψηφιοποίηση των ενεργειακών πόρων ένα από τα πιο πολυσυζητημένα θέματα στον ενεργειακό τομέα. Η τεχνολογία του Digital Twin μπορεί να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση περιουσιακών στοιχείων. Μπορεί να εφαρμοστεί σε ολόκληρο τον ενεργειακό τομέα για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων όσον αφορά τη συντήρηση, τον προγραμματισμό παραγωγής, την αποδοτικότητα των εγκαταστάσεων και τον μετριασμό του ρίσκου. Μια πρόσφατη μελέτη πρότεινε ένα ψηφιακό ηλεκτρικό δίκτυο βασισμένο στην τεχνολογία του Digital Twin που μπορεί να ψηφιοποιήσει ολόκληρη τη διαδικασία, όλα τα στοιχεία και όλες τις υπηρεσίες του πραγματικού ηλεκτρικού δικτύου, όπως ανθρώπινα και φυσικά συμβάντα (Francisco, et al., 2020). Η λύση ψηφιακού ηλεκτρικού δικτύου μπορεί επίσης να βοηθήσει τη διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής, διαχείρισης και εξυπηρέτησης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Pargmann, et al., 2018). Ως εκ τούτου, επηρεάζει σημαντικά τη βελτίωση της απόδοσης των ενεργειακών πόρων του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και την κατανομή των πόρων πληροφορίας.

5.11 Σύνοψη κεφαλαίου

Έχει σημειωθεί αντικειμενική πρόοδος από την αρχή της τεχνολογίας του Digital Twin, ωστόσο, οι πρακτικές εφαρμογές και υλοποιήσεις της τεχνολογίας στην εφοδιαστική αλυσίδα κυρίως, παραμένουν αχαρτογράφητες, με πολύ περιορισμένες μελέτες περίπτωσης να έχουν δημοσιοποιηθεί από τις εταιρείες που έχει εφαρμοστεί. Ωστόσο τα αποτελέσματα των μελετών είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά αν αναλογιστούμε ότι στη μελέτη περίπτωσης του εργαστηρίου εφοδιαστικής αλυσίδας του Τορίνο, η απόκλιση του digital twin αποθήκης από το φυσικό σύστημα ήταν της τάξεως του 1%, το οποίο είναι ιδιαίτερα ελπιδοφόρο και για μελλοντικές εφαρμογές.

Ο κλάδος της βιομηχανικής παραγωγής, η οποία θεωρείται πρωτοπόρος στην εφαρμογή ψηφιακού διδύμου, παράγει με την υλοποίηση του, βελτιωμένα προϊόντα μέσω της συλλογής, ανάλυσης και ερμηνείας δεδομένων και της προσαρμογής τους στα παραγόμενα προϊόντα. Οι εφαρμογές Ψηφιακού Διδύμου για κάθε προϊόν μπορούν να υλοποιηθούν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, από τον σχεδιασμό του έως τη διάθεση στην αγορά.

Αυτό αποδεικνύεται και από την μελέτη περίπτωσης της JD.COM η οποία μέσω της πλατφόρμας digital twin που δημιούργησε, αύξησε την ευελιξία της και την αποδοτικότητα της, αφού το digital twin μπόρεσε με μεγάλη ακρίβεια να αποτυπώσει την φυσική αλυσίδα εφοδιασμού και να της προσφέρει γρήγορο χρόνο αντίδρασης στους περιορισμούς που επιβάλλονταν απρόβλεπτα στις μεταφορές, στην παραγωγή και στον τρόπο διάθεσης των παραγγελιών.

Αναφορικά με τον τομέα των μεταφορών, το Ψηφιακό Δίδυμο παρέχει στις επιχειρήσεις ένα ισχυρό εργαλείο για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών του στόλου οχημάτων τους. Συλλέγοντας δεδομένα και χρησιμοποιώντας προγνωστικά αναλυτικά στοιχεία, οι εταιρείες μπορούν να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται την απόδοση του στόλου τους σε πραγματικό χρόνο, εξοικονομώντας πόρους και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Επιπρόσθετα οφέλη των Digital Twin, όπως η απομακρυσμένη παρακολούθηση, η προληπτική συντήρηση και η διαχείριση των λειτουργιών εφοδιαστικής, έχουν γίνει αντιληπτά από τις βιομηχανίες, ιδίως μετά το ξέσπασμα της πανδημίας COVID-19 το 2020.

6. Σύνοψη και συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία επιχείρησε να καταγράψει και αναλύσει την έννοια του Ψηφιακού Διδύμου μέσω της μεθοδολογίας της βιβλιογραφικής επισκόπησης. Στα πλαίσια αυτής της ανάλυσης, έγινε λόγος για τις επιμέρους τεχνολογίες που το απαρτίζουν, την ανάλυση των μέχρι τώρα εφαρμογών του Ψηφιακού Διδύμου σε όλη την Εφοδιαστική Αλυσίδα, την καταγραφή των γνωστών αλλά και πιθανών οφελών που μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση του καθώς και ποιες προκλήσεις είναι πιθανό να εμφανιστούν στο δρόμο για την εφαρμογή του. Σε αυτή τη Σύνοψη θα γίνει λόγος για την εφαρμογή του Ψηφιακού Διδύμου στην εφοδιαστική αλυσίδα, δίνοντας έμφαση στα πλεονεκτήματα και τις ευκαιρίες του. Στη συνέχεια θα καταγραφούν βασικά συμπεράσματα, δίνοντας έμφαση στα οφέλη των εφαρμογών, τις κύριες προκλήσεις αλλά και το μέλλον που προδιαγράφεται.

6.2 Βασικά ευρήματα και συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια, η εμφάνιση προηγμένων τεχνολογιών έχει φέρει επανάσταση στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, η οποία έχει καταστεί κρίσιμο στοιχείο για τις επιχειρήσεις ώστε να παραμείνουν ανταγωνιστικές και αποτελεσματικές. Μία από τις πιο ελπιδοφόρες καινοτομίες στην αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης είναι η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου, ή αλλιώς, "Digital Twin". Ένα ψηφιακό δίδυμο αναφέρεται σε ένα εικονικό αντίγραφο ενός φυσικού συστήματος, διαδικασίας ή περιουσιακού στοιχείου. Το Ψηφιακό Δίδυμο παρέχει στις επιχειρήσεις τη δυνατότητα να αποκτήσουν πολύτιμες γνώσεις, να βελτιστοποιήσουν τις διαδικασίες και να προβλέψουν πιθανά ρίσκα.

Η ιδέα του Ψηφιακού Διδύμου περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου ενός φυσικού συστήματος, σε πραγματικό χρόνο. Ενσωματώνοντας δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως συσκευές Internet of Things (IoT), αισθητήρες, επαυξημένη πραγματικότητα και ιστορικά στοιχεία, τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να αντικατοπτρίζουν και να προσομοιώνουν ολόκληρη τη διαδικασία της εφοδιαστικής αλυσίδας, από την προμήθεια των πρώτων υλών έως την παράδοση του τελικού προϊόντος στον πελάτη. Αυτή η εικονική αναπαράσταση επιτρέπει στις εταιρείες να αποκτήσουν απaráμιλλη ορατότητα και σφαιρική γνώση σχετικά με τη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας, ενισχύοντας έτσι την βέλτιστη λήψη αποφάσεων και επίλυση προβλημάτων.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης ενισχύει τις δυνατότητές του. Με τη χρήση του ψηφιακού διδύμου, τα ενδιαφερόμενα μέρη της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορούν να προσομοιώσουν διάφορα σενάρια, επιτρέποντάς τους να προβλέπουν τη ζήτηση, να εντοπίζουν ανεπάρκειες, πιθανά σημεία συμφόρησης και να βελτιστοποιούν τα επίπεδα αποθεμάτων. Αυτές οι προσομοιώσεις βοηθούν στον σχεδιασμό ευέλικτων και ανταποκρινόμενων στρατηγικών, στον μετριασμό των κινδύνων και στη

βελτίωση της συνολικής απόδοσης. Δε θα πρέπει να παραλείψουμε ότι επίσης επιτυγχάνουν μειωμένα κόστη αλλά και αυξημένη ικανοποίηση των πελατών.

Τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν επίσης να υλοποιηθούν σενάρια και προσομοιώσεις what-if, για να δοκιμάσουν τα στελέχη διάφορες στρατηγικές και να έχουν έτοιμες απαντήσεις σε πιθανές διαταραχές. Εντοπίζοντας τρωτά σημεία και αναπτύσσοντας σχέδια έκτακτης ανάγκης, οι επιχειρήσεις μπορούν να αναπτύξουν ανθεκτικότητα στις λειτουργίες της αλυσίδας εφοδιασμού τους, μετριάζοντας τον αντίκτυπο απροσδόκητων γεγονότων όπως φυσικές καταστροφές, η πανδημία COVID-19 αλλαγές στην αγορά ή ζητήματα προμηθευτών.

Επιπλέον, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να παρέχει προγνωστικές αναλύσεις, βοηθώντας στην προληπτική συντήρηση μηχανημάτων και εξοπλισμού, ελαχιστοποιώντας το χρόνο διακοπής λειτουργίας και μειώνοντας το κόστος συντήρησης. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε βελτιωμένη χρήση περιουσιακών στοιχείων και σε παρατεταμένους κύκλους ζωής.

Εκτός από τα λειτουργικά οφέλη, τα ψηφιακά δίδυμα ενθαρρύνουν τη συνεργασία και τον συντονισμό μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η τεχνολογία διευκολύνει την ανταλλαγή δεδομένων και την επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την απρόσκοπτη συνεργασία μεταξύ προμηθευτών, κατασκευαστών, διανομέων και εμπόρων λιανικής. Ως αποτέλεσμα, οι συνεργάτες στην εφοδιαστική αλυσίδα μπορούν να εργαστούν συνεκτικά, μειώνοντας τους χρόνους παράδοσης και επιταχύνοντας την παράδοση προϊόντων στους πελάτες.

Τα οφέλη από την εφαρμογή ενός ψηφιακού δίδυμου στην αλυσίδα εφοδιασμού εκτείνονται πέρα από τη βελτίωση της λειτουργικής απόδοσης. Συμβάλλει στις προσπάθειες βιωσιμότητας, βελτιστοποιώντας τις διαδρομές μεταφοράς, μειώνοντας τα αποτυπώματα άνθρακα και ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα σε όλη την αλυσίδα αξίας.

Ωστόσο, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ανάπτυξη ενός ψηφιακού δίδυμου. Η ασφάλεια και το απόρρητο των δεδομένων αποτελούν βασικά ζητήματα κατά την εφαρμογή του ψηφιακού δίδυμου στην αλυσίδα εφοδιασμού. Πρέπει να υπάρχουν ισχυρά μέτρα κυβερνοασφάλειας και πρωτόκολλα κρυπτογράφησης για την προστασία ευαίσθητων δεδομένων και την προστασία της αλυσίδας εφοδιασμού από πιθανές απειλές στον κυβερνοχώρο. Αναδεικνύεται παράλληλα και η ανάγκη για εκπαίδευση και εξειδίκευση του προσωπικού και των στελεχών που κάνουν χρήση του Digital Twin, προκειμένου να ερμηνεύουν και να ενεργούν συνετά βάσει των τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που παράγονται.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή ενός ψηφιακού δίδυμου στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας προσφέρει μια άνευ προηγουμένου ευκαιρία να επαναπροσδιορίσουμε και να φέρουμε επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι επιχειρήσεις διαχειρίζονται τις δραστηριότητές τους. Αξιοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, δυνατότητες προσομοίωσης και προγνωστικά αναλυτικά στοιχεία, οι οργανισμοί μπορούν να βελτιστοποιήσουν την αλυσίδα εφοδιασμού τους, να επιτύχουν εξοικονόμηση κόστους, να αυξήσουν την ανθεκτικότητα και να προσφέρουν εξαιρετικές εμπειρίες πελατών. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, η υιοθέτηση του ψηφιακού

δίδυμου θα είναι καθοριστικός παράγοντας για να παραμείνουμε ανθεκτικοί στο σημερινό ανταγωνιστικό και συνεχώς εξελισσόμενο επιχειρηματικό τοπίο.

Η εφαρμογή ενός ψηφιακού δίδυμου χρειάζεται ως βάση ένα δομημένο περιβάλλον και προϋποθέτει αρκετές βασικές απαιτήσεις. Πρώτον, χρειάζεται να επενδυθούν αρκετοί πόροι στην απόκτηση της απαραίτητης δομής τεχνολογίας για την απόκτηση δεδομένων (Αισθητήρες, κάμερες, ειδικό λογισμικό καταγραφής, cloud services κλπ). Αυτό πρακτικά σημαίνει πως θα πρέπει να δαπανηθεί αρκετό κεφάλαιο εξ αρχής για να είναι εφικτή και βιώσιμη η εφαρμογή του ψηφιακού δίδυμου. Δεύτερον, πρέπει να δημιουργηθεί ένα ισχυρό πλαίσιο μοντελοποίησης και προσομοίωσης, το οποίο θα αναπαράγει με ακρίβεια το φυσικό σύστημα, αλλά επίσης θα επιτρέπει την απρόσκοπτη συνδεσιμότητα και διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών και συστημάτων. Επίσης, απαιτούνται ισχυρά μέτρα ασφαλείας ώστε να προστατευθούν ευαίσθητες πληροφορίες και να αποτραπούν απειλές στον κυβερνοχώρο. Επιπλέον, μια φιλική προς τον χρήστη διεπαφή και εργαλεία ανάλυσης είναι αναγκαίες για να επιτρέπουν την αποτελεσματική παρακολούθηση και ανάλυση δεδομένων. Τέλος, μια αφοσιωμένη και καταρτισμένη ομάδα με εξειδίκευση σε τεχνολογίες industry 4.0 όπως το IoT, η τεχνητή νοημοσύνη αλλά και ειδικές γνώσεις για τον τομέα του ψηφιακού δίδυμου, είναι κρίσιμη για την επιτυχή εφαρμογή του.

6.3 Μελλοντικά βήματα

Καθώς τα Ψηφιακά Δίδυμα εφαρμόζονται ολοένα και περισσότερο στις διαδικασίες Εφοδιαστικής Αλυσίδας, υπάρχουν αρκετά πιθανά θέματα μελλοντικής έρευνας που θα μπορούσαν να διερευνηθούν:

- Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας σε ανατρεπτικά περιβάλλοντα: Παρατηρώντας τη σημαντική επίδραση του Ψηφιακού Δίδυμου στην βελτίωση της διαχείρισης του COVID-19, θα μπορούσε να διερευνηθεί πώς η τεχνολογία μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας ενόψει κι άλλων διαταραχών, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η γεωπολιτική αστάθεια, η κλιματική αλλαγή, οι πόλεμοι και οι παγκόσμιες κρίσεις υγείας.
- Ψηφιακά Δίδυμα Αυτομάτησης: Θα μπορούσε να διερευνηθεί η περαιτέρω ενσωμάτωση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης σε ψηφιακά δίδυμα ώστε να φανεί κατά πόσο είναι δυνατή η αυτομάθηση και η αυτόνομη λήψη αποφάσεων, βελτιστοποιώντας έτσι περαιτέρω τις διαδικασίες της εφοδιαστικής αλυσίδας.
- Quantum Digital Twins: Η χρήση κβαντικών υπολογιστών για τη δημιουργία πιο περίπλοκων και ακριβέστερων ψηφιακών δίδυμων μοντέλων, επιτρέπουν δυναμικά μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας.
- Συνεργασία ανθρώπου-μηχανής: Ο ρόλος της ανθρώπινης αλληλεπίδρασης με ψηφιακά δίδυμα είναι κρίσιμος και δε θα πρέπει να αμεληθεί. Θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθεί περαιτέρω πώς οι επαγγελματίες της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορούν να συνεργαστούν αποτελεσματικά με τα ψηφιακά δίδυμα που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη για να βελτιώσουν τη λήψη αποφάσεων.

- Εξατομικευμένες αλυσίδες εφοδιασμού: Τα digital twins μπορούν δυνητικά να επιτρέψουν τη δημιουργία εξατομικευμένων εμπειριών εφοδιαστικής αλυσίδας, επιτρέποντας στους πελάτες να προσαρμόσουν τα χαρακτηριστικά των προϊόντων και τις επιλογές παράδοσης.
- Αειφορία και Πράσινες Εφοδιαστικές Αλυσίδες: Αναφέρθηκε ήδη πως τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν επιφέρουν σχετική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Θα είχε εξαιρετικό ενδιαφέρον να διερευνηθεί σε βάθος πως μπορούν να προωθήσουν τους στόχους βιωσιμότητας μέσω της πιο αποτελεσματικής χρήσης πόρων και μειωμένου αποτυπώματος άνθρακα στις μεταφορές.

Αυτές οι προτάσεις μπορεί να είναι η αρχή μιας νέας έρευνας για το Ψηφιακό Δίδυμο επεκτείνοντας την υπάρχουσα.

Βιβλιογραφία

- ACEA, 2016. *acea.auto*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.acea.auto/fact/what-is-the-european-truck-platooning-challenge/>
- Akbari, M., 2018. Logistics outsourcing: a structured literature review. *Benchmarking*, pp. 1548-1580.
- Arora, R. & Parashar, A., 2013. Secure User Data in Cloud Computing Using Encryption Algorithms. *International Journal of Engineering Research and Applications*, July, pp. 1922-1926.
- Attaran, M. & Attaran, S., 2007. Collaborative supply chain management: The most promising practice for building efficient and sustainable supply chains. *Business Process Management Journal*.
- Attaran, M. & Bilge, G., 2023. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, Ιανουάριος.
- Autiosalo, J., 2018. "Platform for Industrial Internet and Digital Twin Focused Education, Research, and Innovation: Ilmatar the Overhead Crane. Singapore, IEEE 4th World Forum on Internet of Things.
- Autodesk, 2021. *Autodesk Forge*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://forge-digital-twin.autodesk.io/>
[Πρόσβαση 25 Ιούλιος 2021].
- Azangoon, M., Taherkordi, A. & Blech, J., 2020. Digital Twins for Manufacturing Using UML and Behavioral Specifications. *IEEE*, pp. 1035-1038.
- Azure, 2021. *Azure*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://azure.microsoft.com/en-us/services/digital-twins/#customer-stories>
[Πρόσβαση 23 Σεπτέμβριος 2021].
- Ben-Daya, M., Hassini, E. & Bahroun, Z., 2019. Internet of things and supply chain management. *Internet of things and supply chain management*, pp. 4719-4742.
- Blomkvist Y, U. L. L., 2020. *Improving supply chain visibility within logistics by implementing a digital twin: a case study at Scania Logistics*. Στο: *Στοκχόλμη: KTH Institute of Technology*.
- Borschev, A., Braisford, S., Churilov, L. & Dangerfield, B., 2014. Multi-method modelling: AnyLogic. *Discrete-event simulation and system dynamics for management decision making*, pp. 248-279.
- Boschert, S. & Rosen, R., 2016. Digital Twin—The Simulation Aspect. Στο: *Mechatronic Futures*. s.l.:Springer, Cham, pp. 59-74.
- Botin, D., 2023. Review., Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, Μάρτιος.
- Botin, D. και συν., 2022. Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing*, 9 March.

- Bottani, E., Bertolini, M., Rizzi, A. & Romagnoli, G., 2017. Monitoring on-shelf availability, out-of-stock and product freshness through RFID in the fresh food supply chain. *International Journal of RF Technologies*, 10 Ιούνιος, pp. 33-55.
- Boyd, D. & Crawford, K., 2012. CRITICAL QUESTIONS FOR BIG DATA. *Information, Communication & Society*, pp. 662-679.
- Boysen, N. & Stephan, K., 2016. A survey on single crane scheduling in automated storage/retrieval systems. *European Journal of Operational Research*, 254(3), p. 691–704.
- Braglia, M. και συν., 2019. *Using RFID technology and Discrete-Events, Agent-Based simulation tools to build Digital-Twins of large warehouses*. Pisa, Italy, IEEE.
- Bughin, J., Chui, M. & Manyika, J., 2010. Clouds, big data, and smart assets: Ten tech-enabled business trends to watch. *McKinsey Quarterly*, 1 Αύγουστος, pp. 75-86.
- Burak, A., 2023. *Relevant*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: relevant.software
[Πρόσβαση 27 Ιούλιος 2023].
- Camerer, C. F., 2019. *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*. Σικάγο, University of Chicago Press.
- Campos-Ferreira, A. και συν., 2019. *Digital Twin Applications: A review*, Monterrey: Tecnologico de Monterrey, School of Engineering and Science.
- Celebi, M. & Aydin, K., 2016. *Unsupervised Learning Algorithms*. s.l.:Springer.
- Chen, S. και συν., 2020. *A Warehouse Management System with UAV Based on Digital Twin and 5G Technologies*. s.l.:IEEE.
- Coehlo, F., Relvas, S. & Barbosa-Povoa, A., 2021. Simulation-based decision support tool for in-house logistics: the basis for a digital twin. Στο: *Computers & Industrial Engineering*. s.l.:Elsevier, p. 153.
- Connected Automated Driving, 2022. *Platooning becomes a reality in Europe*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.connectedautomateddriving.eu/blog/platooning-becomes-a-reality-in-europe/>
- Conrad, E., Misener, S. & Feldman, J., 2015. Software Development Security (Understanding, Applying, and Enforcing Software Security). Στο: *CISSP Study Guide*. s.l.:Elsevier, pp. 429-477.
- Copacino, W., 2019. Supply chain management: The basics and beyond. *Routledge*.
- Cronrath, C., Aderiani, A. & Lennartson, B., 2019. *Enhancing digital twins through reinforcement learning*. Vancouver, IEEE International Conference on Automation Science and Engineering.
- Defize, D., Bitaraf, K. & Vermeer, N., 2021. *Augmented data management: Beyond the hype*, s.l.: Deloitte Netherlands.
- Demkovich, N., Yablochnikov, E. & Abaev, G., 2018. *Multiscale Modeling and Simulation for Industrial Cyber-Physical Systems*. Saint-Petersburg, Russia, IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS).

- DHL, 2019. *5 Ways Digital Twinning will revolutionize Logistics*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://lot.dhl.com/5-ways-digital-twinning-will-revolutionize-logistics/>
[Πρόσβαση 11 Μάιος 2023].
- DHL, 2019. *DHL*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf>
- DHL, 2021. *Digital Twins*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.dhl.com/global-en/home/insights-and-innovation/thought-leadership/trend-reports/digital-twins-supply-chain.html>
[Πρόσβαση 19 Ιούλιος 2023].
- Donovan, P., Leahy, K., Bruton, K. & O'Sullivan, D., 2015. An industrial big data pipeline for data-driven analytics maintenance applications in large-scale smart manufacturing facilities. *Journal of Big Data*.
- Dos Santos, C. και συν., 2020. A decision support tool for operational planning: a Digital Twin using simulation and forecasting methods. *Present and Future of Production Engineering*.
- Drath, R., 2019. *Sensors as drivers of Industry 4.0*, Πφορτζχάμ: Ernst & Young.
- Dröder, K. και συν., 2018. A machine learning-enhanced digital twin approach for human-robot-collaboration. *Procedia CIRP*, pp. 187-192.
- Eklahare, J., 2022. *How digital twin is transforming the manufacturing industry*, s.l.: s.n.
- Eleftheriou, O. & Anagnostopoulos, C.-N., 2022. *Digital twins: A brief overview of applications, challenges and enabling technologies in the last decade*, s.l.: s.n.
- Ferrari, A., Zenezini, G., Rafele, C. & Carlin, A., 2022. A Roadmap towards an Automated Warehouse Digital Twin: current implementations and future developments. *IFAC-PapersOnLine*, pp. 1899-1905.
- Flumerfelt, S., Schwartz, K., Mavris, D. & Brineco, S., 2019. *Complex Systems Engineering: Theory and Practice*. 1η επιμ. s.l.: American Institute of Aeronautics & Ast..
- Forbes, 2021. *Procurement And Industry 4.0*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2021/03/08/procurement-and-industry-40/>
- Främling, K., Holmström, J., Ala-Risku, T. & Kärkkäinen, M., 2003. *Product Agents for Handling Information about Physical Objects*, Helsinki: Helsinki University of Technology.
- Francisco, A., Mohammadi, N. & Taylor, J., 2020. Smart City Digital Twin–Enabled Energy Management: Toward Real-Time Urban Building Energy Benchmarking. *Journal of Management in Engineering*.
- Gartner, 2019. *Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019*, Orlando: Gartner.
- Gartner, 2021. *Gartner.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/big-data>
[Πρόσβαση 25 Ιούλιος 2021].

- General Electric, 2021. *ge.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.ge.com/research/offering/digital-twin-creation>
[Πρόσβαση 15 Ιούλιος 2021].
- Ge, X. και συν., 2017. Multipath Cooperative Communications Networks for Augmented and Virtual Reality Transmission. *IEEE TRANSACTIONS ON MULTIMEDIA*, 10 Οκτώβριος, pp. 2345-2357.
- Glaessgen, E. & Stargel, D., 2012. *The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force*. Honolulu, Hawaii, 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials .
- Gonzalez, A., 2023. *OnePak*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.onepak.com/blockchain-technology-could-be-the-future-of-reverse-logistics/>
- Grand View Research, 2021. *Grand View Research*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/reverse-logistics-market-report>
[Πρόσβαση 2023].
- Grieves, M., 2009. Back to the Future: Product Lifecycle Management and the. Στο: M. Tomovic & S. Wang, επιμ. *Product Realization: A Comprehensive Approach*. New York: Springer, pp. 39-52.
- Grieves, M., 2015. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. Μάρτιος, pp. 1-7.
- Grieves, M., 2015. *Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication*, s.l.: s.n.
- Grieves, M. & Vickers, J., 2017. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, pp. 85-113.
- Harrison, R., Vera, D. & Ahmad, B., 2021. A Connective Framework to Support the Lifecycle of Cyber-Physical Production Systems.. *Production Systems*, pp. 568-581.
- Hasan, I. & Habib, M., 2022. Blockchain Technology to Ensure Traceability of Agriculture Supply Chain Management. *International Supply Chain Technology Journal*, 27 October.
- Hasse, H. και συν., 2019. *Digital twin for real-time data processing in logistics*. Αμβούργο, s.n.
- Heemels, P., Johansson, K. & Tabuada, P., 2012. *An introduction to event-triggered and self-triggered control*. s.l., s.n.
- Higginbotham, P., 2023. *MarketScale*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://marketscale.com/industries/industrial-iot/transform-your-business-with-the-digital-planning-twin/>
- Hippold, S., 2021. *Gartner Predicts the Future of Supply Chain Technology*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.gartner.com/en/articles/gartner-predicts-the-future-of-supply->

chain-technology

[Πρόσβαση 29 Μάιος 2023].

Hribernik, K., Thoben, K.-D. & Schumacher, J., 2006. The product avatar as a product-instance-centric information management concept. *International Journal of Product Lifecycle Management*, Ιανουάριος, pp. 367-379.

Huang, S., Wang, G., Yan, Y. & Fang, X., 2020. Blockchain-based data management for digital twin of product. *Journal of Manufacturing Systems*, January, pp. 361-371.

Hugos, M., 2018. *Essentials of supply chain management*. 4η Έκδοση επιμ. σ.λ.:John Wiley & Sons.

Industry Editor, 2023. *Coca Cola 3E: Εφαρμογή Digital Twins στην αποθήκη του Σχηματαρίου*. [Ηλεκτρονικό]

Available at: <https://industry-news.gr/coca-cola-3e-efarmogi-digital-twins-stin-apothiki-toy-schimatariou/>

Janes, K. & Yaffe, M., 2006. Data-driven modelling of signal-transduction networks. *Nature reviews Molecular cell biology*, pp. 820-828.

Janssen, Zwinjeberg, Blankers & Kruijff, 2015. *Truck platooning: driving the future of transportation*, σ.λ.: s.n.

Jiang, Y. και συν., 2021. Industrial applications of digital twins. *Philosophical Transactions A*, 16 August.

Kamble, S. S. & Gunasekaran, A., 2019. Big data-driven supply chain performance measurement system: a review and framework for implementation.. *International journal of Production Research*, pp. 1-22.

Kang, N., Shen, H. & Xu, Y., 2021. JD.Com improves delivery networks by a multi-period facility location model.. *INFORMS Journal on Applied Analytics*.

Katal, A., Wazid, M. & Goudar, R. H., 2013. *Big data: Issues, challenges, tools and Good practices*. σ.λ., IEEE.

Kesari, G., 2021. *Meet Your Digital Twin: The Coming Revolution In Drug Development*, σ.λ.: Forbes.

Ke, S., Xiang, F., Zhang, Z. & Zuo, Y., 2019. A enhanced interaction framework based on VR, AR and MR in digital twin. *Procedia CIRP*, pp. 753-758.

Kiran, D., 2013. Aggregate Planning. *Handbook of Process Integration (PI)*.

Kirkpatrick, J. και συν., 2017. Overcoming catastrophic forgetting in neural networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* , 14 March, pp. 3521-3526.

Kraft, E. M., 2016. *The US Air Force Digital Thread/Digital Twin –Life Cycle Integration and Use of Computational and Experimental Knowledge*. San Diego, s.n.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G. & Henjes, J., 2018. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), pp. 1016-1022.

- Kritzinger, W. και συν., 2018. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC - PapersOnLine*, pp. 1016-1022.
- Lee, J., Azamfar, M. & Singh, J., 2019. A blockchain enabled Cyber-Physical System architecture for Industry 4.0 manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, April, pp. 34-39.
- Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B. & Kao, H.-a., 2013. Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 3 October, pp. 38-41.
- Lee, J., Singh, J. & Azamfar, M., 2019. Industrial Artificial Intelligence. 22 October.
- Leng, J. και συν., 2021. Digital twin-driven joint optimisation of packing and storage assignment in large-scale automated high-rise warehouse product-service system.. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, pp. 783-800.
- Lerher, T., Sraml, M., Potre, I. & Tollazzi, T., 2010. Travel time models for double-deep automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 48(11), p. 3151–3172.
- Leung, E., Lee, C. & Ouyang, Z., 2022. From traditional warehouses to Physical Internet hubs: A digital twin-based inbound synchronization framework for PI-order management.. *International Journal of Production Economics*.
- Liu, Q., Zhang, H., Leng, J. & Chen, X., 2019. Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 08 May, pp. 3903-3919.
- Lopez-Paz, D. & Ranzato, M., 2017. *Gradient episodic memory for continual learning*. New York, Curran Associates Inc.
- Lu, Y., 2019. The blockchain: State-of-the-art and research challenges. *Journal of Industrial Information Integration*, September, pp. 80-90.
- Lu, Y., Liu, C., Wang, K. & Huang, H., 2019. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*.
- Lu, Y. και συν., 2020. Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, February.
- Lv, Z., 2023. *Digital Twins in Industry 5.0*, Washington DC: National Library of Medicine.
- Magomadov, V., 2020. *The digital twin technology and its role in manufacturing*. Grozny, Russia, s.n.
- Matyi, H. & Tamas, P., 2021. Application of digital twin technology in the development of logistics process. Στο: *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*. s.l.:s.n., pp. 12-19.
- McKinsey & Company, 2022. *McKinsey & Company*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/digital-twins-the-art-of-the-possible-in-product-development-and-beyond>
[Πρόσβαση 10 March 2023].

- Minerva, R., Lee, G. & Crespi, N., 2020. Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. *Proceedings of the IEEE*, 18 Ιούνιος, pp. 1785-1824.
- Min, Q. και συν., 2019. Machine Learning based Digital Twin Framework for Production Optimization in Petrochemical Industry. *The International Journal of Information Management*, December, pp. 502-519.
- Mitchell, T. M., 2006. *The Discipline of Machine Learning*, Πίτσμπουργκ: School of Computer Science Carnegie Mellon University.
- Modoni, G., Caldarola, E., Terkaj, W. & Sacco, M., 2018. *12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Gulf of Naples, s.n.
- Moshood, T., Nawanir, G., Sorooshian, S. & Okfalisa, O., 2021. Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics. *Advanced Virtual Reality Technologies and Their Applications*, 21 Απρίλιος.
- Nanda, M., 2023. *Toobler*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.toobler.com/blog/digital-twin-examples>
- Negri, E., Fumagalli, L. & Macchi, M., 2017. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, pp. 939-948.
- Neto, A., Da Silva, E., Deschamps, F. & De Lima, E., 2021. Digital twins in manufacturing: An assessment of key features. *Procedia CIRP*, pp. 178-183.
- Neubauer, M. & Schildorfer, W., 2022. Towards Truck Platooning Deployment Requirements. Στο: *Energy-Efficient and Semi-automated Truck Platooning*. s.l.:s.n., pp. 21-39.
- NewcastleSystems, 2023. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.newcastlesys.com/blog/the-future-of-reverse-logistics>
[Πρόσβαση 2023].
- Pargmann, H., Euhausen, D. & Faber, R., 2018. *Intelligent big data processing for wind farm monitoring and analysis based on cloud-technologies and digital twins: A quantitative approach*. s.l., IEEE.
- Power, D., 2011. Challenges of real-time decision support.. Στο: *Supporting Real Time Decision-Making: The Role of Context in Decision Support on the Move*. s.l.:s.n., pp. 3-12.
- Qi, Q. & Tao, F., 2018. Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 15 January, pp. 3585-3593.
- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y. & Zhao, D., 2018. Digital Twin Service towards Smart Manufacturing. *Procedia CIRP*, pp. 237-242.
- Raj, P. & Evangeline, P., 2020. The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: the Industry Use Cases. *London: Academic Press*.
- ResearchandMarkets, 2022. *Digital twins market by technology, twinning type, cyber-to-physical solutions, use cases and applications in industry verticals 2022–2027*. s.l.:Mind Commerce.

- Russell, H., 2020. H. Sustainable Urban Governance Networks: Data-driven Planning Technologies and Smart City Software Systems. *Geopolitics History and International Relations*, Ιανουάριος, pp. 9-15.
- Saxena, D., 2018. *What is the Difference Between VR, AR, and MR*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.how2shout.com/what-is/difference-between-vr-mr-and-ar.html> [Πρόσβαση 23 Σεπτέμβριος 2021].
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L. & Wartzack, S., 2017. Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, pp. 141-144.
- Sehrawat, D. & Gill, N., 2019. *Smart Sensors: Analysis of Different Types of IoT Sensors*. Tirunelveli, IEEE.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. & Dassisti, M., 2021. Digital Twin Paradigm: A Systematic Literature Review. *Computers in Industry*, September.
- Shafto, M. και συν., 2010. Draft Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap. Στο: s.l.:s.n.
- Sharma, A. και συν., 2020. *Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions*, New York: Cornell University.
- Shen, Z. M. & Sun, Y., 2021. Strengthening supply chain resilience during COVID-19: A case study of JD.COM.. *Journal of Operations Management*.
- Singh, M. και συν., 2022. Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences* .
- Singh, V. & Willcox, K., 2018. *Engineering design with digital thread*. s.l., s.n.
- Solomatine, D. & Ostfeld, A., 2008. Data-driven modelling: some past experiences and new approaches. *Journal of hydroinformatics*, pp. 3-22.
- Suhail, S. και συν., 2022. Towards situational aware cyber-physical systems: A security-enhancing use case of blockchain-based digital twins. *Computers in Industry*, October.
- Sung, I., Choi, B. & Nielsen, P., 2021. On the training of a neural network for online path planning with offline path planning algorithms. *International Journal of Information Management*, Απρίλιος.
- Tao, F. και συν., 2018. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 3563-3576.
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. & Nee, A., 2019. Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 23 August, pp. 653-661.
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A., 2018. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), pp. 1-1.
- Technative, 2022. *Leveraging the Power of a Digital Twin in Supply Chain*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://technative.io/leveraging-the-power-of-a-digital-twin-in-supply-chain/> [Πρόσβαση 22 Μάρτιος 2023].

- Tekinerdogan, B. & Verdouw, C., 2020. Systems Architecture Design Pattern Catalog for Developing Digital Twins. *IoT for Smart Food and Farming*, 7 Σεπτέμβριος.
- Thonhofer, E., Neubauer, M. & Hofbauer, F., 2022. Application of Fuel Efficiency and Traffic Efficiency Assessment. Στο: *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. s.l.:s.n., pp. 157-171.
- Tozanli, Ö. & Saénz, M. J., 2022. *Unlocking the Potential of Digital Twins in Supply Chains*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://sloanreview.mit.edu/article/unlocking-the-potential-of-digital-twins-in-supply-chains/>
[Πρόσβαση 25 Φεβρουάριος 2023].
- Uhlemann, T., Lehmann, C. & Steinhilper, R., 2017. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, pp. 335-340.
- Ulmer, M., 2018. *Anticipation versus reactive reoptimization for dynamic vehicle routing with stochastic requests*, s.l.: s.n.
- Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A. & Wolfert, S., 2021. Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, April.
- Wang, L., Deng, T., Shen, Z.-J. & Hu, H., 2022. Digital twin-driven smart supply chain. *Frontiers of Engineering Management*, Τόμος 9, pp. 56-70.
- Wodehouse, C., 2016. *Business2community*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.business2community.com/brandviews/upwork/intro-apis-apis-01664902>
[Πρόσβαση 23 Σεπτέμβριος 2021].
- Wong, C., McFarlane, D., Zaharudin, A. & Agarwal, V., 2002. *The Intelligent Product Driven Supply Chain*, Cambridge: University of Cambridge.
- Xia, F., Yang, L., Wang, L. & Vinel, A., 2012. Internet of Things. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMMUNICATION SYSTEMS*, pp. 1101-1102.
- Yang, Q., Liu, Y., Chen, T. & Tong, Y., 2019. Federated Machine Learning: Concept and Applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, March, pp. 1-19.
- You, Y. και συν., 2022. Advances of Digital Twins for Predictive Maintenance. *Procedia Computer Science*, pp. 1471-1480.
- Yuchen, W., Xingzhi, W. & Liu, A., 2020. Digital Twin driven Supply Chain. *Procedia CIRP*.
- Zanero, S., 2017. Cyber-Physical Systems. *IEEE Computer Society*, Απρίλιος, pp. 15-16.
- Zhang, G., MacCarthy, B. & Ivanov, D., 2022. The cloud, platforms, and digital twins—Enablers of the digital supply chain. Στο: *The Digital Supply Chain*. s.l.:Elsevier, pp. 77-91.
- Zheng, Y., Yang, S. & Cheng, H., 2018. An Application Framework of Digital Twin and Its Case Study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing volume*, 18 Ιουνίου, pp. 1141-1153.
- Zhu, X. & Ji, Y., 2022. A digital twin-driven method for online quality control in process industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, March, pp. 1-20.

