



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

Τμήμα Μηχανικών
Βιομηχανικής Σχεδίασης & Παραγωγής

Διπλωματική Εργασία

**Διερεύνηση της εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων
στους ευφυείς λιμένες**



Όνοματεπώνυμο Φοιτητή: Κούκος Νικόλαος

A.M.: 47583

Επιβλέπων Καθηγητής: Χαμηλοθώρης Γεώργιος

ΑΙΓΑΛΕΩ 2023

Μέλη εξεταστικής επιτροπής

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι εξεταστική επιτροπή

<i>α/α</i>	<i>Όνοματεπώνυμο</i>	<i>Ιδιότητα</i>	<i>Υπογραφή</i>
1	ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΧΑΜΗΛΟΘΩΡΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΧΡΗΣΤΟΣ ΔΡΟΣΟΣ	ΜΕΛΟΣ ΕΙΔΙΚΟΥ ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΥ ΠΡΟΣΩΠΙΚΟΥ	

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, στο Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας παρουσιάστηκαν ορισμένες δυσκολίες, εξαιτίας της μεσολάβησης της στρατιωτικής μου θητείας, αλλά επιτεύχθηκε η διεκπεραίωση της επιτυχώς χάρη στη συμβολή ορισμένων ανθρώπων, των οποίων η συμμετοχή ήταν εξαιρετικά σημαντική.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τον υπεύθυνο καθηγητή μου κύριο Χαμηλοθώρη Γεώργιο για την βοήθεια και την καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστώ φίλους, συγγενείς και ιδιαίτερα την κοπέλα μου για την συνεχή συμπαράσταση στα πλαίσια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που αποτέλεσε ένα ανεκτίμητο στήριγμα για μένα κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών μου.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κούκος Νικόλαος του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 47583 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Ο Δηλών

Νικόλαος Κούκος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αφορά την εξέταση της εφαρμογής των προηγμένων διατάξεων ψηφιακής προσομοίωσης (Ψηφιακών Διδύμων-DigitalTwins) για την υποστήριξη και βελτίωση των λειτουργιών σε εμπορικούς και επιβατικούς λιμένες με χαρακτηριστικών ευφυών (smart) λειτουργιών. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία αποσκοπεί στη μελέτη παραδειγμάτων εφαρμογής Ψηφιακών Διδύμων σε λιμένες, την ανάδειξη των βελτιώσεων και των περιορισμών που σχετίζονται με την ανάπτυξη και παραγωγική εκμετάλλευση για το μεταφορικό έργο και τις λιμενικές υπηρεσίες, καθώς και την αποτύπωση των τεχνολογιών και μεθόδων που χρησιμοποιούνται.

Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται διερεύνηση του όρου των Ψηφιακών Διδύμων, καθώς και αναφορά στα κύρια χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα τους. Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά τους ευφυείς λιμένες, καθώς και στο τρόπο που αυτοί εκμεταλλεύονται τις νέες τεχνολογίες και πιο ειδικά αυτή των ψηφιακών διδύμων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται μελέτες περιπτώσεων Ευρωπαϊκών Ευφυών λιμένων, ενώ στο τέταρτο αναφέρονται κρίσιμα ζητήματα σχετικά με τα ψηφιακά δίδυμα στο παρόν και το μέλλον. Τέλος, εξάγονται τα συμπεράσματα και προτείνονται διαδικασίες που μπορούν να υιοθετήσουν τα ελληνικά λιμάνια, προκειμένου να συμβαδίσουν με τις νέες απαιτήσεις της σύγχρονης ναυτιλίας.

Λέξεις-Κλειδιά: Ναυτιλία, Ψηφιακά Δίδυμα, Ευφυείς Λιμένες, Industry 4.0

ABSTRACT

The present study refers to the examination of previous digital simulation devices (Digital Twins) to support and improve operations in commercial and passenger ports with characteristic smart functions.

More specifically, the study intends not only to examine examples of the application of Digital Twins in ports, but also to highlight the improvements and limitations related to the development and productive operation for the transport project and the port services, as well as to depict the technologies and the methods that are used.

The first chapter investigates the term “Digital Twins” and the main features and benefits that Digital Twins have. The second chapter refers to the smart ports, as well as the way they take advantage of the new technologies and, more specifically, the technology of the Digital Twins. In the third chapter, case studies of European Smart Ports are presented, while in the fourth, critical issues related to Digital Twins in the present and the future are mentioned.

To sum up, conclusions are drawn and procedures are proposed that Greek ports can adopt, in order to keep up with the new requirements of modern shipping.

Keywords: Shipping, Digital Twins, Smart Ports, Industry 4.0

Περιεχόμενα

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	9
Κεφάλαιο 1 ^ο -Συστήματα Ψηφιακών Διδύμων.....	17
1.1. Διερεύνηση της έννοιας των Ψηφιακών Διδύμων	17
1.2. Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Διδύμων.....	19
1.3. Ταξινόμηση Ψηφιακών Διδύμων	20
1.3.1. Ωρα δημιουργίας DT.....	21
1.3.2. Επίπεδο Ενσωμάτωσης	22
1.3.3. Εφαρμογή.....	23
1.3.4. Ιεραρχία.....	24
1.3.5. Επίπεδο ωριμότητας/Εξέλιξης	25
1.4. Πλεονεκτήματα Εφαρμογής Ψηφιακών Διδύμων.....	25
2 ^ο Κεφάλαιο – Ευφυείς Λιμένες.....	30
2.1. Περιγραφή Ευφύων Λιμένων.....	30
2.2. Λειτουργίες Έξυπνων Λιμανιών	34
2.3. Η εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων σε αυτά	36
2.4. Προηγμένες Τεχνολογίες που εφαρμόζουν.....	42
2.4.1. Πλατφόρμα Internet of Things (IoT) σε έξυπνους λιμένες.....	42
2.4.2. Εφαρμογή Δεδομένων AIS για Βελτίωση Λειτουργικής Απόδοσης.....	43
2.4.3. Blockchain σε θαλάσσια λιμάνια	45
2.4.5. SafeSeaNet	47

2.5. Ευφυείς Λιμένες και Περιβάλλον	49
3 ^ο Κεφάλαιο – Μελέτες Περιπτώσεων.....	53
3.1. Λιμάνι του Ρότερνταμ.....	53
3.1.1. Τεχνολογίες που το καθιστούν ευφυές λιμάνι.....	53
3.1.2. Αποτελέσματα και Προτάσεις.....	57
3.2. Λιμάνι του Αμβούργου	62
3.2.1. Τεχνολογίες που το καθιστούν ευφυές λιμάνι.....	62
3.2.2. Αποτελέσματα και προτάσεις.....	68
4 ^ο Κεφάλαιο - Μέλλον και προκλήσεις των Ψηφιακών Διδύμων	71
4.1. Προκλήσεις για την εφαρμογή DigitalTwin	72
4.1.1. Καινοτομία της Τεχνολογίας.....	72
4.1.2. Χρόνος και Κόστος	73
4.1.3. Έλλειψη προτύπων και κανονισμών	74
4.1.4 Ζητήματα που σχετίζονται με τα δεδομένα.....	74
4.1.5. Αναντιστοιχία Κύκλου Ζωής.....	75
4.2. Περιορισμοί Ψηφιακών Διδύμων στην Ναυτιλία	76
4.3. Μέλλον Ψηφιακών Διδύμων στην Ναυτιλία	77
Συμπεράσματα-Προτάσεις.....	79

Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Βρισκόμαστε στην έναρξη της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0), στα πρόθυρα μιας νέας τεχνολογικής εποχής, η όποια θα επιδράσει αισθητά τον τρόπο με τον οποίο ζούμε που σε σύγκριση με προηγούμενες επαναστάσεις διακρίνεται από ραγδαία εξέλιξη, καθώς βασικό χαρακτηριστικό της είναι η ταχύτητα (Falkenthal et al., 2016). Επιπλέον, ως βάση έχει τις ψηφιακές τεχνολογίες, οι οποίες λόγω της αλματώδους ανάπτυξης της πληροφορικής των τελευταίων ετών και ιδίως στον τομέα τόσο της ψηφιοποίησης όσο και της επεξεργασίας δεδομένων, ανοίγουν νέους ορίζοντες σε όλα τα επιστημονικά πεδία (Skilton & Hovsepian, 2018). Η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (4BE) απαιτεί ένα νέο τρόπο σκέψης που συνυπολογίζει τον ψηφιακό μετασχηματισμό και τα τεραστία κέρδη παραγωγικότητας από τις ευκαιρίες ευκολότερης πρόσβασης στον πλούτο των πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο (Ross & Maynard, 2021). Αυτός ο ψηφιακός μετασχηματισμός συνεπάγεται με τη ψηφιοποίηση των φυσικών πόρων και την ενσωμάτωσή τους με το παγκόσμιο διαδίκτυο. Επιπλέον, η 4BE απαιτεί πολιτιστικές και επιχειρηματικές αλλαγές στο πώς μια εταιρεία λειτουργεί και προσφέρει αξία στους πελάτες της μέσω της ταχείας υιοθέτησης και αξιοποίησης της τεχνολογίας (Shin et al., 2018).

Ενδεικτικές τεχνολογίες που εντάσσονται στην Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (IIoT) που αφορούν τη σύνδεση των υλικών συσκευών με το Διαδίκτυο, επιτρέποντας σε διαφορετικές διατάξεις να επικοινωνούν μεταξύ τους συνεχώς (Tran, 2023). Ειδικότερα, το βιομηχανικό διαδίκτυο των αντικειμένων που στηρίζεται σε λειτουργικά συστήματα πραγματικού χρόνου, προσφέρει τόσο προηγμένη αλληλεπίδραση όσο και

δικτύωση με το χρήστη, αλλά και χαρακτηριστικά ασφάλειας που επιτρέπουν τη συγκέντρωση και εκμετάλλευση μεγάλων ενοτήτων δεδομένων (BigData) μέσω και της τεχνητής νοημοσύνης (Wangetal., 2015). Μια άλλη τεχνολογία που εφαρμόζεται κατά τη Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση είναι τα Διαστρώματα Επικοινωνίας και Μηχανής (MMI), δηλαδή μια μετατροπή εντολών που είναι κατανοητές από τον άνθρωπο σε εντολές και μια αντίστροφη συνομιλία ανατροφοδότησης από μηχανή σε άνθρωπο που οι πληροφορίες είναι κατανοητές (Nardoetal., 2020). Αυτή η διεπαφή βοηθά την Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) να αναπαράγει και να μιμείται την διαδικασία σκέψης του ανθρώπου (Imetal., 2018). Επομένως, αυτή η διεπαφή είναι απαραίτητη για την υπέρ-αυτοματοποίηση που επιτρέπει στην λιμενική αρχή να αυτοματοποιεί οτιδήποτε μπορεί να αυτοματοποιηθεί καθ' όλη την διάρκεια των λιμένων από άκρο σε άκρο (Romeroetal., 2016). Τέλος, μια άλλη σημαντική τεχνολογική αλλαγή αποτελούν τα Κυβερνοφυσικά Συστήματα (CPS), τα οποία αφορούν τη δημιουργία έξυπνων αντικειμένων που επιτρέπουν την αυτόνομη ικανότητα λήψης αποφάσεων με βάση πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο που συλλέγονται από το διαδίκτυο των πραγμάτων (Skilton&Hovsepien, 2018). Το Κυβερνοφυσικό Σύστημα έχει ως βασικό σκοπό την ελαχιστοποίηση της ανθρώπινης συμμετοχής, δημιουργώντας ένα σύστημα που απρόσκοπτα ενσωματώνει υπολογιστικούς αλγορίθμους, φυσικά στοιχεία και πολλαπλά δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (Ottonicaretal., 2018). Γενικά, ένα κυβερνοφυσικό σύστημα στοχεύει στην ενσωμάτωση της τεχνολογίας αισθητήρων, τον υπολογισμό δεδομένων και τη δικτύωση πληροφοριών σε φυσικά αντικείμενα και υποδομές μέσω της σύνδεσης τους στο Διαδίκτυο των πραγμάτων. Η εμφάνιση του κυβερνοφυσικού συστήματος(CPS) υποστηρίζεται από τεχνολογία αισθητήρων, η οποία μετατρέπει ένα φυσικό φαινόμενο σε ηλεκτρονικό σήμα και μιμείται τις ανθρώπινες δυνατότητες αντίληψης (Sorooshian& Panigrahi, 2020). Πιο αναλυτικά,

καθώς μια μηχανή αναλαμβάνει τις ανθρώπινες δραστηριότητες, η μηχανή όχι μόνο παρέχει στους ανθρώπους περισσότερο ελεύθερο χρόνο και ελευθέρια, αλλά μειώνει το ανθρώπινο σφάλμα και τον χρόνο απόκρισης στις γρήγορες αλλαγές στο σημερινό επιχειρηματικό περιβάλλον. Επιπλέον, τα Κυβερνοφυσικά Συστήματα (CPS) προσπαθούν να αναπτύξουν ένα έξυπνο λιμάνι που οι κοινότητες λιμένων μαζί με μεταφορείς και φορτωτές να εργάζονται μαζί με συνεργατικά ρομπότ μέσω των αλληλεπιδράσεων ανθρώπου-τεχνολογίας (Skilton & Hovsepian, 2018).

Η ενσωμάτωση των παραπάνω τεχνολογιών στην ναυτιλία παρουσιάζεται ως επιτακτική για την μετατροπή των συμβατικών λιμένων σε έξυπνους λιμένες. Πιο αναλυτικά, όσο αναφορά τα έξυπνα λιμάνια είναι σχεδιασμένα για να βελτιώνουν την λειτουργική και την περιβαλλοντική τους απόδοση μέσω μιας αρμονικής επικοινωνίας μεταξύ όλων των συσκευών, πλοίων, τερματικών και εξοπλισμού στα ναυπηγεία. Πιο συγκεκριμένα, η ψηφιοποίηση μέσω της αυτοματοποίησης είναι το κύριο μέσο για την ενίσχυση της παραγωγικότητας σε μελλοντικά έξυπνα λιμάνια. Εκτός από τα μεγάλα λιμάνια, τα λιμάνια που αντιμετωπίζουν έντονο γεωγραφικό ανταγωνισμό βρίσκουν γρηγορότερα νέες λύσεις αυτοματισμού και ανάλυσης που τους βοηθά να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών ενός τερματικού σταθμού, καθιστώντας πιο ομαλή την κυκλοφορία προς την ενδοχώρα και τα παραθαλάσσια (Heikkilä et al., 2022). Οι καινοτόμες λειτουργίες των τερματικών σταθμών στοχεύουν σε βελτιωμένη απόδοση, για παράδειγμα με την αύξηση της συχνότητας μετακίνησης ή με τη μείωση της ανεπιθύμητης διακίνησης φορτίου. Η ανάπτυξη έξυπνων λιμένων καθοδηγείται από τις καινοτομίες των κατασκευαστών εξοπλισμού και την εσωτερική ανάπτυξη των χειριστών τερματικών σταθμών. Επιπλέον, τα λιμάνια χρησιμοποιούν αυτοματοποιημένο εξοπλισμό σε λειτουργίες από πλοία στην ξηρά και ναυπηγεία, επίγειες μεταφορές και αυτοματισμούς πύλης. Το τελευταίο είδος εξοπλισμού επιτρέπει

στις λειτουργίες να εκτελούνται πιο σταθερά και μειώνει τους χρόνους διακοπής της λειτουργίας, ενώ το κόστος επένδυσης είναι υψηλό (Liatal., 2023).

Σήμερα, οι κύριες πόλεις του κόσμου παρέχουν τις δικές τους πλατφόρμες ανοιχτών δεδομένων. Για παράδειγμα, η European DataPortal έχει αναλύσει την κατάσταση και τα χαρακτηριστικά των πυλών OpenData σε οκτώ από τις μεγαλύτερες πρωτεύουσες στην Ευρώπη και σε μεσαίου μεγέθους ευρωπαϊκές πόλεις, όπως είναι διάφορες ελληνικές πόλεις σαν τη Θεσσαλονίκη (Barros&Athanasios, 2004). Οι πληροφορίες από αυτές τις πύλες είναι χρήσιμες για τα λιμάνια, καθώς προέρχονται από αισθητήρες που συνδέονται με τις γύρω περιοχές παρέχοντας ροή πληροφοριών μεταξύ ολόκληρης της πόλης, της γειτονιάς του λιμανιού και του λιμανιού. Η ανάλυση, η χρήση και η επεξεργασία αυτών των δεδομένων οδηγεί στην εμφάνιση εφαρμογών και υπηρεσιών που βελτιώνουν τις καθημερινές δραστηριότητες του λιμανιού και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Πιο αναλυτικά, το λιμάνι της Θεσσαλονίκης βρίσκεται πολύ κοντά στο κέντρο της πόλης, το οποίο έχει χτιστεί όλα αυτά τα χρόνια γύρω από τις οικονομικές ευκαιρίες που προσφέρει ένα λιμάνι. Τα τελευταία δέκα χρόνια, ένας τεράστιος αριθμός ποικίλων δραστηριοτήτων έχει μεταφερθεί στον περιβάλλοντα χώρο του λιμανιού, ο οποίος επιλέγεται όλο και περισσότερο ως το ιδανικό μέρος για την ίδρυση επιχειρήσεων με έδρα τα γραφεία. Αρκετά πολυτελή ξενοδοχεία και νέα επιχειρηματικά κέντρα, συμπεριλαμβανομένων ολοκαίνουργιων και αναδιαμορφωμένων κτιρίων έχουν κατασκευαστεί λίγο έξω από την περιοχή του λιμανιού, επηρεάζοντας έτσι άμεσα από τις συνήθεις καθημερινές λιμενικές δραστηριότητες. Η δημιουργία μιας φυσικής βάσης κοντά στο λιμάνι μπορεί να έχει ορισμένα μειονεκτήματα, όπως ο θόρυβος, επίδραση της σκόνης στον αέρα. Ωστόσο, υπάρχουν και θετικά, όπως οι απόψεις που προσφέρονται σε πελάτες και εργοδότες και το προνόμιο της άμεσης επαφής με την επιχειρηματική καρδιά της πόλης. Οι λιμενικές

δραστηριότητες και οι αναπτυσσόμενες επιχειρήσεις επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την κυκλοφοριακή συμφόρηση στους γύρω δρόμους προς το λιμάνι και το κέντρο της πόλης. Επιπλέον, η βιομηχανική περιοχή της Θεσσαλονίκης, ο κεντρικός σταθμός λεωφορείων και τα κέντρα logistics βρίσκονται όλα στη δυτική πλευρά της πόλης. Η κεντρική πύλη φορτηγών του Λιμανιού βρίσκεται στη δυτική πλευρά του με αποτέλεσμα να υπάρχει σημαντική κίνηση τις ώρες αιχμής (Saragaetal., 2019). Από τη μία πλευρά, το επίπεδο κυκλοφοριακής συμφόρησης αντιπροσωπεύεται από τον αριθμό των οχημάτων στις πύλες του λιμανιού (πραγματική διεπαφή λιμανιού-πόλης). Ωστόσο, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το επίπεδο συμφόρησης, όπως οι λιμενικές δραστηριότητες (π.χ. από τον αριθμό των πλοίων που λειτουργούν), οι καιρικές συνθήκες (π.χ. επηρεάζοντας τις λιμενικές λειτουργίες μειώνοντας την παραγωγικότητα ή παρατηρώντας ότι η βροχόπτωση οδηγεί σε μεγαλύτερη κίνηση η συμφόρηση στις πόλεις), η εποχικότητα (εποχή, μήνας, ημέρα μέσα στην εβδομάδα) και, φυσικά, η συμβολή για την ίδια την πόλη, δηλαδή την κυκλοφορία στο περιβάλλον του λιμανιού που αποδίδεται στην πόλη. Για τους παραπάνω λόγους είναι απαραίτητη η εκμετάλλευση των νέων τεχνολογιών, προκειμένου να παρέχονται τα κατάλληλα δεδομένα κίνησης στις πύλες του λιμανιού, υποδεικνύοντας έτσι μια σειρά λειτουργικών απαιτήσεων και περιγράφοντας τη διάταξη οπτικοποίησης που θα ήθελε να έχει μια λιμενική αρχή (Fotopoulouetal., 2022).

Πέρα από το λιμάνι της Θεσσαλονίκης, η Ελλάδα διαθέτει κι άλλα που έχουν καθοριστική επίδραση στην οικονομία της χώρας. Σήμερα, το λιμάνι του Πειραιά είναι το κύριο λιμάνι της Ελλάδας, καθώς χρησιμοποιείται ως κόμβος για προορισμούς στην Κεντρική και Ανατολική Μεσόγειο, αλλά και στη Μαύρη Θάλασσα. Το λιμάνι του Πειραιά είναι το κύριο λιμάνι της Αθήνας και βρίσκεται στον Σαρωνικό κόλπο στις δυτικές ακτές του Αιγαίου και είναι το μεγαλύτερο λιμάνι της Ελλάδας και ένα από τα

μεγαλύτερα στην Ευρώπη, έχει άριστες συνθήκες λιμανιού και βρίσκεται σε ευνοϊκή γεωγραφική θέση (Boetal., 2018). Επιπλέον, όσον αφορά τη θάλασσα, το λιμάνι του Πειραιά είναι το πλησιέστερο λιμάνι βαθέων υδάτων από την Ευρώπη στην ήπειρο. Επιπλέον, κατατάσσεται μεταξύ των μεγαλύτερων ευρωπαϊκών λιμανιών όσον αφορά τον όγκο κίνησης, το μεγαλύτερο λιμάνι επιβατών στην Ευρώπη και έρχεται στην έβδομη θέση μεταξύ όλων των ευρωπαϊκών λιμένων στη διακίνηση εμπορευματοκιβωτίων. Επιπλέον, το συγκεκριμένο λιμάνι φιλοξενεί ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων και διευκολύνει τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, αυτοκινήτων και γενικού φορτίου, τις λειτουργίες ελεύθερης ζώνης, την ακτοπλοΐα, την κρουαζιέρα, καθώς και τις δραστηριότητες επισκευής πλοίων (Vaggelas&Pallis, 2019). Μετά από συμφωνία αγοράς μετοχών το 2016, το 67% του μετοχικού κεφαλαίου του Οργανισμού Λιμένος Πειραιώς(ΟΛΠ) πωλήθηκε στην COSCO. Η διαχείριση και λειτουργία του Λιμένα από τον παγκόσμιο φορέα COSCO υποστηρίζει την περαιτέρω ανάπτυξη και επέκταση των δραστηριοτήτων, με αποτέλεσμα οι αυξανόμενες ροές κυκλοφορίας να επιβεβαιώνουν μια πολύ θετική τάση και ταυτόχρονα δείχνουν τις δυνατότητες του λιμανιού (Ma&Peverelli, 2019). Ο ΟΛΠ ακολουθεί ένα φιλόδοξο 10ετές Αναπτυξιακό Πρόγραμμα, που περιλαμβάνει μια σειρά επενδύσεων σε όλα τα σημεία του λιμένα του Πειραιά. Το λιμάνι του Πειραιά είναι ένα από τα κορυφαία ελληνικά λιμάνια όσον αφορά την ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών ανησυχιών και τη βιωσιμότητα στη λειτουργία και την ανάπτυξη του λιμένα. Αποστολή της ΟΛΠ είναι η παροχή λιμενικών υπηρεσιών υψηλής ποιότητας, με ασφαλή και βιώσιμο τρόπο. Όπως δήλωσε ο Πρόεδρος του Διοικητικού Συμβουλίου του ΟΛΠ, η εταιρεία εφαρμόζει Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Ποιότητας, Περιβάλλοντος & Ενέργειας σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προτύπων ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 & ISO 50001:2018. Επιπλέον, όπως αναφέρεται από το διοικητικό συμβούλιο προτεραιότητα

του λιμανιού είναι η συνεχής βελτίωση των προτύπων των παρεχόμενων υπηρεσιών μαζί με την περιβαλλοντική και ενεργειακή απόδοση (Zheng&Smith, 2017). Οι αποφάσεις για ενεργειακά θέματα και ζητήματα βιωσιμότητας αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του οράματος και της στρατηγικής της εταιρείας, καθώς βασικοί στόχοι της είναι μεταξύ άλλων η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ο σχεδιασμός νέων διεργασιών και διαδικασιών με γνώμονα την αειφορία, αλλά και η βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των λιμενικών δραστηριοτήτων και του λιμανιού γενικότερα. Η δέσμευση του ΟΛΠ να συνεχίσει τη δυναμική πορεία της βιώσιμης ανάπτυξης και του τεχνολογικού μετασχηματισμού του λιμανιού επαναλαμβάνεται σε κάθε επίσημη δήλωση. Η εμπλοκή της κινεζικής εταιρείας COSCO και το γενικό συμφέρον του κράτους της Κίνας από την εκμετάλλευση του λιμανιού του Πειραιά υπενθυμίζει πόσο σημαντικός είναι ο διεθνής του ρόλος (Qianqian&Davarinou, 2019).

Αξίζει να αναφερθεί πως από τα τέλη της δεκαετίας του 1990, τα ελληνικά λιμάνια βρίσκονται σε μεταβατικό στάδιο. Σπάζοντας μια μακρόχρονη παράδοση ολοκληρωμένων λιμενικών οργανισμών ελεγχόμενων από το κράτος, 12 λιμάνια εθνικού ενδιαφέροντος μετατράπηκαν από «επιχειρήσεις δημοσίου δικαίου» σε κρατικές λιμενικές εταιρείες. Η ευθύνη της διακυβέρνησης αυτών των λιμένων ανατέθηκε από την εθνική κυβέρνηση σε αυτόνομες λιμενικές αρχές εμπορικά καθοδηγούμενες (Lee&Lam, 2017). Οι τελευταίες ανέλαβαν και την ευθύνη για την παροχή λιμενικών υπηρεσιών. Τα δύο μεγάλα λιμάνια του Πειραιά και της Θεσσαλονίκης είναι σήμερα εισηγμένα στο Χρηματιστήριο Αθηνών (ΧΑ), με το ποσοστό του Δημοσίου να είναι της τάξης του 75%. Η εισαγωγή ενός νέου μοντέλου διακυβέρνησης στοχεύει να ξεπεράσει τις ελλείψεις των προηγούμενων λιμενικών δομών και να διευκολύνει την προσαρμογή σε ένα σύνθετο οικονομικό πλαίσιο. Εκτός από γνωστούς φυσικούς παράγοντες όπως η τοποθεσία, η θαλάσσια προσβασιμότητα

και οι υποδομές της ενδοχώρας, η διακυβέρνηση των λιμένων αποτελεί σημαντικό καθοριστικό παράγοντα της απόδοσης των λιμένων. Οι εξελίξεις στη διακυβέρνηση των λιμένων στην Ελλάδα ακολουθούν αντίστοιχες σημαντικές αλλαγές που μπορούν να παρατηρηθούν παγκοσμίως. Το προηγούμενο καθεστώς των λιμενικών φορέων που ανήκουν στο δημόσιο και λειτουργούν άφησε πίσω του χαμηλότερα κίνητρα παραγωγικότητας, αναποτελεσματική κατανομή πόρων εργασίας και κεφαλαίου, καθώς και περιορισμούς που επιβάλλονται από εξωγενείς πολιτικές επιρροές (Pallis&Vaggelas, 2017). Συνεπώς, λόγω των νέων τεχνολογιών που εφαρμόζονται παγκοσμίως στη ναυτιλία και χάρης της ιδιαίτερης αξίας που παρουσιάζουν τα λιμάνια στην οικονομία της χώρας, θα πρέπει οι κατάλληλες αρχές να εισάγουν κίνητρα αυτονομίας και απόδοσης, υποστηρίζοντας τη διαχείριση λιμένων που ανταποκρίνεται στην αγορά και στην προσπάθεια βελτίωσης του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματός τους μέσω της εφαρμογής των νέων τεχνολογιών.

Κεφάλαιο 1^ο-Συστήματα Ψηφιακών Διδύμων

1.1. Διερεύνηση της έννοιας των Ψηφιακών Διδύμων

Ένα Ψηφιακό Δίδυμο (DigitalTwin - DT) αναφέρεται στο εικονικό αντίγραφο ή μοντέλο οποιασδήποτε φυσικής οντότητας (physicaltwin), τα οποία είναι και τα δύο διασυνδεδεμένα μέσω ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Εννοιολογικά, ένα DT μιμείται την κατάσταση του φυσικού του διδύμου σε πραγματικό χρόνο και αντίστροφα. Η εφαρμογή του DT περιλαμβάνει τη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, τον σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση, τη συντήρηση, αλλά και την απομακρυσμένη πρόσβαση (Taoetal., 2022). Η εφαρμογή του αναμένεται να αυξηθεί εκθετικά τις επόμενες δεκαετίες, καθώς όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα η εμφάνιση του Industry 4.0 έφερε πολύπλοκα βιομηχανικά συστήματα που είναι πιο αυτόνομα, έξυπνα και πολύ διασυνδεδεμένα. Αυτά τα συστήματα παράγουν σημαντικές ποσότητες δεδομένων χρήσιμων για πολλές εφαρμογές, όπως η βελτίωση της απόδοσης, η προγνωστική συντήρηση, η εκπαίδευση κ.λπ. Παρόλο που η τεχνολογία DT έχει αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα τα τελευταία χρόνια, η ιδέα δεν είναι εντελώς νέα. Η ιδέα του δημιουργήθηκε σε σχέση με τη Διαχείριση Κύκλου Ζωής Προϊόντων (PLM) το 2002 στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν από τον MichaelGrievess. Το προτεινόμενο μοντέλο είχε τρία στοιχεία: τον πραγματικό χώρο, τον εικονικό χώρο και τον μηχανισμό σύνδεσης για τη ροή δεδομένων και πληροφοριών (Grievess&Vickers, 2017).

Είναι σαφές από τη βιβλιογραφία ότι το DT διαφέρει από τα μοντέλα υπολογιστών (CAD/CAE) και την προσομοίωση. Παρόλο που πολλοί οργανισμοί χρησιμοποιούν τον όρο «DigitalTwin» συνώνυμο του τρισδιάστατου μοντέλου, ένα τρισδιάστατο μοντέλο είναι μόνο ένα μέρος του DT. Το DT χρησιμοποιεί δεδομένα για

να αντικατοπτρίζει τον πραγματικό κόσμο σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση και την κατανόηση της απόδοσης του συστήματος και για την προγνωστική του συντήρηση (Fulleretal., 2020). Τα μοντέλα υπολογιστών, όπως και το DT, χρησιμοποιούνται επίσης για τη γενική κατανόηση ενός συστήματος ή για την πραγματοποίηση γενικευμένων προβλέψεων, αλλά σπάνια χρησιμοποιούνται για την ακριβή αναπαράσταση της κατάστασης ενός συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Η έλλειψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο καθιστά αυτά τα μοντέλα ή προσομοιώσεις στατικά, πράγμα που σημαίνει ότι δεν αλλάζουν ή δεν μπορούν να κάνουν νέες προβλέψεις εκτός εάν τροφοδοτηθούν νέες πληροφορίες. Ωστόσο, η ύπαρξη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο δεν αρκεί για τη λειτουργία του DT, καθώς τα δεδομένα πρέπει επίσης να φορτώνονται αυτόματα και η ροή από φυσικό σε ψηφιακό θα πρέπει να είναι αμφίδρομη. Λόγω της παρουσίας πληθώρας ορισμών στη βιβλιογραφία, δεν υπάρχει συναίνεση για το τι μπορεί πραγματικά να περιγραφεί ως DT ή όχι. Έτσι, η παροχή άδειας σε ακαδημαϊκούς και επιχειρήσεις να χρησιμοποιούν τον όρο DT στις ανάγκες τους δημιουργεί σύγχυση μεταξύ των διαφορετικών ορολογιών που σχετίζονται με την ψηφιοποίηση των βιομηχανιών (Semeraroetal., 2021).

Προκειμένου να απλοποιηθεί η σύγχυση γύρω από τις διαφορετικές ορολογίες που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της DT, ένας ορισμός της DT που μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από τον κλάδο ή την εφαρμογή του είναι πως ένα DigitalTwin είναι ένα δυναμικό και αυτό-εξελισσόμενο ψηφιακό/εικονικό μοντέλο ή προσομοίωση ενός πραγματικού υποκειμένου ή αντικειμένου (μέρος, μηχανή, διαδικασία, άνθρωπος κ.λπ.) που αντιπροσωπεύει την ακριβή κατάσταση του φυσικού του διδύμου σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή μέσω ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο καθώς και διατήρησης των ιστορικών δεδομένων (Liuetal., 2021). Συνεπώς, δεν

είναι μόνο το DigitalTwin που μιμείται το φυσικό του δίδυμο, αλλά οποιεσδήποτε αλλαγές στο DigitalTwin μιμούνται και από το φυσικό δίδυμο (Semeraroetal., 2021).

1.2. Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Διδύμων

Ανάλογα με τον τύπο του DT, μπορεί να έχει διακριτικές ιδιότητες από τους άλλους, αλλά ανεξάρτητα από αυτό, όλα τα DT έχουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά. Αρχικά, τα Ψηφιακά Δίδυμα χαρακτηρίζονται από υψηλή πιστότητα. Ένα DT πρέπει να είναι σχεδόν πανομοιότυπο αντίγραφο του αντίστοιχου φυσικού του όσον αφορά την εμφάνιση, το περιεχόμενο, τη λειτουργικότητα κ.λπ., με πολύ υψηλό βαθμό ακρίβειας (Barricellietal., 2019). Ένα υπερρεαλιστικό ψηφιακό μοντέλο βοηθά την DT να μιμηθεί κάθε πτυχή του φυσικού της δίδυμου. Τα μοντέλα υπολογιστών εξαιρετικά υψηλής πιστότητας θεωρούνται η ραχοκοκαλιά του DT. Αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας επιτρέπει στα εργαλεία προσομοίωσης και πρόβλεψης DT να είναι πιο αξιόπιστα όταν παρουσιάζονται με ένα σύνολο εναλλακτικών ενεργειών ή σεναρίων (Jonesetal., 2020).

Επιπλέον, τα Ψηφιακά Δίδυμα χαρακτηρίζονται από δυναμικότητα. Πιο συγκεκριμένα, το φυσικό είναι δυναμικό, δηλαδή αλλάζει σε σχέση με το χρόνο. Έτσι, ένα DT πρέπει επίσης να αλλάξει καθώς αλλάζει το φυσικό σύστημα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της απρόσκοπτης σύνδεσης και της συνεχούς ανταλλαγής μεταξύ του φυσικού και του εικονικού κόσμου. Η ανταλλαγή δεδομένων μπορεί να είναι δυναμικά δεδομένα, ιστορικά στατικά δεδομένα, καθώς και περιγραφικά στατικά δεδομένα (VanDerHorn&Mahadevan, 2021). Το DT έχει περιγραφεί ως «ζωντανό μοντέλο σε 3D». Ο στόχος του DT να είναι δυναμικός είναι να αντικατοπτρίζει το φυσικό δίδυμο και τη συμπεριφορά του ρεαλιστικά στον ψηφιακό κόσμο. Επιπλέον, ένα DT εξελίσσεται μαζί με το φυσικό του αντίστοιχο σε όλο τον κύκλο ζωής του. Οποιοσδήποτε αλλαγές είτε στο φυσικό είτε στο DigitalTwin αντικατοπτρίζονται στο

αντίστοιχο του, δημιουργώντας έναν κλειστό βρόχο ανάδρασης. Ένα DT αυτοπροσαρμόζεται και αυτοβελτιστοποιείται με τη βοήθεια των δεδομένων που συλλέγονται από το φυσικό δίδυμο σε πραγματικό χρόνο, ωριμάζοντας έτσι μαζί με το φυσικό του αντίστοιχο καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του (Barricellietal., 2019).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των DT είναι πως είναι αναγνωρίσιμα, καθώς κάθε φυσικό περιουσιακό στοιχείο πρέπει να έχει το δικό του DT. Κατά τη διάρκεια διαφορετικών σταδίων του κύκλου ζωής του προϊόντος, τα δεδομένα και οι πληροφορίες που σχετίζονται με αυτό εξελίσσονται και το ίδιο συμβαίνει και με το μοντέλο, συμπεριλαμβανομένων τρισδιάστατων γεωμετρικών μοντέλων, μοντέλων κατασκευής, μοντέλων χρήσης, λειτουργικών μοντέλων κ.λπ. Λόγω της ύπαρξης τέτοιων μοντέλων που δημιουργήθηκαν για το DT, ένα DT μπορεί να αναγνωριστεί μοναδικά από το φυσικό του δίδυμο ή αντίστροφα οπουδήποτε και για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του (VanDerHorn&Mahadevan, 2021). Τέλος, όπως προαναφέρθηκε το Industry 4.0 περιστρέφεται γύρω από πολλούς κλάδους και το DT, ως η ραχοκοκαλιά του Industry 4.0, φαίνεται να είναι πολυκλαδικό, διότι βλέπει τη συγχώνευση κλάδων, όπως η επιστήμη των υπολογιστών, η τεχνολογία των πληροφοριών και οι επικοινωνίες, μηχανική, ηλεκτρική κ.λπ. (Yaoetal., 2021).

1.3. Ταξινόμηση Ψηφιακών Διδύμων

Τα DigitalTwins (DT) μπορούν να ταξινομηθούν σε διαφορετικούς τύπους με βάση διαφορετικά κριτήρια, όπως το πότε δημιουργείται το DT, το επίπεδο ολοκλήρωσης, τις εφαρμογές του, την ιεραρχία και το επίπεδο ωριμότητας. Διαφορετικοί συγγραφείς έχουν καταλήξει στη δική τους ονοματολογία των τύπων DT με βάση αυτά τα κριτήρια.

1.3.1. Όρα δημιουργίας DT

Σύμφωνα με τους Grieves και Vickers(2017), υπάρχουν δύο τύποι DT με βάση το πότε αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος - πριν δημιουργηθεί το πρωτότυπο, δηλαδή στη φάση σχεδιασμού ή αφού το προϊόν είναι έτοιμο, δηλαδή στη φάση παραγωγής. Και οι δύο τύποι DT είναι ενσωματωμένοι και λειτουργούν για πολλαπλές χρήσεις σε μια πλατφόρμα που ονομάζεται Περιβάλλον Ψηφιακού Διδύμου (DigitalTwinEnvironment- DTE). Οι δύο αυτοί τύποι είναι:

- Το Πρωτότυπο Ψηφιακού Διδύμου (DigitalTwinPrototype- DTP): Το DTP μπορεί να περιγραφεί ως DT που περιέχει το σύνολο δεδομένων/πληροφοριών που είναι απαραίτητα για τη δημιουργία ή την κατασκευή ενός φυσικού αντιγράφου από την εικονική έκδοση. Αυτό περιλαμβάνει BOM (τιμολόγιο υλικών), αρχεία σχεδίασης, μοντέλα CAD κ.λπ. Ο κύκλος προϊόντων θα ξεκινήσει από τη δημιουργία του DTP, το οποίο μπορεί να υποβληθεί σε διάφορες δοκιμές, ακόμη και τις καταστροφικές, πριν δημιουργηθεί το φυσικό του δίδυμο(Singhetal., 2021). Επιπλέον, το DTP μας βοηθά να εντοπίσουμε και να αποφύγουμε απρόβλεπτα και ανεπιθύμητα σενάρια που είναι δύσκολο να ταυτιστούν με τα παραδοσιακά πρωτότυπα. Μόλις ολοκληρωθεί και επικυρωθεί το DTP, το φυσικό του δίδυμο μπορεί να κατασκευαστεί στον πραγματικό κόσμο. Η ακρίβεια της προσομοίωσης/μοντέλου θα καθορίσει την ποιότητα του φυσικού δίδυμου (Pintoetal., 2021).

- Το Παράδειγμα Ψηφιακού Διδύμου (DigitalTwin Instance - DTI): Αυτός ο τύπος DT συνδέεται με το φυσικό αντίστοιχό του καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Το DTI δημιουργήθηκε κατά τη φάση παραγωγής. Μόλις κατασκευαστεί ένα φυσικό σύστημα, τα δεδομένα από τον

πραγματικό χώρο αποστέλλονται στον εικονικό χώρο και αντίστροφα για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος. Με αυτά τα δεδομένα, μπορεί να διαπιστωθεί εάν το σύστημα απεικονίζει την προβλεπόμενη επιθυμητή συμπεριφορά ή όχι, καθώς και εάν τα προβλεπόμενα ανεπιθύμητα σενάρια έχουν εξαλειφθεί με επιτυχία. Δεδομένου ότι η σύνδεση μεταξύ των δύο συστημάτων είναι αμφίδρομη, οποιεσδήποτε αλλαγές στο ένα θα αντιγραφούν στο άλλο (Harperetal., 2019).

1.3.2. Επίπεδο Ενσωμάτωσης

Με βάση το επίπεδο ολοκλήρωσης των DTs, οι Kritzingeretal. (2018) τα χωρίζουν σε τρεις υποκατηγορίες:

- Το ψηφιακό μοντέλο: Σε αυτόν τον τύπο DT, τα δεδομένα μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού αντικειμένου ανταλλάσσονται χειροκίνητα, λόγω του οποίου τυχόν αλλαγές στην κατάσταση του φυσικού αντικειμένου δεν αντικατοπτρίζονται απευθείας στο ψηφιακό και αντίστροφα.
- Τη ψηφιακή σκιά: Τα δεδομένα από το φυσικό αντικείμενο ρέουν στο ψηφιακό αυτόματα, αλλά αυτό εξακολουθεί να είναι χειροκίνητο αντίστροφα. Ως αποτέλεσμα, οποιαδήποτε αλλαγή στο φυσικό αντικείμενο μπορεί να φανεί στο ψηφιακό του αντίγραφο, αλλά όχι το αντίστροφο.
- Ψηφιακά Δίδυμα: Σε αυτόν τον τύπο DT, υπάρχει αυτόματη αμφίδρομη ροή δεδομένων μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού αντικειμένου. Επομένως, οι αλλαγές είτε σε φυσικό είτε σε ψηφιακό, οδηγούν άμεσα σε αλλαγές στο άλλο.

1.3.3. Εφαρμογή

Οι DT μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τις εφαρμογές τους. Οι δύο ευρείες εφαρμογές ενός DT είναι η πρόβλεψη και η ανάκριση. Ένα προγνωστικό DT, όπως υποδηλώνει το όνομα, προβλέπει τη μελλοντική συμπεριφορά και την απόδοση του φυσικού του αντίστοιχου, ενώ ένα ερωτηματικό DT χρησιμοποιείται για να ανακρίνει την τρέχουσα ή προηγούμενη κατάσταση του φυσικού του αντίστοιχου, ανεξάρτητα από τη θέση του (Singh et al., 2021). Τα DT μπορούν επίσης να χωριστούν ανάλογα με το εάν η εστίαση της εφαρμογής είναι στο προϊόν, τη διαδικασία ή την απόδοση. Πιο αναλυτικά:

- Το προϊόν DT: Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία πρωτοτύπων καθώς αναλύει το προϊόν υπό διαφορετικές συνθήκες και διασφαλίζει ότι το επόμενο φυσικό προϊόν συμπεριφέρεται όπως έχει προγραμματιστεί. Με την εικονική επικύρωση του προϊόντος, η δημιουργία πρωτοτύπων μπορεί να είναι γρήγορη καθώς μειώνεται ο συνολικός χρόνος ανάπτυξης και δεν υπάρχει πλέον ανάγκη ανάπτυξης πολλαπλών από αυτά (Botín-Sanabria et al., 2022).

- Η παραγωγή DT: Χρησιμοποιείται για την επικύρωση των διαδικασιών προσομοιώνοντας και στη συνέχεια αναλύοντάς τις ακόμη και πριν από την πραγματική παραγωγή. Αυτό βοηθά στην ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής μεθοδολογίας παραγωγής υπό διαφορετικές συνθήκες. Τα δεδομένα από το προϊόν και τη παραγωγή μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί για την παρακολούθηση και τη συντήρηση του μηχανήματος (Singh et al., 2022).

- Η επίδοση DT: Χρησιμοποιείται για διαδικασίες λήψης αποφάσεων με τη συλλογή, τη συγκέντρωση και την ανάλυση δεδομένων από έξυπνα προϊόντα και εγκαταστάσεις. Εφόσον η επίδοση DT περιλαμβάνει επιδόσεις τόσο του προϊόντος όσο και της παραγωγής, βελτιστοποιεί τις

λειτουργίες ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των φυτικών πόρων, γεγονός που δημιουργεί μια ευκαιρία βελτίωσης των DT παραγωγής και προϊόντων μέσω ενός βρόχου ανάδρασης (Javaid&Haleem, 2023).

1.3.4. Ιεραρχία

Από ιεραρχική άποψη, το DT μπορεί επίσης να χωριστεί σε τρία διαφορετικά επίπεδα, ανάλογα με το μέγεθος που εμπλέκεται στην κατασκευή, όπου είναι :

- Το Επίπεδο Μονάδας: Είναι η μικρότερη μονάδα που συμμετέχει στην κατασκευή και μπορεί να είναι ένα κομμάτι εξοπλισμού, υλικού ή περιβαλλοντικοί παράγοντες. Το DT σε επίπεδο μονάδας βασίζεται στο γεωμετρικό, λειτουργικό, συμπεριφορικό και λειτουργικό μοντέλο του φυσικού δίδυμου επιπέδου μονάδας (Taoetal., 2022).

- Το Επίπεδο Συστήματος: Είναι μια συγχώνευση πολλών DT σε επίπεδο μονάδας σε ένα σύστημα παραγωγής όπως γραμμή παραγωγής, όροφος καταστήματος, εργοστάσιο κ.λπ. Η διασύνδεση και η συνεργασία μεταξύ πολλαπλών DT σε επίπεδο μονάδας οδηγούν σε ευρύτερη ροή δεδομένων και καλύτερη κατανομή πόρων. Ένα σύνθετο προϊόν, π.χ. αεροσκάφος, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως DT σε επίπεδο συστήματος.

- Το Επίπεδο Συστήματος του Συστήματος (System of Systems - SoS): Ένας αριθμός DT σε επίπεδο συστήματος συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν DT επιπέδου SoS, το οποίο βοηθά στη συνεργασία διαφορετικών επιχειρήσεων ή διαφορετικών τμημάτων με μια επιχείρηση, όπως αλυσίδα εφοδιασμού, σχεδιασμός, σέρβις, συντήρηση κ.λπ. (Liuetal., 2023). Με άλλα λόγια, το DT επιπέδου SoS ενσωματώνει διαφορετικές φάσεις του προϊόντος σε όλο τον κύκλο ζωής του.

1.3.5. Επίπεδο ωριμότητας/Εξέλιξης

Με βάση το επίπεδο πολυπλοκότητας του DT, δηλαδή την ποσότητα και την ποιότητα των δεδομένων που λαμβάνονται από το φυσικό δίδυμο και το περιβάλλον του, τα DT μπορούν να ομαδοποιηθούν σε:

- Μερικό DT: Περιέχει έναν μικρό αριθμό σημείων δεδομένων, π.χ. πίεση, θερμοκρασία, υγρασία κ.λπ., που είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό της συνδεσιμότητας και της λειτουργικότητας του DT (Uhlenkampetal., 2022).
- Κλώνος DT: Περιέχει όλα τα σημαντικά και σχετικά δεδομένα από το προϊόν/σύστημα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή πρωτοτύπων και την κατηγοριοποίηση των φάσεων ανάπτυξης.
- Επαυξημένη Πραγματικότητα DT: Χρησιμοποιεί δεδομένα από το περιουσιακό στοιχείο μαζί με τα ιστορικά του δεδομένα και ταυτόχρονα αντλεί και συσχετίζει τα χρήσιμα δεδομένα χρησιμοποιώντας αλγόριθμους και αναλυτικά στοιχεία (VanDerHorn&Mahadevan, 2021).

1.4. Πλεονεκτήματα Εφαρμογής Ψηφιακών Διδύμων

Ο κύριος λόγος που η τεχνολογία DT θεωρείται ως ο ακρογωνιαίος λίθος στο Industry 4.0 είναι η πληθώρα των πλεονεκτημάτων της, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των σφαλμάτων, των αβεβαιοτήτων, της αναποτελεσματικότητας και των εξόδων σε οποιοδήποτε σύστημα ή διαδικασία. Αφαιρεί επίσης όλα τα σιλό σε διαδικασίες ή οργανισμούς που κατά τα άλλα λειτουργούν μεμονωμένα μέσα σε διαμερίσματα και τμήματα σε πιο παραδοσιακές βιομηχανικές δομές (Singhetal., 2021). Μερικά από τα πλεονεκτήματα που αναφέρονται για το DT περιλαμβάνουν τη πρωτοτυποποίηση ταχύτητας, καθώς και τον επανασχεδιασμό προϊόντων. Δεδομένου

ότι οι προσομοιώσεις επιτρέπουν τη διερεύνηση πολλών σεναρίων, οι κύκλοι σχεδίασης και ανάλυσης συντομεύονται, καθιστώντας την όλη διαδικασία πρωτότυπου ή επανασχεδιασμού ευκολότερη και ταχύτερη. Μόλις εφαρμοστεί, το DT μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας σχεδιασμού του προϊόντος, από τη σύλληψη της ιδέας του προϊόντος έως τη δοκιμή του. Εκτός αυτού, δημιουργεί επίσης μια ευκαιρία όπου είναι δυνατή η προσαρμογή κάθε προϊόντος με βάση τις ανάγκες των χρηστών και τα δεδομένα χρήσης. Δεδομένου ότι το DT συνδέεται με το φυσικό του δίδυμο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ της πραγματικής και της προβλεπόμενης απόδοσης, επιτρέποντας στους μηχανικούς/σχεδιαστές προϊόντων να επανεξετάσουν τις υποθέσεις τους βάσει των οποίων σχεδιάστηκε το προϊόν.

Επιπλέον, λόγω του DT που περιλαμβάνει κυρίως εικονικούς πόρους για τη δημιουργία του, το συνολικό κόστος της δημιουργίας πρωτοτύπων μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Στην παραδοσιακή κατασκευή πρωτοτύπων, ο επανασχεδιασμός ενός προϊόντος είναι χρονοβόρος καθώς και δαπανηρός λόγω της χρήσης φυσικών υλικών και εργασίας, και επιπλέον, μια καταστροφική δοκιμή σημαίνει το τέλος αυτού του δαπανηρού πρωτοτύπου, ενώ με τη χρήση DT, τα προϊόντα μπορούν να αναδημιουργηθούν και να υποβληθούν σε καταστροφικές δοκιμές χωρίς πρόσθετο κόστος υλικού. Έτσι, υποθέτοντας ακόμη και αν το κόστος είναι ίσο στην αρχή, το φυσικό κόστος συνεχίζει να αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο πληθωρισμός αλλά το εικονικό κόστος μειώνεται σημαντικά όσο προχωρά ο χρόνος (Kosseetal., 2022). Η DT επιτρέπει τη δοκιμή προϊόντων σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των καταστροφικών σεναρίων, χωρίς πρόσθετο κόστος. Ακόμη, η DT μπορεί να μειώσει το λειτουργικό κόστος και να παρατείνει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και των περιουσιακών στοιχείων μόλις εφαρμοστεί.

Αξίζει να αναφερθεί πως χρησιμοποιώντας το DT, ο χρήστης είναι σε θέση να προβλέψει τα προβλήματα και τα σφάλματα για τις μελλοντικές καταστάσεις του φυσικού του δίδυμου, παρέχοντάς του την ευκαιρία να σχεδιάσει τα συστήματα ανάλογα. Λόγω των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που ρέουν μεταξύ του φυσικού περιουσιακού στοιχείου και του DT του, μπορεί να προβλέψει προβλήματα σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος (Pateletal., 2022). Αυτό είναι επωφελές ειδικά για προϊόντα που έχουν πολλαπλά μέρη, πολύπλοκες δομές και αποτελούνται από πολλαπλά υλικά όπως αεροσκάφη, οχήματα, εργοστασιακό εξοπλισμό κ.λπ., επειδή όσο αυξάνεται η πολυπλοκότητα οποιουδήποτε προϊόντος, γίνεται δυσκολότερο να προβλεφθούν αστοχίες εξαρτημάτων χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους. Το παραπάνω έχει ως απόρροια την βελτιστοποίηση λύσεων και τη βελτιωμένη συντήρηση. Οι παραδοσιακές μέθοδοι συντήρησης βασίζονται στην ευρετική εμπειρία και τα χειρότερα σενάρια παρά στο συγκεκριμένο υλικό, τη δομική διαμόρφωση και τη χρήση ενός μεμονωμένου προϊόντος, καθιστώντας τα αντιδραστικά και όχι προληπτικά. Ωστόσο, η DT μπορεί να προβλέψει ελαττώματα και ζημιές στη μηχανή ή το σύστημα κατασκευής και έτσι μπορεί να προγραμματίσει τη συντήρηση του προϊόντος εκ των προτέρων. Με την προσομοίωση διαφορετικών σεναρίων, η DT παρέχει την καλύτερη δυνατή λύση ή στρατηγική συντήρησης που κάνει τη συντήρηση του προϊόντος/συστήματος πολύ πιο εύκολη. Επιπλέον, ο σταθερός βρόχος ανάδρασης μεταξύ του DT και του φυσικού του αντίστοιχου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επικύρωση και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας του συστήματος όλη την ώρα (Singh et al., 2021).

Ένα ακόμη πλεονέκτημα των ψηφιακών δίδυμων είναι η προσβασιμότητα. Η φυσική συσκευή μπορεί να ελεγχθεί και να παρακολουθηθεί εξ αποστάσεως χρησιμοποιώντας το DT της. Σε αντίθεση με τα φυσικά συστήματα, τα οποία

περιορίζονται από τη γεωγραφική τους θέση, τα εικονικά συστήματα όπως το DT μπορούν να είναι ευρέως κοινόχρηστα και να είναι προσβάσιμα από απόσταση. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχος εξοπλισμού και συστημάτων καθίσταται αναγκαϊότητα σε μια κατάσταση όπου η τοπική πρόσβαση είναι περιορισμένη (Botín-Sanabriaetal., 2022), όπως κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, όταν τα lockdown έχουν επιβληθεί από τις κυβερνήσεις και η εργασία εξ αποστάσεως ή χωρίς επαφή είναι η μόνη βιώσιμη επιλογή. Πέρα από πιο προσβάσιμο ένα ψηφιακό δίκτυο παρουσιάζεται και ως ασφαλέστερο από το φυσικό αντίστοιχο. Σε βιομηχανίες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο ή η εξόρυξη όπου οι συνθήκες εργασίας είναι ακραίες και επικίνδυνες, η ικανότητα της DT να έχει απομακρυσμένη πρόσβαση στο φυσικό της δίδυμο, καθώς και η προγνωστική φύση της, μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο ατυχημάτων και επικίνδυνων αστοχιών. Ωστόσο, το πλεονέκτημα της DT για απομακρυσμένη πρόσβαση δεν περιορίζεται στην πρόληψη ατυχημάτων. Κατά τη διάρκεια της παγκόσμιας πανδημίας COVID-19, η απουσία ανθρώπινης επαφής και η προσωπική παρακολούθηση είναι επίσης ένας τρόπος να εγγυηθεί κανείς την ασφάλεια (Mashaly, 2021).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται σε διαφορετικού κλάδους, παρουσιάζοντας ποίκιλα πλεονεκτήματα. Στις βιομηχανικές διεργασίες, τα ψηφιακά δίδυμα συμβάλλουν στη μείωση αποβλήτων, καθώς η χρήση τους για προσομοίωση και δοκιμή πρωτοτύπων προϊόντων ή συστημάτων σε εικονικό περιβάλλον μειώνει σημαντικά τη σπατάλη (Qi&Tao, 2018). Τα σχέδια πρωτοτύπων μπορούν να διερευνηθούν και να εξεταστούν εικονικά, κάτω από μια ποικιλία διαφορετικών σεναρίων δοκιμών, για να οριστικοποιηθεί ο σχεδιασμός του τελικού προϊόντος πριν από την κατασκευή του. Αυτό όχι μόνο εξοικονομεί σπατάλη υλικών, αλλά μειώνει επίσης το κόστος ανάπτυξης και τον χρόνο για την αγορά. Από την άλλη

Το DT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και ενδεικτικών προγραμμάτων εκπαίδευσης ασφάλειας από το παραδοσιακό. Πριν από την εργασία σε τοποθεσία υψηλού κινδύνου ή επικίνδυνα μηχανήματα, οι χειριστές μπορούν να εκπαιδευτούν χρησιμοποιώντας ένα DT για τη μείωση των κινδύνων, καθώς η έκθεση και η εκπαίδευση τους σχετικά με διαφορετικές διαδικασίες ή σενάρια θα τους κάνει να έχουν αυτοπεποίθηση για την αντιμετώπιση των ίδιων καταστάσεων αυτοπροσώπως (He&Bai, 2021). Για παράδειγμα, η εξόρυξη είναι ένα περιβάλλον υψηλού κινδύνου όπου οι νέοι εργαζόμενοι μπορούν να εκπαιδευτούν χρησιμοποιώντας DT σε λειτουργίες μηχανημάτων, καθώς και πώς να αντιμετωπίζουν σενάρια έκτακτης ανάγκης. Το DT μπορεί επίσης να είναι ένα εξαιρετικό εργαλείο για την κάλυψη του χάσματος γνώσης από έμπειρους εργαζόμενους στους νεοεισερχόμενους.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας που είναι η επικοινωνία. Για να δημιουργηθεί ένα DT, είναι σημαντικό να συγχρονιστούν δεδομένα διάσπαρτα σε διαφορετικές εφαρμογές λογισμικού, βάσεις δεδομένων, έντυπα αντίγραφα κ.λπ., γεγονός που απλοποιεί τη διαδικασία πρόσβασης και διατήρησης των δεδομένων σε ένα μέρος (Uhlemannetal., 2017). Το DT επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αντιδράσεων του συστήματος και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τεκμηρίωση και την επικοινωνία της συμπεριφοράς και των μηχανισμών του φυσικού δίδυμου.

2^ο Κεφάλαιο – Ευφυείς Λιμένες

2.1. Περιγραφή Ευφυών Λιμένων

Ένα λιμάνι είναι ένας πολύ σημαντικός συγκοινωνιακός σύνδεσμος. Διαδραματίζοντας βασικό ρόλο στην αλυσίδα θαλάσσιων μεταφορών από άκρο σε άκρο, τα λιμάνια διευκολύνουν όχι μόνο τις πλωτές μεταφορές αλλά και ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού και ακόμη και την εθνική οικονομία κάθε χώρας (Douaioui&Mabroukki, 2018). Λόγω της βασικής σημασίας του λιμενικού τομέα στη σημερινή κοινωνία και λόγω του μεγάλου όγκου των επιχειρήσεων που εμπλέκονται, αυτός ο τομέας είναι ζωτικής σημασίας. Επομένως, μια ελαφρά βελτίωση της κερδοφορίας σε αυτόν τον τομέα, όποια κι αν είναι, θα έχει τεράστιες επιπτώσεις. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή του smartconcept στον λιμενικό τομέα είναι ιδιαίτερα σημαντική. Κατά συνέπεια, γεννήθηκε ο όρος «Έξυπνο λιμάνι».

Ο χαρακτηρισμός «Έξυπνο λιμάνι» έχει δημιουργήσει μεγάλο ενδιαφέρον σε όλα τα ενεργά λιμάνια, γιατί αποτελεί τη βάση για την ανάπτυξη και την επιβίωση κάθε μελλοντικού λιμανιού. Με την έλευση του Industry 4.0, οι ψηφιακές τεχνολογίες όπως το Internet of Things (IoT), τα μεγάλα δεδομένα, το cloud computing και η τεχνητή νοημοσύνη (AI) εμπλέκονται συνήθως σε κάθε πτυχή των αλυσίδων εφοδιασμού (Triskaetal., 2022). Ζητήματα που αφορούν τα λιμάνια, όπως λειτουργικά σφάλματα, συμφόρηση, καθυστερήσεις, έλλειψη πληροφοριών και περιβαλλοντικά και ενεργειακά προβλήματα, μπορεί να επιδεινώσουν την περαιτέρω ενσωμάτωση του Industry 4.0 σε άλλους σχετικούς κλάδους. Έτσι, ένας έξυπνος λιμένας έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίζει αυτά τα ζητήματα.

Ακολουθώντας την ιδέα των Έξυπνων Πόλεων, των οποίων οι υποθέσεις περιλαμβάνουν τη καθολική πρόσβαση σε πληροφορίες για την πόλη, την

αποτελεσματική επικοινωνία και τη φροντίδα του περιβάλλοντος ήρθε η ώρα για την έννοια των Ευφυών Λιμένων. Ενώ η ιδέα της Έξυπνης Πόλης ήταν γνωστό εδώ και αρκετά χρόνια, όσο αναφορά τους έξυπνους λιμένες είναι μια ιδέα χωρίς πολύ συγκεκριμένο ορισμό (Pinetal., 2019). Η ιδέα των αυτών δεν είναι μόνο η διαχείριση των τεχνολογικών διαδικασιών, αλλά και η ψηφιοποίηση, η αύξηση της αποτελεσματικότητας των λειτουργιών στα λιμάνια, η ενοποίηση λιμένων με πόλεις και η απόκτηση ενέργειας από εναλλακτικές πηγές. Το λιμάνια αυτά αποτελούν ένα νέο μοντέλο διαχείρισης, περιλαμβάνοντας μια σειρά από καινοτόμα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε τεχνολογικό και σε οργανωτικό επίπεδο (Karas, 2020).

Πιο αναλυτικά, ο λιμένας θα πρέπει να αποφέρει οφέλη στους ενδιαφερόμενους και στις λιμενικές αρχές. Ενώ, η αγορά είναι γεμάτη από τεχνολογίες και πολλές από αυτές έχουν καθολική εφαρμογή, τα λιμάνια ποικίλλουν στις δραστηριότητές τους και συνήθως χρειάζονται εξατομικευμένες λύσεις. Άλλες λύσεις απαιτούν καθολική εφαρμογή και άλλα λιμάνια ειδικεύονται στην εξυπηρέτηση αυστηρά καθορισμένων φορτίων, όπως είναι τα λιμάνια που το αργό πετρέλαιο και τα προϊόντα πετρελαίου είναι τα κύρια φορτία. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό όλοι οι εμπλεκόμενοι να συνεργαστούν για την εφαρμογή των κατάλληλων εργαλείων (Lee, 2020). Ένα ευφυές λιμάνι στοχεύει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του μέσω της χρήσης λύσεων που βασίζονται στην τεχνολογία. Αν και ο όρος «έξυπνο λιμάνι» άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρθηκε ο ακριβής ορισμός του παραμένει ασαφής. Η κοινώς αποδεκτή ιδέα ενός έξυπνου λιμένα είναι ένας εξοπλισμένος με νέες τεχνολογικές λύσεις, όπως ένα σύστημα εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο σε όλο το λιμάνι, έξυπνες λύσεις ασφάλειας λιμένων, βελτιωμένη παρακολούθηση και συστήματα εντοπισμού, αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID), συστήματα GPS, τρισδιάστατους σαρωτές και αυτόνομα ρομπότ. Ωστόσο, αν και η έννοια της έξυπνης

θύρας έχει αναφερθεί από πολλούς ερευνητές, ο ορισμός της και η τεχνολογία που εμπλέκεται είναι κατακερματισμένες, χωρίς σαφή και ολοκληρωμένη επιστημονική εργασία (Karaś, 2020).

Πιο συγκεκριμένα, ένας ευφυής λιμένας βασίζεται στη χρήση νέων τεχνολογιών για τη μετατροπή των λιμενικών υπηρεσιών σε διαδραστικές και δυναμικές υπηρεσίες, οι οποίες είναι πιο αποτελεσματικές και διαφανείς. Στόχος του είναι να ικανοποιεί τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των πελατών και των χρηστών (Clementeetal., 2023). Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί πως η βιωσιμότητα του λιμανιού, από περιβαλλοντική άποψη, εντάσσεται ως θεμελιώδης πυλώνας, καθώς και ο προσανατολισμός της προς την πόλη και τον πολίτη, για την παροχή ποιοτικών χώρων και υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, τα λιμάνια που περιγράφονται σε αυτή την ενότητα έχουν σχεδιαστεί για να ενσωματώνονται πλήρως με την έννοια της Έξυπνης Πόλης.

Όπως αναφέρεται παραπάνω, η χρήση νέων τεχνολογιών θα καταστήσει δυνατό το λιμάνι του μέλλοντος. Ως εκ τούτου, το σύστημα λιμένων θα συμβαδίζει με τη μεταφορά δεδομένων και τα συστήματα μεγάλων δεδομένων, των οποίων η εφαρμογή θα επιτρέψει τον πλήρη μετασχηματισμό σε πολλούς τομείς (Heikkiläetal., 2022). Στην περίπτωση των οικονομικών τομέων, όσο μεγαλύτερη είναι η αποτελεσματικότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα των θαλάσσιων μεταφορών και η βελτίωση των μεταφορών και της διαχείρισης του συγχρονισμού των εμπορευμάτων, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση στην τελική τιμή του προϊόντος, παρουσιάζοντας μεγαλύτερη εμπορική κερδοφορία. Όσο αναφορά, τον θεσμικό τομέα, οι Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) θα επιτρέψουν την απλοποίηση και μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και ασφάλεια στη διαχείριση λιμένων. Βελτιώνει τις σχέσεις και τη μετάδοση πληροφοριών μεταξύ οντοτήτων. Επιπλέον, θα είναι δυνατός ο

μεγαλύτερος έλεγχος των εισερχόμενων και εξερχόμενων εμπορευμάτων, με την προϋπόθεση βελτίωσης της τελωνειακής ασφάλειας των χωρών (Yauetal., 2020).

Στον κοινωνικό τομέα, ένα ευφυής λιμάνι θα πρέπει να σχεδιαστεί και από τον πολίτη, τοποθετώντας τον ως το επίκεντρο του μελλοντικού λιμανιού. Έτσι, το λιμάνι πρέπει να ενσωματωθεί βιώσιμα με την πόλη ή το περιβάλλον, παρέχοντας χώρους για τη χρήση των πολιτών, προάγοντας τη σχέση του με τη θάλασσα και επιτρέποντας την απόλαυσή του (Clementeetal., 2023). Για παράδειγμα, η διαχείριση των λιμένων πρέπει να είναι διαφανής και ανοιχτή και να χρειάζεται να παρέχει πλατφόρμες ή εφαρμογές υπολογιστών, επιτρέποντας στους πολίτες να γνωρίζουν τις καθημερινές δραστηριότητες στο λιμάνι και να είναι μέρος αυτών.

Τέλος, ο περιβαλλοντικός τομέας είναι στενά συνδεδεμένος με τον κοινωνικό. Ο λόγος είναι ότι ένα λιμάνι πρέπει να ασκεί τις δραστηριότητές του, ενώ προσπαθεί να μειώσει τις αρνητικές επιπτώσεις στη ζωή των πολιτών και στο περιβάλλον του λιμανιού. Ως εκ τούτου, θα είναι διαθέσιμες τεχνολογίες για τη ρύθμιση των λιμενικών δραστηριοτήτων, όπως η επεξεργασία επικίνδυνων ή σκονισμένων ουσιών, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τα υψηλότερα δυνατά πρότυπα ασφαλείας (Chenetal., 2019). Ταυτόχρονα, θα πρέπει να υπάρχουν περιοδικές αναλύσεις ή έλεγχοι για την παρακολούθηση της μόλυνσης ή της απόρριψης επικίνδυνων ουσιών στο λιμάνι. Μετρούν την ποιότητα του νερού ή την πιθανή μόλυνση που μπορεί να προκληθεί από σκάφη που θέλουν να το χρησιμοποιήσουν. Η τεχνολογία θα διαδραματίσει επίσης σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό και τον έλεγχο πιθανών κινδύνων στις θαλάσσιες μεταφορές, για παράδειγμα, στον εντοπισμό δυσμενών καιρικών συνθηκών ή ξαφνικής διαρροής επικίνδυνων ουσιών (Heikkiläetal., 2022).

2.2. Λειτουργίες Έξυπνων Λιμανιών

Υπάρχουν πέντε κύριες εφαρμογές των ευφυών λιμένων, οι οποίοι κατατάσσονται ως εξής:

- Η έξυπνη διαχείριση σκαφών διαχειρίζεται τα πλοία, συμπεριλαμβανομένης της επιλογής διαδρομών και λιμανιών, με βάση την τοποθεσία και την κυκλοφορία των λιμένων, προκειμένου να βελτιώσει την ακρίβεια των αφίξεων στα λιμάνια. Με βάση μια μελέτη, το 48% των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων φθάνει τουλάχιστον 12 ώρες πίσω από το χρονοδιάγραμμα (Yauetal., 2020), γεγονός που αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου και προκαλεί τη μικρότερη χρησιμοποίηση των πόρων του τερματικού σταθμού. Ως εκ τούτου, η έξυπνη διαχείριση σκαφών συμβάλλει στη μείωση του χρόνου αναμονής και αδράνειας των σκαφών, κάτι που μπορεί να είναι δαπανηρό.

- Η έξυπνη διαχείριση εμπορευματοκιβωτίων διαχειρίζεται την απόκτηση, την παρακολούθηση, τη μεταφορά, την αποθήκευση και την επανατοποθέτηση εμπορευματοκιβωτίων, καθώς και τη μεταφόρτωση κατά την οποία τα εμπορευματοκιβώτια μεταφέρονται από το ένα σκάφος στο άλλο (Castellanoetal., 2019). Αυτό μειώνει τον χρόνο που ξοδεύει ένα σκάφος σε ένα λιμάνι και ως εκ τούτου βελτιστοποιεί τις υπηρεσίες logistics και μπορεί να μειώσει έως και 10% το λειτουργικό κόστος. Επιπλέον, επιτρέπει την παρακολούθηση των συνθηκών, όπως για παράδειγμα εάν υπάρχουν περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης, όπως κραδασμοί και πτώσεις εύθραυστων εμπορευμάτων· και εάν υπήρξε έκθεση σε πυρκαγιά ή πλημμύρα. Οι πληροφορίες του συμβάντος, όπως η τοποθεσία και η ώρα του συμβάντος, μπορούν να παρακολουθούνται και να πραγματοποιούνται και απαραίτητες

ενέργειες, όπως για παράδειγμα η αποστολή μηνυμάτων προειδοποίησης στους ενδιαφερόμενους φορείς (Yauetal., 2020).

- Η έξυπνη διαχείριση λιμένων βελτιστοποιεί τις λιμενικές υπηρεσίες, όπως επιθεώρηση εμπορευμάτων, εκτελωνισμό, σχεδιασμό μεταφοράς, διαδικασίες και εφαρμογές, όπως η μεταφόρτωση, η εμπορική άδεια, καθώς και άδειες εισαγωγής και εξαγωγής, η εξυπηρέτηση πελατών, η ανταλλαγή πληροφοριών αγοράς και η παροχή ασφαλειών (Douaiouietal., 2018).

- Η έξυπνη διαχείριση ενέργειας μειώνει τη σταθερή κατανάλωση ενέργειας που προκύπτουν από τις λειτουργικές υποδομές στους λιμενικούς τερματικούς σταθμούς, τις αυλές και τους χώρους γραφείων, καθώς και η μεταβλητή κατανάλωση ενέργειας που αυξάνεται με το επίπεδο δραστηριότητας του λιμένα, όπως αυτές που προκύπτουν από τον εξοπλισμό και τις υποδομές (Lam&Van de Voorde, 2012). Για παράδειγμα, τα λιμάνια της Βαλένθια και του Αμβούργου είναι εξοπλισμένα με φώτα ευαίσθητα στην κίνηση που ανάβουν όταν περνούν οχήματα - έχει αποδειχθεί ότι ένα τέτοιο σύστημα φωτισμού μειώνει την κατανάλωση ενέργειας έως και 80% (Joníetal., 2019).

- Η έξυπνη διαχείριση πόρων προγραμματίζει και κατανέμει πόρους, συμπεριλαμβανομένου εξοπλισμού και υποδομών, όπως εμπορευματοκιβωτίων, περονοφόρων ανυψωτικών κ.α. για τη μείωση της συμφόρησης και τον εντοπισμό των πηγών συμφόρησης, προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η προμήθεια και η κατανομή των πόρων από άποψη χρόνου και κόστος. Αυτό βοηθά στη μείωση της σπατάλης πόρων και του χρόνου αναμονής και αδράνειας (Yauetal., 2020).

2.3. Η εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων σε αυτά

Η Τεχνολογία Ψηφιακών Διδύμων βρίσκεται ακόμη σε αρχικό στάδιο όταν εξετάζεται ο ναυτιλιακός τομέας. Λιγότερες ερευνητικές εργασίες έχουν διεξαχθεί σε σύγκριση με άλλους βιομηχανικούς τομείς, αλλά οι ερευνητές έχουν εντοπίσει τις δυνατότητες αυτής της καινοτόμου ιδέας και τα DT αναπτύσσονται για διάφορες θαλάσσιες εφαρμογές, όπως πλοία επιφανείας, υποβρύχια οχήματα, πλατφόρμες ανοικτής θαλάσσης, παράκτιοι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί, κ.λπ. Εκτός από τα περιγραφόμενα παραδείγματα, τα όρια στην εφαρμογή της τεχνολογίας DT είναι απεριόριστα, με πολλές πιθανές εφαρμογές σε ολόκληρο τον θαλάσσιο τομέα (Wangetal., 2022). Ωστόσο, η εφαρμογή πρέπει να γίνει από τη ναυτιλιακή βιομηχανία με μια προσέγγιση με γνώμονα τις ευκαιρίες. Αυτές οι εφαρμογές DT προορίζονται να βελτιώσουν τις υπάρχουσες λειτουργίες στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ενώ πολλές νέες καινοτομίες μπορούν επίσης να βρεθούν με επαναστατικές επιδόσεις.

Οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες που έχουν δημοσιευθεί για την τεχνολογία DT μέχρι στιγμής βασίζονται στην ανάπτυξη νέων εννοιών της τεχνολογίας DT στην κατασκευή, ενώ μόνο λίγες βασίζονται σε πρακτικές περιπτώσιολογικές μελέτες (Klaretal., 2023). Πιο συγκεκριμένα, η DNV GL έχει δοκιμάσει ένα πλήρως αυτόνομο σκάφος ιδέας μήκους 60 μέτρων, το ReVolt, το οποίο είναι ένα μεταφορέα φορτίου που λειτουργεί με μπαταρίες με μηδενικό πλήρωμα. Το DT αποτελεί αναπόσπαστο μέρος του σχεδιασμού και της δοκιμής αυτού του εννοιολογικού σκάφους και το ίδιο θα χρησιμοποιηθεί κατά τη λειτουργία του σκάφους. Η δοκιμή των ζωτικών συστημάτων πραγματοποιείται με τη χρήση του DT του σκάφους ιδέας, το οποίο έχει εξοικονομήσει χρόνο και χρήμα (Ahnetal., 2019). Το ίδιο ίδρυμα παρέχει επίσης μια λύση δικτύωσης cloud, το Veracity, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό, την πρόσβαση και τον χειρισμό των δεδομένων στο DT. Ομοίως, η

Siemens ξεκίνησε επίσης το εγχείρημα Mindsphere, το οποίο διαθέτει δυνατότητες διακυβέρνησης και διαχείριση δεδομένων υπό την έννοια του Maritime DataSpace (MDS), η οποία βασίστηκε αρχικά στην ιδέα του μοντέλου Industrial DataSpace (IDS) (Mi&Liu, 022). Εν τω μεταξύ, επιτρέπει επίσης τη διενέργεια κρίσιμων δοκιμών για την ασφάλεια και ελιγμών υψηλού κινδύνου για οποιονδήποτε αριθμό προσπαθειών όπως επιθυμείτε σε όλες τις διαφορετικές συνθήκες, κάτι που θα ήταν ένα τρομακτικό έργο σε ένα φυσικό μοντέλο. Η χρήση των ιστορικών δεδομένων κατά τη φάση λειτουργίας χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων υπό διάφορες συνθήκες, όπως η θέση, οι δυναμικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες, η ταχύτητα, οι συνθήκες φορτίου κ.λπ. Περαιτέρω, το εργαλείο διαχείρισης κινδύνου «Πιθανοτικό Δίδυμο» που χρησιμοποιείται από την DNV-GL στοχεύει επίσης στην πρόβλεψη των πιθανών ατυχημάτων/ζημιών με βάση την ανάλυση προηγούμενων δεδομένων και τάσεων ως επέκταση της υπάρχουσας λύσης BlueDenmark DT (Philipp, 2021). Συμπερασματικά, αξίζει να αναφερθεί πως η ύπαρξη ενός μη επανδρωμένου σκάφους σε σύνδεση με το DT θα αφαιρέσει τον παράγοντα ανθρώπινου σφάλματος στη λειτουργία του πλοίου και ο χώρος του πληρώματος μπορεί να εξοικονομηθεί για ζωτικό χώρο φορτίου. Η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και η απαλλαγή από τα επιπλέον έξοδα συντήρησης είναι κι άλλα πλεονεκτήματα ενός συστήματος που βασίζεται σε DT. Ο έλεγχος των εκπομπών είναι επίσης ένα τεράστιο όφελος σε ένα τέτοιο σύστημα. Η μείωση των μηχανημάτων και των κινητών μερών θα μειώσει περαιτέρω τον χρόνο διακοπής λειτουργίας για συντήρηση/επισκευές, θα μειώσει τους ανθρώπινους θανάτους και θα είναι οικονομικά αποδοτική. Το σκάφος μπορεί επίσης να σχεδιαστεί σε πιο αεροδυναμικό σχήμα λόγω της απουσίας της τεράστιας υπερκατασκευής που χρησιμοποιείται για τη διαμονή του πληρώματος και τη γέφυρα (Wangetal., 2022).

Η εξοικονόμηση κόστους είναι ένα κύριο πλεονέκτημα της χρήσης του DT, καθώς η Προγνωστική Συντήρηση βάσει Συνθηκών (CBPM) τροφοδοτείται εκτενώς με δικτυωμένους αισθητήρες, ενεργοποιητές και συστήματα ελέγχου που λειτουργούν στη βέλτιστη κατάστασή τους (Nayaketal., 2019). Η Προγνωστική Διαχείριση Υγείας (Prognostic Health Management - PHM) χρησιμοποιείται με την προβολή της κατάστασης του μηχανήματος με ακριβή πιστότητα δεδομένων, παρέχοντας περαιτέρω πληροφορίες για τους τρόπους αποτυχίας, τις ρυθμίσεις κατωφλίου, τους δείκτες υγείας και τους κινδύνους. Επιπλέον, βελτιώνει περαιτέρω την προβλεψιμότητα και τη διαχείριση του συνεχούς ποιοτικού ελέγχου σε πραγματικό χρόνο των κρίσιμων μερών κινητήρων ντίζελ πλοίων (MDE) με δυναμικό έλεγχο ποιότητας ξεκινώντας από το στάδιο της μηχανικής κατεργασίας των εξαρτημάτων. Τα ιστορικά δεδομένα που προέρχονται από το DT είναι χρήσιμα για τον υπολογισμό της Υπόλοιπης Χρήσιμης Ζωής των κρίσιμων για την αποστολή στοιχείων των συστημάτων του πλοίου (Chengetal., 2010). Κρίσιμα εξαρτήματα όπως ο κύριος κινητήρας μπορούν να μοντελοποιηθούν ψηφιακά ως μοντέλο μέσης τιμής κύκλου (CMV), επιτρέποντας την παρακολούθηση της απόδοσης τόσο σε σταθερή κατάσταση όσο και σε μεταβατική απόκριση. Με την αυξανόμενη ορατότητα μαζί με το συγχρονισμό μοντέλων υψηλής πιστότητας σε πραγματικό χρόνο, η παρακολούθηση του φυσικού συστήματος μπορεί εύκολα να βελτιωθεί. Η μείωση του χρόνου που απαιτείται για τη δοκιμή και την ανάπτυξη του συστήματος οδήγησε στη μείωση του χρόνου στην αγορά, εξαλείφοντας τους κινδύνους αστοχιών σχεδιασμού. Η DT μπορεί να προσφέρει μια ολοκληρωμένη εμπειρία χρήστη ακόμη και πριν από την πραγματική παραγωγή. Ολόκληρη η λειτουργία ενός πλοίου εντός της συνολικής διάρκειας ζωής μπορεί να χειριστεί κατά τη φάση σχεδιασμού με την υποστήριξη του DT του από την άποψη πολλών χρηστών (Επιβάτες, Πλήρωμα, Ιδιοκτήτρια Εταιρεία). Επιπλέον, η σύνδεση σε πραγματικό

χρόνο διασφαλίζει τη βέλτιστη λειτουργία του πραγματικού συστήματος με τη δυνατότητα ανάλυσης της απόδοσης του φυσικού μοντέλου, αξιολογώντας περαιτέρω τα υπάρχοντα μηχανήματα του πλοίου με την υποστήριξη της μηχανικής εκμάθησης με μια ποσοτική αξιολόγηση της υποβάθμισης των εξαρτημάτων (Mi&Liu, 2022). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έξυπνη διάγνωση με ένα συμπερασματικό μοντέλο απόφασης που οδηγεί σε πιο ακριβείς προβλέψεις.

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως όχι μόνο οι θαλάσσιες μονάδες, αλλά και οι παράκτιες εγκαταστάσεις έχουν προδιάθεση για DT με τις προόδους στη Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίων (BIM) με αυξημένη διαλειτουργικότητα, σχεδιασμό, κατασκευή και συντήρηση (Kurriyanovskiyetal., 2018). Μια τεράστια γκάμα αισθητήρων από το κτίριο είναι σε θέση να τροφοδοτήσει γενικά δεδομένα εισαγωγής στην πρόσοψη DT της κατασκευής, η οποία θα υποβληθεί σε επεξεργασία για την προβλεπόμενη έξοδο για τον έλεγχο της λειτουργίας, τον περιβαλλοντικό έλεγχο του χώρου και άλλες εργονομίες. Ήδη υλοποιήσεις εκτελούνται σε έννοιες έξυπνων οικιών, οι οποίες είναι εξαιρετικά επιτυχημένες στην επίτευξη του επιδιωκόμενου αποτελέσματος. Επιπλέον, η Έξυπνη Κατασκευή (Intelligent Manufacturing) χρησιμοποιεί μια αυτόνομη πλατφόρμα που βασίζεται στη γνώση, η οποία λειτουργεί με δυναμικές βάσεις γνώσης μαζί με ένα μοντέλο DT (Mi&Liu, 2022). Για παράδειγμα, το έργο «smartBRIDGE» που ξεκίνησε από τη Λιμενική Αρχή του Αμβούργου, στη Γερμανία, έχει εφαρμόσει DT με βάση το BIM για την παρακολούθηση των λειτουργιών της υποδομής και της διαδικασίας επέκτασης σε τοίχους, κλειδαριές και άλλα λιμενικά στοιχεία υποδομής. Αυτές οι έξυπνες τεχνολογίες αναμένεται να προωθήσουν σε μεγαλύτερο βαθμό την αυτοδικία, την αυτο-εφαρμογή και την αυτο-ανάπτυξη στην αυτόνομη κατασκευή στη ναυτιλιακή βιομηχανία (Wenneretal., 2022). Ομοίως, το εργοστασιακό σχεδιαστικό πλαίσιο είναι

επίσης δυνατό με αύξηση της παραγωγικότητας μαζί με βελτιστοποιημένη χρήση δαπέδου με DT βασισμένη σε αρθρωτά. Σε μια τέτοια λειτουργία, μπορεί να αναπτυχθεί σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Αποθήκης (WMS) με δυνατότητα προσαρμογής της διαδικασίας ως Εργαλείο Υποστήριξης Αποφάσεων (DST) (DuetaI., 2022). Μπορεί να συνδέσει τις διαφορετικές αλυσίδες αξίας με την εύκολη ενσωμάτωση του συστήματος από τη σχεδίαση και την παραγωγή στα τελευταία στάδια του κύκλου ζωής ενός εξαρτήματος. Στο ναυτιλιακό τμήμα, τα ναυπηγεία σε όλο τον κόσμο θα είναι οι κύριοι δικαιούχοι μιας τέτοιας λύσης που βασίζεται σε DT. Περαιτέρω, η λύση DT θα επιτρέψει τον χειρισμό κρίσιμων λειτουργιών ενός σκάφους που λειτουργεί σε μακρινή τοποθεσία από τους ειδικούς σε μια βάση στην ξηρά σε περιβάλλον επαγόμενο από την επαυξημένη πραγματικότητα (Mi&Liu, 2022). Αυτό μπορεί να είναι μια εργασία ρουτίνας σε κρίσιμη εργασία συντήρησης ή κατασκευής, η οποία μπορεί να απαιτεί την παρέμβαση ενός ειδικού χειριστή από μια μακρινή τοποθεσία.

Το DT μπορεί να ενσωματωθεί στην εκπαίδευση ή σε συστήματα εκπαίδευσης που βασίζονται σε υπολογιστή. Οι Προσομοιωτές PartTask χρησιμοποιούν συχνά λύσεις βασισμένες στο Hardware In the Loop (HIL) με πραγματικές εγκαταστάσεις που λειτουργούν παράλληλα με μια εικονική πλατφόρμα (Mi&Liu, 2022). Αυτές οι πλατφόρμες μπορούν να εξασφαλίσουν την ασφάλεια του προσωπικού (εκπαιδευτές/εκπαιδευόμενοι) μαζί με την εμπλοκή κρίσιμων λειτουργιών χωρίς να θέσουν σε κίνδυνο ακριβές πλατφόρμες της πραγματικής ζωής. Η DNV-GL χρησιμοποιεί δοκιμές HIL, ολοκλήρωση και βελτιστοποίηση νέων συστημάτων ελέγχου με πλατφόρμα προσομοίωσης που βασίζεται σε DT και αργότερα προχωρά στην πραγματική παραγωγή με ολοκληρωμένες εκτελέσιμες λύσεις. Οι σχεδιαστές και οι κατασκευαστές εξοπλισμού θα παρέχουν και θα μοιράζονται εξαρτήματα μοντέλων

με τον ναυπηγό όπου θα δοκιμαστεί η πλήρης εξάρτηση, οδηγώντας σε λιγότερα σφάλματα και τροποποιήσεις κατά την κατασκευή (Min, 2022). Ένα μοντέλο DT μπορεί να αναπτυχθεί για να αντιμετωπίσει ένα συγκεκριμένο πρόβλημα ή μπορεί να αξιοποιηθεί ως ανοιχτή πηγή δεδομένων έτοιμη να χειριστεί από ανθρώπινες, επιχειρησιακές και περιβαλλοντικές διαστάσεις ενός σκάφους ή οποιασδήποτε άλλης θαλάσσιας πλατφόρμας. Αποτελεί κρίσιμο πλεονέκτημα για τη διευκόλυνση μελλοντικών τεχνολογικών προόδων στις λειτουργίες που βασίζονται σε δεδομένα. Ακόμη και η παραγωγή ενός υποκατάστατου μοντέλου είναι επίσης δυνατή χρησιμοποιώντας το αρχικό μοντέλο DT, το οποίο μπορεί να μιμηθεί τη λειτουργία με μικρότερο υπολογιστικό φορτίο, επιτυγχάνοντας την επιδιωκόμενη απόδοση (Yaoetal., 2021). Η αύξηση της αφοσίωσης των χρηστών είναι ένα άλλο πλεονέκτημα ενός ναυτικού συστήματος που βασίζεται σε DT. Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού του προϊόντος, το μοντέλο DT μπορεί να δοκιμαστεί για να ελεγχθεί εικονικά η αλληλεπίδραση μεταξύ του χειριστή και του φυσικού μοντέλου. Από αυτό, τα δεδομένα μπορούν να συσσωρευτούν και να υποβληθούν σε επεξεργασία ώστε να αντικατοπτρίζουν τις συνήθειες των χρηστών και τα ίδια μπορούν να ενσωματωθούν για τη βελτίωση του φυσικού μοντέλου με αφελείς καινοτομίες. Το DT λειτουργεί ως κόμβος για τεχνολογίες όπως BigDataAnalytics, IoT, μηχανική μάθηση, προσομοίωση, μοντελοποίηση κ.λπ., παρέχοντας μια πύλη για την επίτευξη πολύ πιο περίπλοκης αναλυτικής ισχύος στους χειριστές και τους προγραμματιστές με τα δεδομένα ανίχνευσης του πραγματικού φυσικού μοντέλου σε αντίθεση με δεδομένα προσομοίωσης και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης.

Τέλος, το DT εφαρμόζεται ευρέως σε ναυτικά μέσα όπως πολεμικά πλοία, υποβρύχια, θαλάσσια αεροσκάφη κ.λπ. Η δοκιμή HIL εκτελείται για το NavalShipCombatSurvivabilityTestbed (NSCST), το οποίο είναι μια πλατφόρμα

προσομοίωσης ελέγχου πλεονασμού συστήματος παραγωγής ενέργειας σε πολεμικά πλοία το ναυτικό των ΗΠΑ. Αυτοί οι προσομοιωτές που βασίζονται σε DT, υποβάλλονται σε δοκιμές ελέγχου μεμονωμένων ενεργοποιητών υποσυστήματος, δοκιμές ολοκλήρωσης πολλαπλών υποσυστημάτων, δοκιμές κύριου εποπτικού ελέγχου και δοκιμές ελέγχου χρήστη (Dufouretal., 2018). Επιπλέον, τα νέα ναυτικά αεροπορικά μέσα επιδεικνύονται χρησιμοποιώντας το DT τους, το οποίο χρησιμοποιείται ως εργαλείο από υποψήφιους εργολάβους για να παρουσιάσουν τα προϊόντα τους στη Ναυτική Αεροπορική Διοίκηση. Το «Spiraldevelopmentproject» στα ναυπηγεία PearlHarbor και Portsmouth στις ΗΠΑ έχει βελτιστοποιήσει τις δοκιμές σκαφών χρησιμοποιώντας μια νέα προσέγγιση που βασίζεται στο DT. Οι νέες φρεγάτες κλάσης F110 που αναπτύχθηκαν από τη Navantia στην Ισπανία, χρησιμοποίησαν το DT ως αποτελεσματικό εργαλείο διαχείρισης του κύκλου ζωής για την αντιμετώπιση της παρακολούθησης της κατάστασης, της συντήρησης και της αντίδρασης ατυχήματος ή μιας βλάβης (Madusankaetal., 2023).

2.4. Προηγμένες Τεχνολογίες που εφαρμόζουν

2.4.1. Πλατφόρμα Internet of Things (IoT) σε έξυπνους λιμένες

Η χρήση πλατφορμών IoT έχει προταθεί για τη δημιουργία μιας διασυνδεδεμένης και συνεργατικής πλατφόρμας που επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ετερογενούς εξοπλισμού και υποδομών προκειμένου να αναπτυχθούν έξυπνες εφαρμογές (Belfkihetal., 2017). Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας IoT τυπικά αποτελείται από τέσσερα κύρια επίπεδα για να ενσωματωθούν τα τέσσερα κύρια στοιχεία ενός συστήματος πληροφοριών.

Πρώτον, το επίπεδο απόκτησης δεδομένων που αποτελείται από ετερογενείς συσκευές ανίχνευσης και ανίχνευσης, οι οποίες ανιχνεύουν, αναγνωρίζουν και συλλέγουν ένα ευρύ φάσμα δεδομένων, πληροφοριών και αντικειμένων. Δεύτερο είναι

το επίπεδο μεταφοράς και επεξεργασίας δεδομένων που συνδέει το επίπεδο απόκτησης δεδομένων με την υπολογιστική πλατφόρμα, τα οποία χρησιμεύουν ως κέντρα διαχείρισης και πληροφοριών, προκειμένου να επεξεργαστούν τα τεράστιο όγκο δεδομένων που συλλέγονται. Η σύνδεση γίνεται μέσω της πλατφόρμας επικοινωνίας (Brackeetal., 2021). Τρίτον, το επιχειρηματικό επίπεδο υλοποιεί έξυπνες εφαρμογές. Για παράδειγμα, τα δεδομένα RFID χρησιμοποιούνται για την καταχώρηση ενός κοντέινερ όταν πλησιάζει μια πύλη πρόσβασης. Ενώ, τέταρτο είναι το επίπεδο παρουσίασης αποτελείται από συσκευές χρήστη, όπως smartphones, για επικοινωνία (Belfkijetal., 2017).

Παρά την επείγουσα ανάγκη ανάπτυξης και υποστήριξης διαφόρων έξυπνων εφαρμογών, υπάρχει σχετικά λίγη δουλειά για το σχεδιασμό πλατφορμών IoT για έξυπνες εφαρμογές σε έξυπνους λιμένες. Θα μπορούσαν να συνεχιστούν οι περαιτέρω έρευνες για το σχεδιασμό πλατφορμών IoT για την ανάπτυξη και υποστήριξη διαφόρων έξυπνων εφαρμογών που μπορούν να εκτελέσουν διάφορες εργασίες, όπως η διαχείριση έξυπνων σκαφών, εμπορευματοκιβωτίων, λιμένων και ενέργειας (Duránetal., 2019).

2.4.2. Εφαρμογή Δεδομένων AIS για Βελτίωση Λειτουργικής Απόδοσης

Το AIS είναι ένα αυτόματο σύστημα παρακολούθησης σκαφών, το οποίο έχει εξουσιοδοτηθεί από τον IMO από το 2004. Κάθε σκάφος είναι εγκατεστημένο με έναν αναμεταδότη AIS που ανταλλάσσει χωροχρονικά δεδομένα, για παράδειγμα τον προορισμό, το γεωγραφικό μήκος, το γεωγραφικό πλάτος, τη ταχύτητα εδάφους, τη κατεύθυνση και τον εκτιμώμενο χρόνο άφιξης των σκαφών στα λιμάνια, αλλά και δεδομένα αισθητήρων, όπως είναι η θερμοκρασία, το βάθος θάλασσας και η ταχύτητα ανέμου με τα γύρω σκάφη και τους σταθμούς βάσης AIS στην ξηρά (Rajabietal., 2018). Τα πλοία χρησιμοποιούν δεδομένα AIS για να παρακολουθούν τις τοποθεσίες τους για

σκοπούς πλοήγησης και ασφάλειας, δηλαδή πρόληψης ατυχημάτων. Στα έξυπνα λιμάνια, τα δεδομένα AIS έχουν χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του χρόνου άφιξης των πλοίων, αλλά και την ανάλυση της κυκλοφορίας.

1) Εφαρμογή δεδομένων AIS για συλλογή πληροφοριών πλοίων σε τερματικά του Smart Port

Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζεται ένα σύστημα συλλογής δεδομένων AIS για τη συλλογή δεδομένων AIS της κίνησης, την αφαίρεση της ανακρίβειάς τους, την επαλήθευση του αθροίσματος ελέγχου και την αποθήκευση των δεδομένων στο λιμάνι της Χάβρης, που είναι ένα από τα κύρια λιμάνια της Γαλλίας. Στη συνέχεια, τα δεδομένα AIS χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των τύπων εμπορευματικών πλοίων με βάση τα μεγέθη τους και τον αριθμό διαφορετικών τύπων εμπορευματικών πλοίων σε κάθε τερματικό σταθμό, συμβάλλοντας στην έξυπνη διαχείριση λιμένων (Belfkihetal., 2017). Οι πληροφορίες είναι σημαντικές για την κατανόηση των λιμενικών λειτουργιών, όπως οι χρόνοι αναμονής και διεκπεραίωσης των πλοίων, και ως εκ τούτου το επίπεδο συμφόρησης των διαφορετικών τερματικών σταθμών. Επομένως, οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό των δημοφιλών θέσεων αποβάθρας για διαφορετικούς τύπους εμπορευματικών πλοίων. Για παράδειγμα, μια αποβάθρα που παρέχει εργασίες φόρτωσης, εκφόρτωσης και μεταφόρτωσης σε μεγάλο αριθμό μεγάλων εμπορευματικών πλοίων δεν εξυπηρετεί μικρά πλοία, γεγονός που μπορεί να αυξήσει τον χρόνο αναμονής και το κόστος των μεγάλων εμπορευματικών πλοίων. Θα μπορούσε να συνεχιστεί περαιτέρω έρευνα για να σχεδιαστεί ένα σχέδιο προγραμματισμού για την κατανομή διαφορετικών τύπων εμπορευματικών πλοίων σε διαφορετικές αποβάθρες σε έναν τερματικό σταθμό.

2) Εφαρμογή Δεδομένων AIS για Εκτίμηση Τροχιών Πλοίων

Ένα σύστημα συλλογής δεδομένων AIS για τη συλλογή και αποθήκευση των δεδομένων AIS της κυκλοφορίας των πλοίων εφαρμόζεται στα λιμάνια του Λονγκ Μπιτς και του Λος Άντζελες. Στη συνέχεια, τα δεδομένα AIS χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της μελλοντικής θέσης και της τροχιάς των πλοίων σε διαύλους μεγάλης διακίνησης σε λιμάνια με βάση τα χαρακτηριστικά και τις τρέχουσες τροχιές των σκαφών, συμβάλλοντας στην έξυπνη διαχείριση σκαφών (Ortizetal., 2022). Υπάρχουν τρεις τύποι δεδομένων που χαρακτηρίζουν τα χαρακτηριστικά και τις τρέχουσες τροχιές των σκαφών. Πρώτον, στατικά δεδομένα που περιλαμβάνουν τον τύπο και το βύθισμα των πλοίων. Δεύτερον, δυναμικά δεδομένα που περιλαμβάνουν την τρέχουσα θέση, δηλαδή γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος, την τροχιά και την ταχύτητα του εδάφους και την τρέχουσα κατάσταση, δηλαδή εάν κινούνται ή είναι αγκυροβολημένα. Τρίτον, δεδομένα για συγκεκριμένα ταξίδια που περιλαμβάνουν τη χώρα προέλευσης και τον προορισμό, καθώς τα πλοία με διαφορετικούς προορισμούς έχουν διαφορετικές διαδρομές (Rajabietal., 2018).

2.4.3. Blockchain σε θαλάσσια λιμάνια

Το Blockchain (BC) επιτρέπει τη βελτίωση των διαδικασιών που εμπλέκονται στις Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών, αυξάνοντας τον αριθμό των συναλλαγών που πραγματοποιούνται σε επιχειρήσεις εξωτερικού εμπορίου και μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για τις συναλλαγές. Στη ναυτιλιακή βιομηχανία, η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και τη διευκόλυνση των διαπραγματεύσεων μεταξύ αγοραστών και πωλητών με ηλεκτρονικά αρχεία που δεν εμπλέκονται τρίτα μέρη (Zhouetal., 2020). Πιο ασφαλείς συναλλαγές δεδομένων μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς κίνδυνο απώλειας, καθώς αποθηκεύονται σε μπλοκ που σχηματίζουν μια αλυσίδα. Οι

αποκεντρωμένες συναλλαγές διατηρούνται, αυξάνοντας έτσι την ταχύτητα μετάδοσης με κατανεμημένα, ελεγχόμενα και βιώσιμα χαρακτηριστικά. Η ανωνυμία όλων των συμμετεχόντων στο δίκτυο διατηρείται και οι πληροφορίες μπορούν να διαχειρίζονται και να επικυρώνονται από όλους τους συμμετέχοντες στο δίκτυο. Για να δημιουργηθεί ένα νέο μπλοκ στην αλυσίδα, όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο πρέπει να συμμετέχουν στη διαδικασία επικύρωσης χρησιμοποιώντας ένα πρωτόκολλο συναίνεσης. Όταν οι πληροφορίες επικυρωθούν από ολόκληρο το δίκτυο, προστίθενται στην υπάρχουσα αλυσίδα και δεν μπορούν να τροποποιηθούν (Kurriyanovskiyetal., 2018). Με δημόσια αρχεία και έξυπνες συμβάσεις, η BC καθορίζει αυτόματα τους όρους μεταξύ των μερών μέσω ενός προγράμματος. Δηλαδή, ένας πιθανός αγοραστής μπορεί να προσδιορίσει με σαφήνεια την προέλευση του προϊόντος, τα στοιχεία ιδιοκτησίας και την ιχνηλασιμότητα του φορτίου. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων που συμμορφώνονται με τις αλυσίδες εφοδιαστικής εξαγωγής και εισαγωγής μπορεί να γίνει με πιο ασφαλή τρόπο, αυξάνοντας τη σχέση εμπιστοσύνης μεταξύ των διαφόρων παραγόντων, παρέχοντας διαφάνεια στις διαδικασίες και τις δραστηριότητες που εμπλέκονται σε κάθε σύνδεσμο εξωτερικού εμπορίου (Kuoetal., 2022). Άλλα οφέλη για τη λειτουργία των logistics σχετίζονται με το γεγονός ότι δεν είναι δυνατή η διαγραφή ή η τροποποίηση των δεδομένων που έχουν εισαχθεί, τα δεδομένα μπορούν να παρακολουθούνται ανά πάσα στιγμή. Έτσι, είναι δυνατή η αποτελεσματική αποστολή πολλών πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και χρησιμοποιούνται έξυπνα συμβόλαια. Αυτό βελτιώνει το επίπεδο ελέγχου για τα προϊόντα και τις υπηρεσίες σε κάθε έναν από τους συνδέσμους τους στη λιμενική βιομηχανία και καταγράφει όλα τα χαρακτηριστικά των προϊόντων ή αγαθών που μεταφέρονται. Η BC έχει διερευνηθεί στη ναυτιλία εμπορευματοκιβωτίων για να αποφευχθεί η απώλεια χρόνου στο χειρισμό κάθε εμπορευματοκιβωτίου και να μειωθεί

το κόστος των δραστηριοτήτων εφοδιαστικής, βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα του εξωτερικού εμπορίου μιας χώρας (Philipp, 2020). Η τεχνολογία BC έχει χρησιμοποιηθεί για την προστασία των τελωνειακών εγγράφων και των αποδείξεων με πρωτόκολλα εμπιστοσύνης με στόχο την αποφυγή του κινδύνου παραποίησης, βελτιώνοντας έτσι τη διαφάνεια, την αναλλοίωτη κατάσταση και την ασφάλεια των δεδομένων και των συμβάσεων.

2.4.5. SafeSeaNet

Σημαντικό ρόλο στην ύπαρξη και ανάπτυξη όλο και περισσότερων ευφυών λιμένων έχει συνδράμει καταλυτικά η πλατφόρμα SafeSeaNet. Τα κράτη μέλη της ΕΕ συνεργάζονται για να εξασφαλίσουν ότι διασύνδεση και διαλειτουργικότητα των εθνικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των πληροφοριών περί πλοίων, επιβατών και επικίνδυνων ρυπογόνων εμπορευμάτων που μεταφέρονται επί του πλοίου. Τα κράτη μέλη πρέπει να χρησιμοποιούν το SafeSeaNet ηλεκτρονικά και επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφοριών 24 ώρες το 24ωρο (Hannesson, 2008). Τα κράτη μέλη της ΕΕ καθιερώνουν τη ναυτιλία και τα συστήματα διαχείρισης πληροφοριών, τα λεγόμενα εθνικά συστήματα SafeSeaNet, για παραλαβή, επεξεργασία, αποθήκευση, ανάκτηση και ανταλλαγή πληροφοριών. Ο σκοπός της θαλάσσιας ασφάλειας του λιμένα και της ναυτιλίας είναι η ασφάλεια, η προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και η αποτελεσματικότητα των θαλάσσιων μεταφορών και να διασφαλιστεί ότι εισήγαγε πληροφοριακά συστήματα και δίκτυα που συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που περιγράφονται. Το κεντρικό και το εθνικό σύστημα SafeSeaNet συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας της ΕΕ σχετικά με την εμπιστευτικότητα και την ασφάλεια των πληροφοριών ειδικά όσον αφορά τα δικαιώματα πρόσβασης. Σύμφωνα με την απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής τα έντυπα FAL θα πρέπει να γίνονται δεκτά για παροχή πληροφοριών που απαιτούνται από τις προαναφερθέντες νομικές

πράξεις (Guze&Ledóchowski, 2016). Τα κράτη μέλη της ΕΕ θα πρέπει να εμβαθύνουν την συνεργασία μεταξύ των αρμόδιων αρχών, όπως τα τελωνεία τους, ο έλεγχος των συνόρων, η δημόσια υγεία και τις αρχές μεταφορών προκειμένου να συνεχιστεί η απλούστευση και να εναρμονίσει τις διατυπώσεις αναφοράς εντός της Ένωσης και να κάνουν την πιο αποτελεσματική χρήση των ηλεκτρονικών συστημάτων μετάδοσης και ανταλλαγής πληροφοριών.

Με άλλα λόγια η ευρωπαϊκή πρωτοβουλία e-Maritime επικεντρώνεται κυρίως στη διευκόλυνση που βασίζεται στην ξηρά και στην ανάπτυξη της ηλεκτρονικής τεχνολογίας, διαδικασίες και υπηρεσίες για τη διευκόλυνση της ροής των αγαθών στη θάλασσα και κατά συνέπεια των πλοίων που μεταφέρουν αυτά τα εμπορεύματα από και προς και γύρω από την Ευρώπη. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή υποστηρίζει την ανάπτυξη για τις εφαρμογές και διοικήσεις, λειτουργίες πλοίων, λιμάνια/τερματικά σταθμά, επιμελητεία μεταφορών, βελτίωση της ζωής στη θάλασσα και προώθηση της ναυτιλίας. Ως εκ τούτου, η πρωτοβουλία e-Maritime της Ευρωπαϊκής Επιτροπής στοχεύει στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών που σχετίζονται με τη ναυτιλία και την μείωση του διοικητικού φόρτου. Αυτό θα γίνει με τον εντοπισμό υφιστάμενων πρακτικών και κανονισμών προτείνοντας βελτιώσεις και απλουστεύσεις που απορρέουν από τη χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων και πληροφοριών, κάνοντας χρήση του Maritime Single Windows και SafeSeaNet (HAYES, 2019). Επιπλέον, το τελευταίο αποτελείται από ένα δίκτυο εθνικών συστημάτων και τα κράτη μέλη που συνδέονται μεταξύ τους μέσω το κεντρικό SafeSeaNet. Παρέχει πληροφορίες σε σχεδόν πραγματικό χρόνο για περίπου 17.000 πλοία που δραστηριοποιούνται εντός και γύρω των ύδατων της ΕΕ σε καθημερινή βάση. Το SafeSeaNet χρησιμοποιείται από τα κράτη μέλη για την ανταλλαγή πληροφοριών σχετικά με την ταυτοποίηση, τη θέση και τη κατάσταση πλοίου, ώρες αναχώρησης και άφιξης, αναφορές συμβάντων, λεπτομέρειες για

επικίνδυνα εμπορεύματα, απόβλητα, υπολείμματα φορτίου και ασφάλεια πλοίων. Το SafeSeaNet συλλέγει επίσης πληροφορίες για τους σκοπούς της ασφάλειας στη θάλασσα, των λιμένων και θαλάσσια ασφάλεια για την προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος και την αποτελεσματικότητα της θαλάσσιας κυκλοφορίας των θαλάσσιων μεταφορών (Hannesson, 2008).

2.5. Ευφυείς Λιμένες και Περιβάλλον

Αν και τα λιμάνια αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της παγκόσμιας οικονομίας. Η αυξημένη ναυτιλία μέσω λιμένων, τα έργα ανάπτυξης νέων λιμενικών υποδομών και οι λειτουργικές δραστηριότητες στα λιμάνια μπορούν να συσχετιστούν με δυσμενείς περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις σε παράκτιες τοποθεσίες και γειτονικές κοινότητες (Shinetal., 2018). Κατά συνέπεια, τα τελευταία χρόνια έχουν προκύψει αυστηρότερες περιβαλλοντικές νομοθεσίες καθώς και πρότυπα και απαιτήσεις κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιδόσεων από διάφορες πλευρές (Costaetal., 2021). Ως εκ τούτου, τα λιμάνια έχουν γίνει σημαντικά σημεία εισόδου για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών και κοινωνικών εξωτερικών επιπτώσεων που προκαλούνται από τις θαλάσσιες δραστηριότητες και αποτελούν σημαντικούς κόμβους για τη βελτίωση της απόδοσης βιωσιμότητας των παγκόσμιων αλυσίδων αξίας.

Από την άλλη αξίζει να αναφερθεί πως οι βελτιώσεις απόδοσης ενός έξυπνου λιμανιού συνδέονται στενά με το περιβάλλον, καθώς μεταξύ των βελτιώσεων απόδοσης που επιτυγχάνονται από έναν ευφυή λιμένα βρίσκονται οι μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, η μειωμένη καθυστέρηση πρόσβασης στη βάση δεδομένων, ο περιορισμός της καθυστερημένης επεξεργασίας που προκύπτει κατά την αναγνώριση κωδικών κοντέινερ, αλλά και η υψηλότερη ακρίβεια εκτίμησης που αυξάνει το ποσοστό επιτυχίας της πρόβλεψης των

θέσεων του σκάφους, του εξοπλισμού, της απόστασης, της αναγνώρισης κωδικών εμπορευματοκιβωτίων και της τροχιάς εξοπλισμού (Philippetal., 2021).

Η ανάπτυξη ενός πράσινου και έξυπνου λιμανιού αποτελεί σημαντική πρόοδο στην ειδική εφαρμογή της εξοικονόμησης ενέργειας και της μείωσης των εκπομπών, καθώς και των ευφύων τεχνολογιών στους παγκόσμιους λιμένες και τους τομείς της θαλάσσιας ναυτιλίας. Οι τρεις πρώτες γενιές λιμένων δίνουν έμφαση στην παραγωγή και τις υπηρεσίες των λιμανιών. Τα λιμάνια τέταρτης γενιάς δίνουν μεγαλύτερη έμφαση στον ρόλο ενσωμάτωσης των λιμένων στην παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού. Τα λιμάνια πέμπτης γενιάς ενσωματώνουν τις λειτουργίες εξυπηρέτησης όλων των άλλων γενεών (Zis, 2019). Οι πρώτες τέσσερις γενιές λιμανιών έδωσαν πολύ λίγη προσοχή στην καινοτομία της τεχνολογίας των λιμένων και στην προστασία του περιβάλλοντος, δεν κατάφεραν να επιτύχουν πράσινη ανάπτυξη και ανάπτυξη χαμηλών εκπομπών άνθρακα και παραμέλησαν ζητήματα, όπως η κλιματική αλλαγή και η περιβαλλοντική ρύπανση. Στις σύγχρονες μέρες, η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι μια από τις τεράστιες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα και οι άνθρωποι σε όλα τα κοινωνικά στρώματα πρέπει να προσπαθήσουν να εξοικονομήσουν ενέργεια και να μειώσουν τις εκπομπές. Η ρύπανση των λιμανιών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το κλιματικό περιβάλλον (Zhenetal., 2019). Το μεγαλύτερο μέρος της ρύπανσης προέρχεται από πλοία λιμενικής παραγωγής και μεταφοράς. Περίπου το 70% των παγκόσμιων θαλάσσιων εκπομπών συμβαίνει στην παράκτια περιοχή του λιμανιού, ενώ το 60-90% συμβαίνει κατά την περίοδο ελλιμενισμού. Στη διαδικασία χειρισμού του λιμανιού, θα υπάρχουν άλλα είδη ρύπανσης, όπως σκόνη και θόρυβος. Ως εκ τούτου, τα λιμάνια πέμπτης γενιάς θα επικεντρωθούν στην εφαρμογή της ευφυούς τεχνολογίας του λιμανιού και στην υλοποίηση της βιώσιμης πράσινης ανάπτυξης με βάση την ενσωμάτωση της προηγούμενης λειτουργίας υπηρεσιών logistics λιμένων. Σε

σύγκριση με άλλες βιομηχανίες, η λιμενική ναυτιλιακή βιομηχανία έχει μεγαλύτερο ρυπογόνο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Επιπλέον, η επιστημονική και τεχνολογική καινοτομία είναι μια ισχυρή προσέγγιση για την αύξηση της ανταγωνιστικότητας της ανάπτυξης λιμένων και την προστασία του λιμενικού περιβάλλοντος (Aregalletal., 2018). Η ανάπτυξη σύγχρονων λιμένων θα πρέπει να προσαρμοστεί στην τάση της προστασίας του περιβάλλοντος, να ενισχύσει την επιστημονική και τεχνολογική καινοτομία στα λιμάνια και να υλοποιήσει νέα μοντέλα πράσινης και έξυπνης ανάπτυξης για την αντιμετώπιση των τρεχουσών κρίσεων και προκλήσεων στην ανάπτυξη της λιμενικής βιομηχανίας (Sadek&Elgohary, 2020). Τα πράσινα και έξυπνα σχέδια είναι σημαντικές τάσεις και δύο βασικοί στόχοι για τη μελλοντική ανάπτυξη των λιμανιών. Ένα πράσινο λιμάνι είναι ο μακροσκοπικός στόχος της ανάπτυξης του λιμανιού και στοχεύει στην προσαρμογή της παραγωγής και λειτουργίας του λιμανιού με την προστασία του περιβάλλοντος. Υπό την προϋπόθεση των πράσινων λιμένων, τα έξυπνα λιμάνια ενισχύουν την τεχνολογική καινοτομία για την εφαρμογή νέων τεχνολογιών σε οργανισμούς παραγωγής λιμένων, τη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης και την επίτευξη του στόχου της αειφόρου ανάπτυξης των πράσινων λιμανιών (Moonetal., 2018). Η ανοδική αύξηση των τιμών της ενεργείας, όπως και η διατήρηση του κλίματος από τις περιβαλλοντικές αλλαγές, έχουν οδηγήσει αρκετά λιμάνια στην ανάγκη για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τηρώντας τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που αποφασίζονται από τις αρχές για τη μείωση των ρύπων και των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου από τους ενεργειακούς σταθμούς. Οι επικίνδυνες εκπομπές μειώνονται σημαντικά χάρη στον εξοπλισμό, στην ηλεκτροδότηση, με εναλλακτικά καύσιμα και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μαζί με τη λειτουργική απόδοση και καθιστούν τη μελλοντική γένια του λιμανιού (Pavlicetal., 2014). Η ενεργειακή απόδοση ενός λιμένα είναι ανάλογη με την

επιχειρησιακή του αποτελεσματικότητα. Η αυτοματοποίηση συσκευών και εξοπλισμού έξυπνων λιμανιών μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και κατά συνέπεια βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση (Chenetal., 2019). Υπάρχει μια ποικιλία από τεχνικές λύσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο λιμάνι για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και τη βελτίωση του περιβάλλοντος. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας για πολυάριθμο εξοπλισμό, ηλεκτρικά οχήματα, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα συστήματα ψύξης με ταμπλό, οι τεχνολογίες φωτισμού και τα εναλλακτικά καύσιμα είναι μόνο μερικά από αυτά αυτές τις επιλογές.

3^ο Κεφάλαιο – Μελέτες Περιπτώσεων

3.1. Λιμάνι του Ρότερνταμ

3.1.1. Τεχνολογίες που το καθιστούν ευφυές λιμάνι

Η Αρχή Λιμένος του Ρότερνταμ (HBR) είναι υπεύθυνη για την ασφαλή και αποτελεσματική διακίνηση των πλοίων και τη βιώσιμη ανάπτυξη της λιμενικής περιοχής. Για αυτό χρησιμοποιεί όλες τις διαθέσιμες ψηφιακές δυνατότητες. Αλλά και το Λιμεναρχείο κοιτάζει μπροστά (Merk&Notteboom, 2013). Με το πρόγραμμα Smart Infrastructure, το Ρότερνταμ μετατρέπεται αυτήν τη στιγμή από φυσική σε ψηφιακή θύρα. Στόχος είναι τα πλοία να μπορούν να εισέρχονται και να εξέρχονται από το λιμάνι αυτόνομα έως το 2030. Πολλά δεδομένα είναι ήδη διαθέσιμα στο λιμάνι σχετικά με το ίδιο το λιμάνι, τον καιρό, την παλίρροια και την αλυσίδα logistics. Ως διαμεσολαβητής του λιμανιού, το Λιμεναρχείο αναζητά τον ρόλο που διαδραματίζει στην ψηφιοποίησή του. Ήδη έχουν γίνει σημαντικά βήματα σε αυτόν τον τομέα. Ο τερματικός σταθμός μη επανδρωμένων εμπορευματοκιβωτίων με αυτόνομους γεραμούς και τηλεκατευθυνόμενα φορτηγά στο Maasvlakte είναι καλά παραδείγματα. Ωστόσο, το στοιχείο του αυτόνομου σκάφους είναι μια διαφορετική ιστορία. Λόγω των πολλών, συχνά δυναμικών παραγόντων που επηρεάζουν, αυτή είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Στο λιμάνι, οι διαστάσεις των αντικειμένων, όπως τοίχοι κρηπιδωμάτων ή γερανοί, έχουν ήδη καθοριστεί σε σύστημα GIS. Η πρόκληση είναι να συγκεντρωθούν αυτές οι πληροφορίες και κάθε είδους δυναμικά δεδομένα όπως ο καιρός, η ροή, η ορατότητα και ο άνεμος σε μια γενική πλατφόρμα. Μέσω IoT, η Λιμενική Αρχή μπορεί να συλλέξει αυτά τα δεδομένα στο cloud, να τα επεξεργαστεί και να τα καταστήσει προσβάσιμα μέσω διαφόρων φίλτρων. Προφανώς, αυτό πρέπει να γίνει με σαφή και ασφαλή τρόπο (Campfens&Dekker, 2018). Η ομάδα IoT της Λιμενικής Αρχής

συνεργάζεται επί του παρόντος με τις IBM Watson, Cisco, Tele2 και Axians για την υλοποίηση αυτής της πλατφόρμας.

Για την καλύτερη προετοιμασία για αυτό το μελλοντικό ορόσημο, ενισχύεται ενεργά ολόκληρη την περιοχή του λιμανιού της περιοχής του Ρότερνταμ μήκους 42 χιλιομέτρων, από την πόλη του Ρότερνταμ μέχρι τη Βόρεια Θάλασσα, με τεχνολογίες IBM Internet of Things (IoT) και IBM Cloud. Η πρωτοβουλία για την ψηφιοποίηση περιλαμβάνει πολλά στοιχεία, τα οποία συμβάλλουν στο να μετατραπεί στον πιο έξυπνο συνδεδεμένη λιμένα στον κόσμο. Χρησιμοποιώντας το IBM IoT δημιουργείται ένα ψηφιακό δίδυμο του λιμένα, δηλαδή ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο των λειτουργιών του που θα αντικατοπτρίζει όλους τους πόρους στο λιμάνι του Ρότερνταμ, παρακολουθώντας τις κινήσεις των πλοίων, τις υποδομές, τον καιρό, τα γεωγραφικά και τα δεδομένα βάθους νερού με απόλυτη ακρίβεια. Αυτό το μέρος της πρωτοβουλίας του λιμένα για την ψηφιοποίηση συμβάλλει ενεργά στη δοκιμή σεναρίων και τη καλύτερη κατανόηση για το πώς μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα στις δραστηριότητές του, διατηρώντας παράλληλα αυστηρά πρότυπα ασφαλείας (D'Amicoetal., 2021). Προσεγγιστικά επεξεργάζονται περισσότερα από 140.000 πλοία κάθε χρόνο και ο συντονισμός του ελλιμενισμού κάθε σκάφους αποτελεί μια πολύπλοκη εργασία που περιλαμβάνει πολλά μέρη και πρέπει να εκτελείται με ασφάλεια και ασφάλεια, δαπανώντας αρκετές ώρες. Με ένα νέο ψηφιακό ταμπλό, οι αρμόδιοι είναι σε θέση να βλέπουν τις λειτουργίες όλων των μερών ταυτόχρονα και να αυξάνουν τον όγκο και την αποτελεσματικότητα των αποστελλόμενων εμπορευμάτων που διέρχονται από το λιμάνι. Στην πραγματικότητα, οι ναυτιλιακές εταιρείες και το λιμάνι εξοικονομούν έως και μία ώρα στον χρόνο ελλιμενισμού, που μπορεί να ανέλθει σε περίπου 80.000 δολάρια ΗΠΑ σε εξοικονόμηση για τους χειριστές πλοίων και επιτρέπει στο λιμάνι να ελλιμενίζει περισσότερα πλοία κάθε μέρα.

Πέρα των παραπάνω, τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση όλο και περισσότερο στη πρόβλεψη των νερών, αλλά και των καιρικών συνθηκών. Πιο συγκεκριμένα, έχει αρχίσει η πιο ενεργή χρήση αισθητήρων IoT, η επαυξημένη νοημοσύνη (AI) και τα έξυπνα καιρικά δεδομένα, ενορχηστρωμένα από την IBM και άλλους συνεργάτες για τη μέτρηση στοιχείων, όπως είναι η διαθεσιμότητα θέσεων κουκέτας και άλλα ζωτικής σημασίας στατιστικά στοιχεία. Για παράδειγμα, τα ακριβή δεδομένα νερού και καιρού θα επιτρέψουν στις ναυτιλιακές εταιρείες να προβλέψουν την καλύτερη ώρα για να εισέλθουν στο λιμάνι του Ρότερνταμ προσδιορίζοντας τις πιο ευνοϊκές συνθήκες. Η WeatherCompany, μια εταιρεία της IBM, έχει αρχίσει να παρέχει ακριβή δεδομένα καιρού, αναλύοντας μέσω αυτής της λύσης διάφορα δεδομένα νερού και επικοινωνιών. Η πρόσβαση σε δεδομένα σχετικά με τη θερμοκρασία του αέρα, την ταχύτητα του ανέμου, τη σχετική υγρασία, τη θολότητα και την αλατότητα του νερού συν τη ροή και τα επίπεδα του νερού, τις παλίρροιες και τα ρεύματα, προσφέρει τη δυνατότητα για την καλύτερη πρόβλεψη της ορατότητας μιας δεδομένης ημέρας, βοηθώντας στον πιο γρήγορο και αποτελεσματικό υπολογισμό του ύψους απελευθέρωσης για τα πλοία (Vellinga & De Jong, 2012). Επιπλέον, προβλέποντας τις συνθήκες του νερού, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, οι αρμόδιοι βρίσκονται σε θέση να προσδιορίσουν πόσο ομαλή είναι πιθανή η είσοδος ενός πλοίου στο λιμάνι. Αυτά τα δεδομένα αναμένεται να έχουν επίσης σημαντικό θετικό οικονομικό αντίκτυπο στο κόστος αποστολής, καθώς το ήρεμο νερό και οι καιρικές συνθήκες επιτρέπουν χαμηλότερους ρυθμούς κατανάλωσης καυσίμου, διευκολύνουν τα οικονομικά ωφέλιμα φορτία ανά πλοίο και συμβάλλουν στη διασφάλιση της ασφαλούς άφιξης του φορτίου.

Επιπλέον, έχει δημιουργηθεί μια νέα εγκατάσταση έρευνας και ανάπτυξης που ονομάζεται Rotterdam Additive Manufacturing LAB (RAMLAB) στα ναυπηγεία του λιμανιού του Ρότερνταμ, η οποία αποτελείται από 30 συνεργάτες. Πιστεύεται ότι τα ποιοτικά βιομηχανικά ανταλλακτικά πρέπει να είναι πάντα διαθέσιμα οπουδήποτε χρειάζονται, όποτε χρειάζονται και σε ανταγωνιστική τιμή. Αυτό είναι το πρώτο εργαστήριο τρισδιάστατης εκτύπωσης που απευθύνεται ειδικά σε θαλάσσια λιμάνια και ναυτιλιακές εταιρείες και έχει τη δυνατότητα να επιτρέψει τη διαθεσιμότητα ευρείας κλίμακας πιστοποιημένων μεταλλικών εξαρτημάτων αποστολής (De la Peña Zarzuelo et al., 2020). Η γνωσιακή τεχνολογία IoT της IBM εγχέεται σε αυτή τη διαδικασία παραγωγής, η οποία χρησιμοποιεί έναν ρομποτικό βραχίονα συγκόλλησης για την εφαρμογή υψηλής ποιότητας μετάλλου στρώμα-στρώμα για τη δημιουργία εξαρτημάτων πλοίου, όπως έλικες, κατ' απαίτηση και ταχύτερα από ποτέ. Όταν μια παραδοσιακή διαδικασία κατασκευής ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος πλοίου διαρκεί συνήθως έξι έως οκτώ εβδομάδες (Mendes Constante et al., 2023).

Είναι σημαντικό να τονιστεί πως με το IoT, παρουσιάζονται ατελείωτες δυνατότητες που αλλάζουν ριζικά τον τρόπο που εξάγονται οι διάφορες ναυτιλιακές δραστηριότητες. Σε ένα άλλο στοιχείο των έργων ψηφιοποίησης με δυνατότητα IBM IoT Connecting Services, έχει εγκατασταθεί μια σειρά από "Ψηφιακά Δελφίνια", δηλαδή έξυπνους τοίχους αποβάθρας και σηματοδότες εξοπλισμένους με αισθητήρες που υποστηρίζουν μεταφορά φορτίου από πλοίο σε πλοίο και δημιουργούν δεδομένα με χρονική σήμανση για την κατάσταση και το άμεσο περιβάλλον τους (Joní et al., 2019). Αυτά τα ψηφιακά δελφίνια παρέχουν πληροφορίες για την κατάσταση και τη χρήση ενός τερματικού σταθμού ελλιμενισμού και των γύρω υδάτων και καιρικών συνθηκών, επιτρέποντας στους φορείς εκμετάλλευσης λιμένων να προσδιορίσουν τη βέλτιστη ώρα για να ελλιμενιστούν τα πλοία, καθώς και πού και πότε μπορούν να το

κάνουν. Η μηχανική εκμάθηση έχει αρχίσει να εφαρμόζεται για να μαθαίνει από μοτίβα δεδομένων, έτσι ώστε οι χειριστές λιμένων να μπορούν να βασίζονται σε απολύτως ακριβή δεδομένα σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την υποδομή του λιμανιού (D'Amicoetal., 2021). Αυτά τα δεδομένα είναι σημαντικά για τη χρήση τόσο από τον ευφυή λιμένα όσο για όσους εμπλέκονται σε αυτά.

Από τα παραπάνω είναι φανερό πως το λιμάνι της περιοχής του Ρότερνταμ, βασισμένο στην πρωτοποριακή του κληρονομιά, τη σχέση του με ομίλους, όπως είναι η IBM και το παγκόσμιο οικοσύστημα συνεργατών της στο IoT, συμπεριλαμβανομένης της Cisco, που βρίσκεται στα παγκόσμια κεντρικά γραφεία της IBM στο Μόναχο, βρίσκεται σε πορεία να μεταμορφώσει πραγματικά τη λειτουργία του λιμανιού και να προσθέσει σημαντική αξία τόσο στους ανθρώπους όσο και σε άλλα λιμάνια που εξυπηρετεί το λιμάνι του Ρότερνταμ.

3.1.2. Αποτελέσματα και Προτάσεις

Οι υπάρχουσες και οι αναδυόμενες τεχνολογίες όπως οι έξυπνοι αισθητήρες, η τεχνητή νοημοσύνη και το blockchain το καθιστούν δυνατό, δημιουργώντας τεράστια οφέλη όσον αφορά την εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων και τη μείωση των εκπομπών. Το τριάντα τοις εκατό του φορτίου δεν φθάνει στην ώρα τους και οι αποστολείς δεν γνωρίζουν ακριβώς πού βρίσκονται τα εμπορευματοκιβώτια και το φορτίο τους. Εφαρμογές όπως το Boxinsider που χρησιμοποιεί το λιμάνι του Ρότερνταμ μπορεί να βοηθήσει μέσω της παρακολούθησης και της ανίχνευσης κοντέινερ στο λιμάνι. Οι θαλάσσιες μεταφορές που περιλαμβάνουν το Ρότερνταμ ως σημείο άφιξης ή αναχώρησης συνδέονται με περίπου 21,5 εκατομμύρια τόνους εκπομπών CO₂ ετησίως. Η ναυτιλία Just-in-Time θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές στη διεθνή ναυτιλία κατά 35%. Έτσι, η πλατφόρμα Pronto μπορεί να συμβάλει σημαντικά (Nikghadametal., 2021). Υπάρχουν και άλλοι τομείς, όπου μπορούν να κατατάσσουν

ένα λιμάνι ως έξυπνο. Το 2019, κάθε αποστολή στην αλυσίδα εφοδιαστικής απαιτούσε περίπου 200 έγγραφα. Κατά μέσο όρο, ένας φορτωτής πρέπει να συναλλάσσεται με 28 οργανισμούς: από τερματικά και διαμεταφορείς έως ναυτιλιακές εταιρείες και τελωνεία. Για τις εμπλεκόμενες εταιρείες, η ψηφιακή μετάβαση μπορεί να αποφέρει τεράστια οφέλη. Η τεχνολογία Blockchain είναι μόνο μία από τις τεχνολογίες με μεγάλες δυνατότητες εδώ.

Ως ένα από τα κορυφαία λιμάνια στον κόσμο, και με τη φιλοδοξία μας να γίνει το πιο έξυπνο λιμάνι στον κόσμο, το Ρότερνταμ πρωτοστατεί στον ψηφιακό μετασχηματισμό των λιμένων και των logistics. Σκοπός του λιμανιού είναι να δημιουργήσει ένα παγκόσμιο δίκτυο έξυπνων συνδεδεμένων λιμένων. Αυτό θα βελτιώσει την αποτελεσματικότητα στους παγκόσμιους εμπορικούς δρόμους και θα μειώσει επίσης το κόστος και τις εκπομπές άνθρακα. Ο ψηφιακός μετασχηματισμός των logistic αλυσίδων παίζει βασικό ρόλο εδώ. Ως λιμάνι, ξεκινά με τον εαυτό του και την κοινότητα του λιμανιού και στη συνέχεια φέρνει την ενδοχώρα στη διαδικασία του ψηφιακού μετασχηματισμού (VanderHorst&VanderLugt, 2011). Το επόμενο βήμα είναι η σύνδεση ευφών λιμένων σε όλο τον κόσμο. Αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες που εστιάζουν κυρίως στην υλικοτεχνική αποτελεσματικότητα και μια σαφέστερη εικόνα των υλικοτεχνικών διαδικασιών.

Είναι φανερό πως το λιμάνι του Ρότερνταμ συμβάλλει σημαντικά στην ολλανδική οικονομία, ιδίως μέσω της μεταφοράς εμπορευμάτων. Το RotterdamMainport Development Project διασφαλίζει ότι το λιμάνι έχει χώρο να αναπτυχθεί. Πιο αναλυτικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω το Ρότερνταμ είναι το μεγαλύτερο λιμάνι της Ευρώπης (Samadietal., 2016). Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τους τομείς των μεταφορών και της εφοδιαστικής, καθώς και για τις πετροχημικές και

ενεργειακές βιομηχανίες (VanDenBoschetal., 2011). Υπάρχουν λίγα περιθώρια για τις εταιρείες να επεκταθούν τα επόμενα χρόνια στις υπάρχουσες λιμενικές και βιομηχανικές περιοχές. Το Ρότερνταμ δεν θα είναι σε θέση να ανταγωνιστεί άλλα λιμάνια στην Ευρώπη και πέρα από αυτήν χωρίς επιπλέον χώρο για επέκταση.

Ως εκ τούτου, η ολλανδική κυβέρνηση αποφάσισε να ενισχύσει το λιμάνι του Ρότερνταμ με την κατασκευή μιας νέας λιμενικής περιοχής, Maasvlakte 2. Ταυτόχρονα, η βιωσιμότητα της περιοχής πρέπει να βελτιωθεί. Αυτός είναι ο διπλός στόχος του RotterdamMainport Development Project (Simonietaal., 2022). Πιο συγκεκριμένα, βασικοί σκοποί του είναι:

- Η ανάκτηση γης για το Maasvlakte 2
- Η παροχή περιβαλλοντικής αποζημίωσης για το Maasvlakte 2
- Η ανάπτυξη 750 εκταρίων για να χρησιμεύσει ως μια νέα περιοχή φύσης και αναψυχής
- Η βελτίωση της τρέχουσας περιοχής του Ρότερνταμ μέσω έργων της υπάρχουσας περιοχής του Ρότερνταμ. Για παράδειγμα, η δημιουργία κοινοτικών πάρκων κατά μήκος του ποταμού Meuse.

Η ανάπτυξη του Maasvlakte 2 περιλαμβάνει μια νέα βιομηχανική περιοχή έκτασης χιλίων εκταρίων και βρίσκεται κατά μήκος βαθέων υδάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα μεγάλα ποντοπόρα πλοία έχουν άμεση πρόσβαση στο Maasvlakte 2. Η τοποθεσία έχει επίσης καλές συγκοινωνιακές συνδέσεις με την ευρωπαϊκή ενδοχώρα σιδηροδρομικώς μέσω της γραμμής Betuwe, με αγωγό, μέσω εσωτερικών πλωτών

οδών, αλλά και οδικώς. Η χρήση του Maasvlakte 2 θα μπορούσε να οδηγήσει σε χαμηλότερη ποιότητα αέρα λόγω της ποσότητας σωματιδίων και διοξειδίου του αζώτου που εκπέμπεται.

Η κυβέρνηση λαμβάνει διάφορα μέτρα για να το αποτρέψει. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τους Hentscheletal., (2018):

- Από το 2035, θα ισχύσει απαγόρευση των σχετικά υψηλής ρύπανσης πλοίων εσωτερικής ναυσιπλοΐας.
- Θα τεθεί όριο ταχύτητας σε διάφορα τμήματα πλωτών οδών.
- Θα αυξηθούν τα λιμενικά τέλη για τα σχετικά υψηλής ρύπανσης πλοία εσωτερικής ναυσιπλοΐας.
- Θα δημιουργηθεί ζώνη χαμηλών εκπομπών για εμπορευματικές μεταφορές, καθώς μόνο σχετικά καθαρά φορτηγά θα είναι ευπρόσδεκτα στις οδούς Maasvlakte 1 και 2.

Μετά από πολλά χρόνια προετοιμασίας, η ενεργειακή μετάβαση προχωρά σε ολόκληρο το φάσμα. Περίπου εβδομήντα έργα προχωρούν επί του παρόντος σε διάφορες φάσεις και η ενεργειακή μετάβαση γίνεται ολοένα και πιο ορατή. Το πράσινο υδρογόνο παίζει κεντρικό ρόλο στο νέο λιμένα και οικονομία ουδέτερου άνθρακα (Laas, 2020). Η Αρχή Λιμένος του Ρότερνταμ εργάζεται σε μια σειρά από συγκεκριμένα έργα σε όλη την αλυσίδα παραγωγής, υποδομής, μεταφοράς, εισαγωγών και χρήσης για την επίτευξη των κλιματικών στόχων. Συμφωνίες συμμαχίας για τις μεγάλης κλίμακας εισαγωγές πράσινου υδρογόνου υπεγράφησαν φέτος με μέρη σε χώρες όπως η Βραζιλία, η Ισπανία και η Ναμίμπια. Για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου, δύο εγκαταστάσεις μετατροπής δημιουργούνται στο Maasvlakte 2. Πολλές

εταιρείες έχουν σχέδια να κατασκευάσουν εδώ πράσινες μονάδες υδρογόνου ισχύος 200-250 MW η καθεμία. Η Shell ξεκίνησε τις εργασίες για την κατασκευή της πρώτης μονάδας υδρογόνου. Όλη η διαθέσιμη γη στις εγκαταστάσεις μετατροπής έχει πλέον εκδοθεί.

Αλλού στο Maasvlakte, δημιουργείται τώρα χώρος για ένα νέο σύμπλεγμα ηλεκτρόλυσης. Μια περιοχή έντεκα εκταρίων διατέθηκε εδώ τον Απρίλιο του 2023 για μια μονάδα υδρογόνου μεγέθους έως 1 GW για το μέρος που θα κερδίσει τον διαγωνισμό για το τμήμα Beta του αιολικού πάρκου IJmuidenVer. Η φιλοδοξία της Λιμενικής Αρχής είναι 2 έως 2,5 GW ηλεκτρόλυσης έως το 2030. Η εθνική κυβέρνηση στοχεύει σε 4 GW σε εθνικό επίπεδο έως το 2030. Η Gasunie έλαβε την επενδυτική απόφαση τον Ιούνιο για το πρώτο τμήμα ενός εθνικού δικτύου υδρογόνου από το Maasvlakte 2 έως το Pernis. Οι εργασίες θα ξεκινήσουν μετά το καλοκαίρι. Από το 2030 και μετά, το δίκτυο υδρογόνου θα συνδέει μεταξύ τους τις μεγάλες βιομηχανικές περιοχές στην Ολλανδία και τις γύρω χώρες όπως η Γερμανία και το Βέλγιο. Η ολλανδική εταιρεία Sif θα επεκτείνει το υπάρχον εργοστάσιό της για μονόπολα θεμέλια στο Maasvlakte 2 (VanDooren, 2012).

Τέλος, σημαντική πρόοδος στον τομέα της παράκτιας ενέργειας σημειώθηκε επίσης κατά τη διάρκεια αυτού του εξαμήνου. Το έργο για την εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας στην ξηρά για κρουαζιερόπλοια ξεκίνησε στις αρχές Ιουνίου και, από τα τέλη του 2024 και μετά, τα πρώτα κρουαζιερόπλοια στο Ρότερνταμ θα μπορούν να συνδεθούν. Το έργο για τη βιωσιμότητα της εσωτερικής ναυτιλίας πήρε επίσης πιο συγκεκριμένη μορφή με συνεχείς επενδύσεις στην ZeroEmission Services (ZES), μια εταιρεία που εστιάζει στην ηλεκτροδότηση της εσωτερικής ναυτιλίας και στην έναρξη

του έργου Condor H2 (D'Amicoetal., 2021). Το Condor H2 θα παρέχει αποθήκευση υδρογόνου και κυψέλες καυσίμου με ένα πακέτο μπαταριών βάσει πληρωμής ανά χρήση, έτσι ώστε τα πλοία να μπορούν να κάνουν τη μετάβαση στο να είναι απαλλαγμένα από εκπομπές με περιορισμένη αρχική επένδυση για τους πλοιοκτήτες. Αυτή η συμμαχία μεταξύ της Αρχής Λιμένα του Ρότερνταμ.

3.2. Λιμάνι του Αμβούργου

3.2.1. Τεχνολογίες που το καθιστούν ευφυές λιμάνι

Το Αμβούργο είναι ένα από τα μεγαλύτερα λιμάνια της Ευρώπης, και είναι κοινώς γνωστή ως η πύλη προς τον κόσμο. Λιμάνι και πόλη αναπτύσσονται και εξελίσσονται μαζί σύμφωνα με τις αναδυόμενες τεχνολογικές και κοινωνικές τάσεις (Molavietal., 2020). Μεγάλες τάσεις, όπως η κυβερνοασφάλεια του Διαδικτύου των Πραγμάτων στον ευρωπαϊκό ενεργειακό τομέα (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη, η τρισδιάστατη εκτύπωση, η εικονική και επαυξημένη πραγματικότητα, τα ψηφιακά δίδυμα ή το blockchain ανοίγουν νέες ευκαιρίες για τους φορείς εκμετάλλευσης λιμένων, καθώς και για τους ενδιαφερόμενους φορείς στην οικονομία των λιμένων.

Όσο αναφορά τις τεχνολογίες που αυτό χρησιμοποιεί, το λιμάνι του Αμβούργου έχει αρχίσει να θέτει σε λειτουργία αυτοματοποιημένα drones για την παρακολούθηση γεγονότων που συμβαίνουν στο λιμάνι και για να καταστήσει δυνατή τη πιο αποτελεσματική συντήρηση της λιμενικής υποδομής. Τα drones έχουν αρχίσει να κυκλοφούν ως μέρος μιας νέας συνεργασίας μεταξύ της HHLA Sky, θυγατρικής της HamburgerHafenundLogistik, και της Λιμενικής Αρχής του Αμβούργου (Duránetal., 2019). Σε περίπτωση καταιγίδων, ατυχημάτων ή άλλων απρόβλεπτων διαταραχών, τα ιπτάμενα, πλωτά ή αυτοδηγούμενα ρομπότ μπορούν να βρίσκονται στο χώρο πολύ πιο γρήγορα και να παρέχουν βίντεο και εικόνες υψηλής ανάλυσης για μια ακριβή επισκόπηση της κατάστασης. Ο χρόνος που εξοικονομείται μπορεί να είναι

αποφασιστικός σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Επιπλέον, καθιστούν τη συντήρηση και την επέκταση της λιμενικής υποδομής σημαντικά πιο αποτελεσματική – για παράδειγμα, στην περίπτωση εγκαταστάσεων που είναι δύσκολο, χρονοβόρο ή επικίνδυνο να προσεγγιστούν. Η HHLA Sky έχει αναπτύξει ένα κέντρο ελέγχου για τη λειτουργία και την παρακολούθηση των drones και το έχει εισαγάγει στην παγκόσμια αγορά. Συνδέει τις διάφορες εφαρμογές στο πλαίσιο της τεχνολογικής συνεργασίας για να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες που προηγουμένως απαιτούσαν ένταση εργασίας, ώστε οι συσκευές να μπορούν να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά (Pinetal., 2019).

Πέρα από το παραπάνω, το επίκεντρο του έργου στο λιμάνι του Αμβούργου ήταν η νέα τεχνολογική ιδέα «NetworkSlicing». Στο πλαίσιο του 5G, δεν θα υπάρχει πλέον ένα μέγεθος για όλους δίκτυο, αλλά πολλαπλά εικονικά δίκτυα που θα λειτουργούν ταυτόχρονα στην ίδια κοινή υποδομή. Το πλεονέκτημα: Αυτά τα δίκτυα, τα λεγόμενα slices, μπορούν να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά προσαρμοσμένα για να ανταποκρίνονται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις μιας συγκεκριμένης εφαρμογής ή ομάδας χρηστών. Ένα παράδειγμα είναι ένα κύκλωμα προτεραιότητας που δημιουργείται γρήγορα για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης στην περιοχή του λιμανιού κατά τη διάρκεια μιας καταγίδας (Zhongetal., 2019). Η εμπειρία που αποκτήθηκε από την εφαρμογή του 5G NetworkSlicing σε περιβάλλοντα δοκιμών πραγματικού κόσμου βοηθά στην επικύρωση και βελτίωση των υπαρχουσών εννοιών. Ενσωματώνονται στις συνεχιζόμενες εργασίες αρχιτεκτονικής ανάπτυξης για το πρότυπο 5G. Στο λιμάνι δοκιμάστηκαν τρεις περιπτώσεις χρήσης με διαφορετικές απαιτήσεις δικτύου: Από τη μία πλευρά, οι συνεργάτες εγκατέστησαν αισθητήρες σε τρία πλοία. Αυτοί οι αισθητήρες επιτρέπουν την παρακολούθηση και ανάλυση σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων κίνησης και περιβάλλοντος από μεγάλα τμήματα της περιοχής του λιμανιού. Δεύτερο παράδειγμα είναι πως το Κέντρο Διαχείρισης Λιμενικών Οδών

ελέγχει εξ αποστάσεως τις ροές κυκλοφορίας στο λιμάνι του Αμβούργου μέσω ενός φαναριού συνδεδεμένου στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Αυτό έχει βοηθήσει στην ταχύτερη και ασφαλέστερη καθοδήγηση των φορτηγών στην περιοχή του λιμανιού. Το τρίτο παράδειγμα ελέγχει τη διαθεσιμότητα υψηλού εύρους ζώνης, καθώς με τη βοήθεια του νέου προτύπου, οι τρισδιάστατες πληροφορίες μεταδίδονται σε μια εφαρμογή επαυξημένης πραγματικότητας (Sohaibetal., 2021).

Ο στόχος του έργου στο λιμάνι του Αμβούργου επετεύχθη σαφώς, καθώς οι εταίροι του έργου μπόρεσαν να αποδείξουν ότι πολύπλοκες βιομηχανικές εφαρμογές με αποκλίνουσες απαιτήσεις μπορούν να λειτουργήσουν αξιόπιστα σε μια κοινή φυσική υποδομή, αποκτώντας πολύτιμη εμπειρία, την οποία έχουν μοιραστεί επίσης με τη λιμενική βιομηχανία και άλλους εταίρους σε πολλές εκδηλώσεις. Χάρη στην εμπειρία που απέκτησαν όλοι οι εμπλεκόμενοι, έχουν πλέον ένα σαφές τεχνολογικό πλεονέκτημα στο λιμάνι του Αμβούργου. Όταν ξεκινήσει επίσημα το 5G, θα είναι έτοιμοι να εφαρμόσουν ακόμη και πολύπλοκες εφαρμογές σε αυτό. Η μελλοντική κάλυψη 5G στο λιμάνι θα παρέχεται από τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας (Sordello, 2021).

Είναι αντιληπτό από τη βιβλιογραφία πως ένα ίδρυμα στις μεταφορές που πρωτοστατεί στην ενσωμάτωση του IoT είναι το λιμάνι του Αμβούργου. Ως ένα από τα πιο πολυσύχναστα λιμάνια της Ευρώπης, μαζί με το Ρότερνταμ, ο εκσυγχρονισμός μέσω της τεχνολογικής καινοτομίας είναι ζωτικής σημασίας για το λιμάνι του Αμβούργου τόσο για τη διατήρηση της επιχειρηματικής ανάπτυξης όσο και της διεθνούς ανταγωνιστικότητάς του, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις εξωτερικές επιδράσεις του λιμανιού στους κατοίκους της πόλης (Rajabietal., 2018). Το λιμάνι

αποτελεί σημαντικό οικονομικό μοχλό για την περιοχή και τη χώρα. Αποτελεί περίπου το ένα δέκατο της συνολικής έκτασης της πόλης του Αμβούργου, έχει πάνω από 260 χιλιάδες θέσεις εργασίας που εξαρτώνται από αυτήν στη Γερμανία και παράγει πάνω από 750 εκατομμύρια ευρώ σε ετήσια φορολογικά έσοδα για την πόλη του Αμβούργου. Το λιμάνι διαχειρίζεται το συνηθισμένο προϊόν. μείγμα εμπορευματοκιβωτίων και χύδην φορτίου, τα οποία παρουσιάζουν μια συνεχή σταθερή αύξηση του όγκου τους.

Η αναμενόμενη αύξηση της κίνησης σημαίνει ότι η ετήσια ικανότητα εξυπηρέτησης πρέπει να αναβαθμιστεί, αλλά ο περιορισμός χώρου λόγω της τοποθεσίας του λιμανιού στην καρδιά της πόλης του Αμβούργου σημαίνει ότι αυτή η αύξηση της χωρητικότητας πρέπει να προέρχεται κυρίως από μια επαρκή αύξηση της παραγωγικότητας σε όγκο. Ταυτόχρονα, πρέπει να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές εξωτερικές επιδράσεις, για παράδειγμα η κυκλοφοριακή συμφόρηση, η ρύπανση και η οδική ασφάλεια που προκαλούνται από τις δραστηριότητες του θαλάσσιου λιμένα στη ζωή των ντόπιων πολιτών, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του λιμανιού (Petrikinaetal., 2017). Συνοπτικά, ο στόχος είναι να δημιουργηθεί ένα πιο αποτελεσματικό, ασφαλές και χαμηλού κόστους περιβάλλον λιμένων.

Πάνω από 40.000 ταξίδια με φορτηγά επηρεάζουν έντονα το λιμάνι και την πόλη του Αμβούργου καθημερινά. Η διαχείριση αυτής της ροής κυκλοφορίας είναι ένα σημαντικό καθήκον για να παραμείνει το λιμάνι ελκυστικό για τις επιχειρήσεις και η πόλη ελκυστική για τους κατοίκους του. Ξεκινώντας το 2011, η λιμενική αρχή του Αμβούργου τοποθέτησε 300 αισθητήρες σε δρόμους και γέφυρες για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της οδικής κυκλοφορίας στο λιμάνι. Αυτά παρέχουν στο Κέντρο Διαχείρισης Λιμενικών Οδών συνεχείς ενημερώσεις σχετικά με την κατάσταση των γεφυρών, δηλαδή ανοιχτές/κλειστές και την κυκλοφορία σε όλο το

λιμάνι. Αυτά τα δεδομένα επιτρέπουν στο σύστημα διαχείρισης της κυκλοφορίας να λαμβάνει αποτελεσματικές αποφάσεις σχετικά με την κατεύθυνση των ροών κυκλοφορίας για τη βελτιστοποίηση των διαδρομών, και συνεπώς την ελαχιστοποίηση της συμφόρησης και του χρόνου διέλευσης για όλους τους πελάτες (Hirataetal., 2022). Τα φανάρια μπορούν να προσαρμοστούν ανάλογα και η ψηφιακή οδική σήμανση επικοινωνεί επί του παρόντος τις προτεινόμενες κατευθύνσεις, και επί του παρόντος η λιμενική αρχή εργάζεται για την απευθείας παροχή αυτών των πληροφοριών στα έξυπνα τηλέφωνα των οδηγών ή στους ενσωματωμένους υπολογιστές. Ομοίως, οι συστάσεις στάθμευσης, οι οποίες γίνονται με βάση τη συνεχή παρακολούθηση των χώρων στάθμευσης, επιτρέπουν σε όλους τους επισκέπτες του λιμανιού να βρίσκουν χώρο στάθμευσης με ευκολία. Η αυτόματη αναγνώριση ραντάρ των πλοίων και η ανίχνευση ταχύτητας υποδηλώνουν ακόμη ότι η διαχείριση της κυκλοφορίας μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας όχι μόνο την κατάσταση ως έχει των γεφυρών, αλλά και την κατάσταση μελλοντικής λειτουργίας, η οποία βελτιστοποιεί ακόμη περισσότερο την κυκλοφορία σύμφωνα με τις προβλεπόμενες καθυστερήσεις. Έτσι, οι γέφυρες μπορούν να προγραμματιστούν να ανοίγουν και να κλείνουν ακριβώς στην ώρα τους και να ανοίγουν μόνο όσο χρειάζεται για να περάσει το πλοίο, και αυτές οι ίδιες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τη δρομολόγηση της κυκλοφορίας. Η εξόρυξη συγκεντρωτικών δεδομένων για μεγαλύτερη χρονική περίοδο επιτρέπει στη συνέχεια στο Κέντρο Διαχείρισης Λιμενικών Οδών να βελτιώσει τις προβλέψεις χρόνου ταξιδιού, και σχεδιάστε μελλοντικές επενδύσεις ή τροποποιήσεις υποδομής κυκλοφορίας για περαιτέρω βελτιστοποίηση της ροής της κυκλοφορίας (Tyler, 2020). Το Κέντρο Ναυτικού Ελέγχου από την άλλη είναι ο φορέας που έχει αναλάβει τη διαχείριση της υδάτινης κυκλοφορίας. Οι πληροφορίες που συλλέγονται από αισθητήρες σχετικά με τις συνθήκες του ποταμού Έλβα και την κυκλοφορία των πλοίων στα ύδατα του

λιμανιού τροφοδοτούνται συνεχώς στο κέντρο, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να μοιραστεί αυτές τις πληροφορίες με όλα τα σκάφη για να διασφαλίσει την ομαλή πλεύση στα ύδατα του. Τέλος, το Αρχηγείο Εποπτείας Σιδηροδρόμων διαχειρίζεται ομοίως τις σιδηροδρομικές μεταφορές, η οποία μπορεί με τη σειρά της να μοιραστεί αυτές τις πληροφορίες με όλα τα σκάφη για να εξασφαλίσει την ομαλή πλεύση στα νερά της. Τέλος, το Αρχηγείο Εποπτείας Σιδηροδρόμων διαχειρίζεται ομοίως τις σιδηροδρομικές μεταφορές, η οποία μπορεί με τη σειρά της να μοιραστεί αυτές τις πληροφορίες με όλα τα σκάφη για να εξασφαλίσει την ομαλή πλεύση στα νερά της. Τέλος, το Αρχηγείο Εποπτείας Σιδηροδρόμων διαχειρίζεται ομοίως τις σιδηροδρομικές μεταφορές.

Όσο αναφορά τη γέφυρα Köhlbrand δεν είναι μόνο ορόσημο, αλλά και η κύρια αρτηρία για την κυκλοφορία που διέρχεται από το λιμάνι του Αμβούργου. Χτισμένη τη δεκαετία του 1970, η κατασκευή υπόκειται σε υψηλά επίπεδα πίεσης που προκύπτουν από τα αυξανόμενα επίπεδα οδικής κυκλοφορίας. Έως και 36.000 οχήματα περνούν πάνω από τη γέφυρα κάθε μέρα. Απαιτείται συνεχής και ακριβής παρακολούθηση της κατασκευής. Η εκτέλεση συμβατικών επιθεωρήσεων και συντήρησης αποτελεί ένα τεράστιο και απαιτητικό έργο. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφαλής λειτουργία καθώς και να αποφευχθεί το κλείσιμο των δρόμων και άλλοι περιορισμοί κυκλοφορίας στον υλικοτεχνικό κορμό του Αμβούργου, απαιτούνται έξυπνα μέτρα για την αντικατάσταση των εκτεταμένων και αντιδραστικών διαδικασιών με μικρότερες και πιο στοχευμένες προσεγγίσεις. Στο πλαίσιο του έργου «smartBRIDGEHamburg», η γέφυρα Köhlbrand εξοπλίστηκε με περισσότερους από 500 αισθητήρες, εσωτερικούς και εξωτερικούς, οι οποίοι συλλέγουν ψηφιακά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Wenneretal., 2021). Αυτά τα δεδομένα αναλύονται και μεταφράζονται σε δείκτες κατάστασης, οι οποίοι απεικονίζονται στο ψηφιακό δίδυμο της γέφυρας. Αυτό το

ψηφιακό δίδυμο επιτρέπει τη μόνιμη, συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης της γέφυρας. Το SmartBRIDGEHamburg συνδυάζει τα αποτελέσματα των παραδοσιακών επιθεωρήσεων με τις ψηφιακές πληροφορίες που λαμβάνονται από τη δομική διάγνωση και παρακολούθηση. Έτσι, όλοι οι εμπλεκόμενοι επωφελούνται από τα πλεονεκτήματα και των δύο διαδικασιών. Το smartBRIDGEHamburg δίνει τη δυνατότητα να εκτελείται προγνωστική συντήρηση, προβλέποντας και αποτρέποντας τη ζημιά πριν αυτή συμβεί. Οι εργασίες συντήρησης είναι λιγότερο ενοχλητικές, πιο οικονομικά αποδοτικές και υψηλότερης ποιότητας. Αυξάνοντας τους κύκλους ζωής των υποδομών και τη λειτουργική απόδοση, καθώς και μειώνοντας το κόστος και τις εκπομπές CO₂. Η βελτιστοποίηση και ο έγκαιρος προγραμματισμός των εργασιών επισκευής και έξυπνης συντήρησης έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και μειωμένο φόρτο εργασίας (Wenneretal., 2022). Η Λιμενική Αρχή του Αμβούργου σχεδιάζει να εφαρμόσει αυτήν την τεχνολογία και σε άλλα περιουσιακά στοιχεία υποδομής, όπως γέφυρες, τοίχους αποβάθρας και κλειδαριές. Αυτό είναι μέρος της στρατηγικής του οργανισμού για την ανάπτυξη βιώσιμων λιμενικών υποδομών στο μέλλον.

3.2.2. Αποτελέσματα και προτάσεις

Το IoT είναι μια τεχνολογία που εξαρτάται από την ελεύθερη ροή δεδομένων από έξυπνες συσκευές σε μια κεντρική πλατφόρμα που συντονίζει τη συγκέντρωση, την ανάλυση και την ανταλλαγή αυτών των δεδομένων. Ωστόσο, πολλές ανταγωνιστικές εταιρείες διέρχονται από το λιμάνι του Αμβούργου και συχνά διστάζουν να μοιραστούν πληροφορίες με μια κεντρική αρχή που θα συγκεντρώνει αυτές τις πληροφορίες με αυτές των ανταγωνιστών (Acciaroetal., 2020). Ως εκ τούτου, η λιμενική αρχή του Αμβούργου θα χρειαστεί να επενδύσει βαριά όχι μόνο στην παροχή ενός ασφαλούς συστήματος διαχείρισης δεδομένων που μοιράζεται μόνο

σχετικά δεδομένα με τα ενδιαφερόμενα μέρη μέσω κρυπτογραφημένης προσέγγισης, υποστηριζόμενη από συμφωνίες εμπιστευτικότητας, αλλά και γνωστοποιώντας το με σαφήνεια στις ίδιες εταιρείες.

Το στρατηγικό και επιχειρησιακό σχέδιο που περιγράφει λεπτομερώς όλα τα τρέχοντα και μελλοντικά έργα που στοχεύουν στην επίτευξη αυτού του στόχου προσδιορίζονται στο Σχέδιο Ανάπτυξης Λιμένα 2025 που εκδόθηκε το 2012 από τη Λιμενική Αρχή του Αμβούργου, δηλαδή την οντότητα που είναι αρμόδια για τον στρατηγικό σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη διακυβέρνηση του θαλάσσιου λιμένα. Η έκθεση περιέχει μια λεπτομέρεια πολλών προγραμμάτων που δεν σχετίζονται με την πληροφορική που θα στοχεύουν στον εκσυγχρονισμό και την αναβάθμιση της λιμενικής υποδομής και την εισαγωγή πράσινων πρακτικών, όπως είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο λιμάνι (Pham, 2023). Επιπλέον, περιγράφει λεπτομερώς τη σχεδιαζόμενη εξέλιξη προς ένα έξυπνο λιμάνι, για το οποίο ξεκίνησαν οι εργασίες το 2011. Αυτό το έξυπνο λιμάνι αποτελείται κυρίως από τρεις έξυπνους πυλώνες logistics: την έξυπνη λιμενική υποδομή, τις έξυπνες ροές κυκλοφορίας και τις έξυπνες ροές εμπορίου.

Αξίζει να τονιστεί πως το λιμάνι διαθέτει τέσσερα μεγάλα τερματικά εμπορευματοκιβωτίων ικανά για χειρισμό υψηλής απόδοσης. Τρεις από τους τερματικούς σταθμούς λειτουργούν από το HamburgerHafenundLogistik (HHLA), έναν όμιλο λιμενικής εφοδιαστικής με έδρα την Ευρώπη. Η χωρητικότητα των τερματικών σταθμών επεκτείνεται συνεχώς για να ανταποκριθεί στις αυξανόμενες απαιτήσεις για διακίνηση φορτίου. Το HHLA Container Terminal Burchardkai είναι η μεγαλύτερη εγκατάσταση διακίνησης φορτίου στο λιμάνι του Αμβούργου. Ο τερματικός σταθμός διαθέτει εννέα θέσεις ελλιμενισμού και έκταση 1,4 εκατομμυρίων

τετραγωνικών μέτρων. Επιπλέον, εξοπλισμένο με 27 γερανογέφυρες εμπορευματοκιβωτίων, συμπεριλαμβανομένων των σύγχρονων γερανών μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Twin-Forty, οι οποίοι μπορούν να φορτώσουν ή να εκφορτώσουν δύο εμπορευματοκιβώτια μήκους 40 ποδιών με μία μόνο κίνηση. Το τερματικό θα επεκταθεί στο μέλλον για να μπορεί να χειρίζεται 5,2 εκατομμύρια ισοδύναμες μονάδες είκοσι ποδιών (Karakaevetal., 2021).

4^ο Κεφάλαιο- Μέλλον και προκλήσεις των Ψηφιακών Διδύμων

Οι τεχνολογίες που συνθέτουν το DT, όπως το Internet of Things (IoT), το Industrial Internet of Things (IIoT), η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), τα μεγάλα δεδομένα, η προσομοίωση και το cloudcomputing, μεταξύ άλλων, βρίσκονται σε μια πορεία διαρκούς εξέλιξης και επομένως μπορεί να υποτεθεί ότι η DT θα συνεχίσει να εξελίσσεται παράλληλα με αυτές τις τεχνολογίες. Ως εκ τούτου, το πραγματικό δυναμικό του DT εξακολουθεί να κρύβεται πίσω από την ομίχλη της μελλοντικής του μορφής. Αυτό φαίνεται από τις εκτιμήσεις για την αγορά DT παγκοσμίως. Η παγκόσμια αγορά DT αναμένεται να αναπτυχθεί με ρυθμό 58% και σε μόλις έξι χρόνια, δηλαδή έως το 2026, αναμένεται να φτάσει τα 48,2 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ. Η πανδημία COVID-19 είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη της αγοράς DT, καθώς κατά και ιδίως μετά από αυτή η βιομηχανία άρχισε να πιέζει για την περαιτέρω ψηφιοποίηση των διαδικασιών (Zhangetal. 2023).

Οι άνθρωποι αποτελούν αναπόσπαστο μέρος οποιασδήποτε βιομηχανίας και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάπτυξη οποιουδήποτε DT. Το IEEE (The Institute of Electrical and ElectronicsEngineers) πιστεύει ότι στο μέλλον, το DT θα γίνει αναπόσπαστο μέρος της ανάπτυξης μηχανών, καθώς και της συμβιωτικής σχέσης ανθρώπου-μηχανής. Μερικοί ερευνητές βλέπουν το «DigitalTriplet» ως την επόμενη εξέλιξη του DT. Εκτός από τον φυσικό και τον κυβερνοχώρο κόσμο, το DigitalTriplet περιλαμβάνει επίσης τον «έξυπνο κόσμο δραστηριοτήτων» όπου οι άνθρωποι θα λύνουν προβλήματα χρησιμοποιώντας DT (Yauetal., 2020). Σε αντίθεση με το DT, όπου τα συστήματα και οι διαδικασίες είναι αυτοματοποιημένα, στο DigitalTriplet λαμβάνεται υπόψη η ανθρώπινη αλληλεπίδραση με το σύστημα και τη διαδικασία,

δημιουργώντας έτσι αξία από δεδομένα χρησιμοποιώντας ανθρώπινη νοημοσύνη και γνώση. Ο στόχος του «DigitalTriplet» είναι να υποστηρίξει τις μηχανολογικές δραστηριότητες σε όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού, της κατασκευής, της χρήσης, της συντήρησης, της ανακατασκευής και της κυκλοφορίας των πόρων ενσωματώνοντας και τους τρεις κόσμους, όπως ακριβώς το DT (Zhangetal., 2023).

4.1. Προκλήσεις για την εφαρμογή DigitalTwin

Η συνειδητοποίηση μιας τεχνολογίας μαμούθ, όπως η DT συνοδεύεται από τις δικές της προκλήσεις. Οι προκλήσεις που προκύπτουν με την ανάπτυξη ενός DT εξαρτώνται από την κλίμακα και την πολυπλοκότητά του, αλλά υπάρχουν ορισμένα εμπόδια με την τεχνολογία που είναι κοινά σε όλους. Η τεχνολογία DT που βρίσκεται στα αρχικά της στάδια σημαίνει ότι παρόλο που έχει μεγάλες δυνατότητες, η εφαρμογή της συνεπάγεται επιπλοκές που μπορεί να είναι είτε μηχανικές και τεχνολογικές είτε εμπορικές. Τέτοιες επιπλοκές περιλαμβάνουν ασάφεια γύρω από τον ορισμό ή την έννοια της DT, έλλειψη κατάλληλων εργαλείων, ακριβές επενδύσεις, ζητήματα που σχετίζονται με δεδομένα, έλλειψη κανόνων και κανονισμών, κ.λπ. (Tzachoretal. 2022).

4.1.1. Καινοτομία της Τεχνολογίας

Καθώς η DT εξακολουθεί να είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία, δεν υπάρχει σαφής κατανόηση σχετικά με την αξία που μπορεί να αποφέρει σε άτομα, επιχειρήσεις ή βιομηχανίες. Η ανικανότητα από την πλευρά της τεχνικής και πρακτικής γνώσης εμποδίζει επίσης την πρόοδο της τεχνολογίας. Υπάρχει επίσης έλλειψη περιπτώσιολογικών μελετών επιτυχημένων πρακτικών ή επιχειρηματικών μοντέλων που εφαρμόζουν το DT σε εταιρικές δραστηριότητες ή ρεαλιστικές εκτιμήσεις για το κόστος που συνεπάγεται αυτή η εφαρμογή (Singhetal., 2022).

Πολλές τεχνολογίες ενώνονται για να κάνουν το DT πραγματικότητα, όπως οι τρισδιάστατες προσομοιώσεις, το IoT, η τεχνητή νοημοσύνη, τα μεγάλα δεδομένα, η μηχανική μάθηση και το cloudcomputing. Δεδομένου ότι αυτές οι ίδιες οι τεχνολογίες βρίσκονται σε φάση ανάπτυξης, εμποδίζει την εξέλιξη της DT. Η υποδομή για την εφαρμογή DT πρέπει να βελτιωθεί για να ενισχυθεί η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας. Υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σε τεχνολογίες όπως η τεχνολογία υπολογιστών υψηλής απόδοσης, η τεχνολογία μηχανικής μάθησης, η εικονική-πραγματική διαδραστική τεχνολογία σε πραγματικό χρόνο, η ευφυής αντίληψη και η τεχνολογία σύνδεσης, μεταξύ άλλων, προκειμένου να εφαρμοστεί η DT (Qietal., 2018).

4.1.2. Χρόνος και Κόστος

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεράσει η DT για να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της είναι το υψηλό κόστος που σχετίζεται με την υλοποίησή της. Η όλη διαδικασία ανάπτυξης μοντέλων υπολογιστών εξαιρετικά υψηλής πιστότητας και η προσομοίωση διαδικασιών για τη δημιουργία ενός DT είναι μια χρονοβόρα και εντατική εργασία που απαιτεί επίσης τεράστια ποσότητα υπολογιστικής ισχύος για να εκτελεστεί, καθιστώντας έτσι την DT μια δαπανηρή επένδυση (Tzachoretal., 2022). Επιπλέον, η ενσωμάτωση του υπάρχοντος συστήματος με αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων μαζί με την απαίτηση για υποδομή πληροφορικής υψηλής απόδοσης, η οποία περιλαμβάνει υλικό καθώς και λογισμικό για την αποθήκευση και επεξεργασία αυτών των δεδομένων, συμβάλλει στο πρόσθετο κόστος. Ο αναλυτής και εμπειρογνώμονας της Gartner, MarcHalpern, έδειξε επίσης ανησυχία για τις πτυχές του DT που σχετίζονται με το κόστος και το χρόνο στο συνέδριο PDT Europe στο Γκέτεμποργκ της Σουηδίας, λέγοντας ότι η συγκέντρωση των εννοιών DT μπορεί να πάρει περισσότερο χρόνο και πόρους από ό,τι μπορεί κανείς να φανταστεί (Singhetal., 2021).

4.1.3. Έλλειψη προτύπων και κανονισμών

Καθώς υπάρχει πληθώρα μοντέλων και αρχιτεκτονικών DT διαθέσιμα στη βιβλιογραφία, υπάρχει ανάγκη για καθορισμό ενός συνεπούς πλαισίου για το DT σε ολόκληρο τον κλάδο που περιλαμβάνει κοινή και αμοιβαία κατανόηση των διεπαφών και τυποποίηση για ομοιομορφία μαζί με αποτελεσματικό σχεδιασμό της ροής δεδομένων για να διευκολύνει την προσβασιμότητα των δεδομένων χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλειά τους. Η τυποποίηση μοντέλων, διεπαφών, πρωτοκόλλων και δεδομένων είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική επικοινωνία τρίτων, την ασφάλεια των προϊόντων και των ανθρώπων, την ασφάλεια δεδομένων και την ακεραιότητα, ειδικά σε βιομηχανίες όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη κ.λπ (Tahmasebiniaetal., 2023). Επιπλέον, πρέπει να αναπτυχθούν πρότυπα και διαλειτουργικότητα βάσει προτύπων για την αντιμετώπιση των κοινωνικών και οργανωτικών προκλήσεων που ξεδιπλώνονται από τον ψηφιακό μετασχηματισμό στις βιομηχανίες. Η έλλειψη προτύπων επικοινωνίας συσκευής και συλλογής δεδομένων μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την ποιότητα των δεδομένων που υποβάλλονται σε επεξεργασία για το DT, κάτι που θα αντικατοπτρίζεται στην απόδοσή του.

4.1.4 Ζητήματα που σχετίζονται με τα δεδομένα

Καθώς η τεχνολογία DT ασχολείται με τα δεδομένα, μία από τις μεγαλύτερες ανησυχίες που ανακύπτουν αφορά το απόρρητο, την εμπιστευτικότητα, τη διαφάνεια και την ιδιοκτησία αυτών των δεδομένων.

Η κατοχή και η κοινή χρήση δεδομένων επηρεάζεται από τις πολιτικές της εταιρείας καθώς και από τη νοοτροπία των ανθρώπων και της κοινωνίας σχετικά με την ιδιοκτησία δεδομένων, θέτοντας έτσι έναν περιορισμό στην DT που είναι πέρα από

την πολυπλοκότητα της τεχνολογίας και της μηχανικής. Η μη ύπαρξη κατάλληλων πολιτικών σχετικά με την κοινή χρήση των δεδομένων εσωτερικά (εντός του οργανισμού) ή εξωτερικά (ενδιαφερόμενα μέρη στην αλυσίδα εφοδιασμού) μπορεί να οδηγήσει σε σιλό δεδομένων σε διαφορετικά τμήματα ενός οργανισμού, τα οποία μπορεί να είναι επιζήμια για την αλυσίδα αξίας, καθώς τα δεδομένα οδηγούν σε ασυνέπεια και ζητήματα συγχρονισμού (Uhlemannetal., 2017). Ένα άλλο πιθανό ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί είναι ο τρόπος κοινής χρήσης των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών DT, δηλαδή η διαλειτουργικότητα δεδομένων. Σε μια ρύθμιση όπου υπάρχουν πολλαπλοί DT σε διαφορετικά ιεραρχικά επίπεδα, το καθένα που δημιουργεί διαφορετικό τύπο δεδομένων και το ένα τροφοδοτεί το άλλο DT μπορεί να δημιουργήσει μια περίπλοκη σχέση μεταξύ του συνόλου δεδομένων που προκαλεί προβλήματα διαλειτουργικότητας δεδομένων. Η κυβερνοασφάλεια δεν μπορεί να παραμεληθεί όταν πρόκειται για το χειρισμό των δεδομένων. Από τη μια πλευρά, όπου η ύπαρξη σιλό δεδομένων μπορεί να επηρεάσει τη συνολική απόδοση της DT, η έλλειψη αυτών καθιστά την DT πιο ευάλωτη στο έγκλημα στον κυβερνοχώρο (Helbing&Sánchez-Vaquerizo, 2023).

4.1.5. Αναντιστοιχία Κύκλου Ζωής

Μια επιπλέον ανησυχία σχετικά με την τεχνολογία DT σχετίζεται με τα προϊόντα που έχουν μεγάλο κύκλο ζωής, όπως κτίρια, αεροσκάφη, πλοία, μηχανήματα ή ακόμα και πόλεις. Οι κύκλοι ζωής τέτοιων προϊόντων είναι πολύ μεγαλύτεροι από την εγκυρότητα του λογισμικού που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό ή την προσομοίωση του DT καθώς και για την αποθήκευση και την ανάλυση των δεδομένων για το DT (Tzachoretal., 2022). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει υψηλός κίνδυνος, στο μέλλον σε κάποια χρονική στιγμή, είτε οι μορφές που χρησιμοποιούνται από το

λογισμικό να καταστούν παρωχημένες είτε να κλειδωθούν με τον ίδιο προμηθευτή για νέες εκδόσεις λογισμικού ή άλλα εργαλεία συγγραφής.

4.2. Περιορισμοί Ψηφιακών Διδύμων στην Ναυτιλία

Η DT τεχνολογία βρίσκεται στο αρχικό στάδιο όσον αφορά την εφαρμογή στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Σύμφωνα με τους Giering&Dyck (2021), τα στοιχεία που αποτελούν τους βασικούς περιορισμούς της υιοθέτησης της τεχνολογίας αυτής στη ναυτιλία είναι:

- Έλλειψη απαραίτητων υποδομών στην υπάρχουσα ναυτιλιακή βιομηχανία.
- Έλλειψη δεξιοτήτων λογισμικού και υλικού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων ενδιαφερομένων.
- Περιορισμένη συνδεσιμότητα λόγω περιορισμών μετάδοσης δεδομένων στη θάλασσα.
- Εμπόδιο επικοινωνίας μεταξύ των υποβρυχίων οχημάτων (Υποβρύχια και UAV) με το DT που λειτουργεί στην ξηρά.
- Η απροθυμία μετάβασης σε ψηφιακά συστήματα από μακροχρόνιες πλατφόρμες χειροκίνητου υλικού.
- Το κενό γνώσης της τεχνολογίας DT και τα οφέλη που φθάνουν στη βιομηχανία, καθώς η ακαδημαϊκή κοινότητα ασχολείται κυρίως με το στάδιο έρευνας και ανάπτυξης.
- Έλλειψη ερευνητικής συνεργασίας μεταξύ βασικών ερευνητών/ινστιτούτων.

- Η τεχνολογική ετοιμότητα υστερεί ενώ η ανάπτυξη της ιδέας βρίσκεται σε πλήρη ταχύτητα.
- Επιπλοκές στην ασφάλεια των δεδομένων όσον αφορά την εμπιστευτικότητα, τη μη απόρριψη και τον έλεγχο ταυτότητας.
- Μεγάλα εμπόδια χειρισμού δεδομένων στη διατήρηση δεδομένων, την προσβασιμότητα και την οπτικοποίηση.
- Έχει διεξαχθεί πολύ περιορισμένη έρευνα σχετικά με τη λειτουργία του DT στη φάση απόσυρσης/παροπλισμού.

4.3. Μέλλον Ψηφιακών Διδύμων στην Ναυτιλία

Με τους γνωστούς περιορισμούς που επισημαίνονται παραπάνω, το DT αναδείχθηκε πρόσφατα ως ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία με τη βοήθεια υπολογιστικών πόρων υψηλής τεχνολογίας, συναρτήσεων AI, BigData Analytics κ.λπ. Έτσι, το ίδιο υιοθετείται σε μεγάλο βαθμό από τον ακαδημαϊκό κόσμο, τη βιομηχανία και τους ερευνητικούς οργανισμούς. Στον ναυτιλιακό τομέα, μία από τις πιο κρίσιμες πτυχές είναι η επικοινωνία, η οποία είναι υποχρεωτική προϋπόθεση για οποιοδήποτε σύστημα που βασίζεται σε DT (VanOs, 2018). Η σύνδεση δεδομένων μεταξύ του χερσαίου, υπεράκτιου ή υποβρύχιου φυσικού μοντέλου με το DT πρέπει να δημιουργηθεί με συνεχή συγχρονισμό. Με την ανάπτυξη δορυφορικών συνδέσεων και δικτύων που βασίζονται στην ξηρά για πλοία παράκτιας πλοήγησης, το DT γίνεται πολύ πιο πρακτικό για υλοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο. Η ολοκληρωμένη ανταλλαγή δεδομένων και μια διαδικασία αναθεώρησης βάσει μοντέλου πρόκειται να ενταχθούν στις υπάρχουσες μη αυτόματες λειτουργίες, βελτιστοποιώντας την απόδοση των λιμένων παγκοσμίως.

Συμπεράσματα-Προτάσεις

Συμπερασματικά, ο στόχος της δημιουργίας έξυπνων λιμένων είναι να ενδυναμώσει τα λιμάνια με «σοφία», κάνοντας τα λιμάνια να «σκέφτονται σαν άνθρωποι» έτσι ώστε να επιτυγχάνουν πιο ορθολογική, πιο αξιόπιστη, πιο αποτελεσματική, πιο πράσινη και πιο έξυπνη λειτουργία λιμένων. Οι ευφυείς λιμένες έχουν αποδειχθεί ότι βελτιώνουν την αποδοτικότητα των λιμένων, την επικοινωνία και την ικανοποίηση του πληρώματος. Ωστόσο, η αξιολόγηση της απόδοσης ενός έξυπνου λιμανιού είναι ένα θέμα διαφορούμενης συναίνεσης. Με την ταχεία ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα έξυπνο σύστημα αξιολόγησης της απόδοσης των λιμένων, τόσο για να αντικατοπτρίζει τα χαρακτηριστικά και τις τάσεις ανάπτυξης των έξυπνων λιμένων, ώστε να προωθηθεί περαιτέρω η τυποποίησή τους και να εκδώσει τεχνικές οδηγίες για την κατασκευή έξυπνων λιμανιών.

Με τη ραγδαία ανάπτυξη των λιμένων, την αύξηση της ζήτησης για θαλάσσιες μεταφορές και την αύξηση των βιομηχανικών δραστηριοτήτων στους λιμένες, η ζήτηση ενέργειας έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι πηγές ενέργειας είναι περιορισμένες, όπως επίσης είναι και ο προϋπολογισμός των λιμένων, το έξυπνο λιμάνι καλείται να εξετάσει προσεγγίσεις για τη μείωση της ενεργειακής του κατανάλωσης και τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τόσο για τη μείωση των εκπομπών ρύπων, όσο και την επίτευξη της ανεξαρτησίας του ως προς τις πηγές ενέργειας. Ως εκ τούτου, η διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας από έναν ευφυή λιμένα θα πρέπει να βασίζεται σε τρεις άξονες: τη χρήση και την παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την αποδοτική κατανάλωση της ενέργειας και την υιοθέτηση Συστημάτων Διαχείρισης Ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας στους λιμένες μπορεί να διακριθεί στην άμεση και έμμεση κατανάλωση ενέργειας. Οι άμεσοι

καταναλωτές ενέργειας περιλαμβάνουν το σύστημα φωτισμού της περιοχής του τερματικού λιμένα, τα γραφεία και άλλες εγκαταστάσεις και τις εγκαταστάσεις στάθμευσης. Οι έμμεσοι καταναλωτές ενέργειας είναι εκείνοι που ακολουθούν εποχιακά μοτίβα ενεργειακής κατανάλωσης. Με άλλα λόγια, εξαρτώνται από τον όγκο των λιμενικών δραστηριοτήτων. Η βελτίωση των διεργασιών και του εξοπλισμού, ώστε να απαιτείται λιγότερη ενέργεια και να αποφεύγονται οι ενεργειακές απώλειες οδηγεί σε αποδοτικότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος

Η αστάθεια της οικονομικής κατάστασης της τελευταίας δεκαετίας και η αύξηση της παγκόσμιας ανταγωνιστικότητας έχουν οδηγήσει σε ισχυρές τάσεις καινοτομίας, ιδιαίτερα μεταξύ των αναπτυγμένων χώρων. Ωστόσο, η ενοποίηση της επικοινωνίας και πληροφορικής στην υποδομή του λιμανιού έχει απαιτήσει νέες τεχνολογικές λύσεις όπως Internet of Things και BigData, που δημιουργούν ευκαιρίες ανάπτυξης, όχι μόνο για τον κλάδο, αλλά συμβάλλουν επίσης στην ανάπτυξη της διαχείρισης των δραστηριοτήτων της αλυσίδας λιμένων. Τα τελευταία χρόνια, πολλές παράκτιες χώρες, ξεκίνησαν να κατασκευάζουν έξυπνα λιμάνια και έχουν αναδείξει σημαντικά αποτελέσματα. Οι ευφυείς λιμένες στην αλυσίδα είναι αναπόφευκτα απαραίτητοι για γρήγορη, ευέλικτη και συλλογική ανταπόκριση στη ζήτηση των πελατών. Επομένως, αντιμετωπίζοντας το μεταβαλλόμενο περιβάλλον της αλυσίδας λιμένων, η εφαρμογή της τεχνολογίας IoT στην έξυπνη διαχείριση της αλυσίδας λιμένων γίνεται η αναπτυξιακή τάση των σύγχρονων εταιρειών.

Συνολικά το πλαίσιο λειτουργίας ενός έξυπνου λιμένα περιλαμβάνει, να μπορεί να παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο το όχημα, το container, το φορτίο, το πλοίο και τη διαδικασία εκκαθάρισης, και τελικά να σχηματίσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης για έξυπνη και οπτική απεικόνιση των διαδικασιών. Αρχικά, η

ενοποιημένη τυποποίηση των δεδομένων του συστήματος και το σύστημα ανταλλαγής δεδομένων είναι κατασκευασμένα για να εξυπηρετήσουν ανάγκες ανάλυσης καρτών και δεδομένων. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας την τεχνολογία IoT ως βασική υποδομή, και χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως η RFID, αισθητήρες, WSN, ασύρματες επικοινωνίες, υπηρεσίες cloud, 3D αναπαράσταση, καθώς και τη γρήγορη αυτόματη επίβλεψη, απόκτηση και παρακολούθηση των εμπορευματοκιβωτίων, των οχημάτων μεταφοράς και των αγαθών, μπορεί να επιτευχθεί η πληροφοριακή δικτύωση και ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε λιμάνι, αποβάθρες, αποθήκες, τελωνεία, φορτία, έτσι ώστε να σχηματιστεί μια έξυπνη διαχείριση της ροής κυκλοφορίας, της εφοδιαστικής και της ροής πληροφοριών. Επίσης, οι ευφείς λιμένες μπορούν να δημιουργήσουν ένα αποδοτικότερο, ταχύτερο, ασφαλέστερο και οικονομικό περιβάλλον. Ένας έξυπνος λιμένας παρουσιάζει υψηλά πρότυπα εποπτείας και εκτελωνισμού, όπως η πραγματικού χρόνου, έξυπνη, οπτική εποπτεία των εμπορευμάτων και των κανονιστικών ρυθμίσεων, ενώ εμφανίζει πιο αποδοτική και χαμηλού κόστους παραγωγή. Η χρήση πολλών τεχνολογιών IoT στις αποβάθρες λιμένων, όπως είναι η ηλεκτρονική συσκευή αναγνώρισης της πινακίδας κυκλοφορίας RFID, η ηλεκτρονική τελωνειακή κλειδαριά RFID, τα έξυπνα container κ.λπ., μπορεί να επιτύχει αυστηρή εποπτεία και αποτελεσματική εκκαθάριση του εκτελωνισμού για την εξοικονόμηση εργασίας και κόστους, που μπορούν να υλοποιηθούν με έξυπνο προγραμματισμό παραγωγής στο λιμάνι και βελτίωση της απόδοσης προγραμματισμού παραγωγής του τερματικού. Επιπλέον, άλλες τεχνολογίες του IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση των εμπορευματοκιβωτίων, τη βελτιστοποίηση της διαδρομής μεταφοράς των φορτηγών και τον βέλτιστο προγραμματισμό.

Οι ψηφιακές τεχνολογίες λαμβάνουν όλο και μεγαλύτερη προσοχή στον τομέα των θαλάσσιων μεταφορών. Μεγάλα λιμάνια, όπως το Ρότερνταμ ή η Αμβέρσα επενδύουν ήδη σε μεγάλο βαθμό σε τεχνολογίες ψηφιακών βάσεων δεδομένων και, ως εκ τούτου, συνεχίζουν να βασίζονται σε μια βιώσιμη επέκταση αυτών των προηγμένων τεχνολογιών που υπόσχονται ασφάλεια, βελτιστοποίηση διαδικασιών και βιωσιμότητα. Αντίθετα, ειδικά τα μικρότερα λιμάνια δεν έχουν ή έχουν περιορισμένη γνώση για το τι είναι το Industry 4.0, το IoT και το Blockchain και ποιες δυνατότητες μπορεί να έχουν. Ο κύριος στόχος τέτοιων καινοτόμων ψηφιακών τεχνολογιών είναι η βελτιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης και της ενεργειακής ζήτησης, η μείωση της κατανάλωσης πόρων και αποβλήτων και η καλύτερη ποιότητα του χαρτοφυλακίου υπηρεσιών. Πράγματι, Οι θαλάσσιοι λιμένες βασίζονται σε μεγάλες εταιρείες μεταφορών και logistics όσον αφορά την ανάπτυξη και την εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογικών εφαρμογών. Δεδομένου ότι μεγάλες εταιρείες μεταφορών, όπως η Maersk επενδύουν ήδη σε μεγάλο βαθμό σε ψηφιακές τεχνολογίες που θεωρούνται ως παράγοντες για τον ψηφιακό μετασχηματισμό στο πλαίσιο του Industry and Logistics 4.0, είναι σημαντικό να υιοθετήσουν και τα λιμάνια —συμπεριλαμβανομένων ιδίως των μικρών και μεσαίων λιμένων— την ευκαιρία να εφαρμόσουν αυτές τις νέες τεχνολογικές λύσεις προκειμένου να ενσωματωθούν με βιώσιμο τρόπο στις

παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού. Ειδικά, όταν πρόκειται για τη νέα οραματική ιδέα μιας έξυπνης ανάπτυξης λιμανιού, η οποία τυγχάνει αυξανόμενης προσοχής στην πράξη και το ερευνητικό τοπίο, η έρευνα με την ψηφιοποίηση και τις σχετικές νέες τεχνολογίες γίνεται όλο και πιο σημαντική. Η ιδέα μιας έξυπνης ανάπτυξης λιμένων συνδέεται με μια καινοτόμο προσπάθεια όπου η εστίαση επικεντρώνεται στη βελτίωση της ανταγωνιστικότητας του λιμανιού και στη διευκόλυνση της επιχειρηματικής συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών φορέων λιμένων για την επίτευξη οριζόντιας και κάθετης ολοκλήρωσης των αλυσίδων εφοδιασμού. Ως εκ τούτου, σε ένα τέτοιο σενάριο το λιμάνι θα είναι πλήρως συνδεδεμένο μέσω ενός δικτύου επικοινωνιών και πλήρως ενσωματωμένο με το περιβάλλον του (δηλαδή όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς του κλάδου) καθώς και με άλλους λιμένες και φορείς logistics σε όλο τον κόσμο.

Συμπερασματικά από τα παραπάνω προκύπτει πως τα ελληνικά λιμάνια είναι ωφέλιμο να μιμηθούν τεχνολογίες και διαδικασίες που χρησιμοποιούνται σε αλλά διεθνή λιμάνια. Πιο αναλυτικά, τα ελληνικά λιμάνια θα μπορούσαν να εκμεταλλευτούν στο έπακρο τις δυνατότητες που προσφέρουν οι τεχνολογίες InternetOfThings (IOT), και να εστιάσουν στην ασφαλέστερη και πιο αποτελεσματική διαχείριση της κυκλοφορίας στο λιμάνι. Επιπλέον, θα πρέπει να συμβαδίζουν με τις διεθνείς απαιτήσεις της σύγχρονης ναυτιλίας, διότι παρουσιάζεται η επιτακτική ανάγκη για την υιοθέτηση των ψηφιακών δίδυμων. Στον τομέα των logistics, τα digitaltwins μπορούν να ενεργήσουν σε διάφορα σενάρια εφαρμογών σε ολόκληρη την εφοδιαστική αλυσίδα όπως στην διαχείριση στόλου εμπορευματοκιβωτίων, της παρακολούθησης αποστολών και της παρακολούθησης logistics. Για παράδειγμα, οι αισθητήρες IoT που τοποθετούνται σε μεμονωμένα εμπορευματοκιβώτια μπορούν να δείχνουν τη θέση τους και να παρακολουθούν τη ζημιά ή τη μόλυνση του φορτίου. Επιπροσθετως, η διαχείριση φορτίου είναι η πιο βασική επιχείρηση που λειτουργεί σε διεθνή έξυπνα

λιμάνια. Τα μοντέλα που βασίζονται στο DT επιτρέπουν την αποτελεσματική λειτουργία γερανών και άλλου εξοπλισμού διακίνησης φορτίου, αλλά και διασφαλίζουν ότι ο σχετικός εξοπλισμός συντηρείται σωστά, βοηθώντας τους χειριστές τερματικών να αυξήσουν την απόδοση και την παραγωγικότητα. Το σύστημα DT μπορεί να βοηθήσει στην λειτουργία αυτή, με χρήση δικτυωμένου εξοπλισμού διακίνησης φορτίου για να διεκπεραιωθούν οι εργασίες σε πραγματικό χρόνο.

Εκτός από τη λειτουργική αποτελεσματικότητα και την ασφάλεια, τα βασικά κριτήρια για την αξιολόγηση της ποιότητας ανάπτυξης ενός έξυπνου λιμανιού παγκόσμιας κλάσης περιλαμβάνουν την περιβαλλοντική του κατάσταση. Είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για να καθοριστεί εάν το έξυπνο λιμάνι επιτυγχάνει μια καλή ισορροπία μεταξύ των οικονομικών συμφερόντων και της βιώσιμης ανάπτυξης στο μέλλον. Το κλειδί της διαχείρισης που βασίζεται σε DT για την προστασία του περιβάλλοντος λιμένων αναμένεται να περιλαμβάνει δραστηριότητες για την διατήρηση της ποιότητας του περιβάλλοντος, τη διαχείριση των εκκενώσεων ρύπων και την περιβαλλοντική απόκριση έκτακτης ανάγκης. Η βελτιστοποίηση πόρων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη ροή δεδομένων. Ως εκ τούτου, διάφορα περιβαλλοντικά δεδομένα του λιμένα, συμπεριλαμβανομένων των δεδομένων πηγής ρύπανσης, μετεωρολογικών δεδομένων, περιβαλλοντικών δεδομένων και άλλων, συλλέγονται από εξοπλισμό ανίχνευσης. Στη συνέχεια, το σύστημα που βασίζεται σε DT χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, σύγχρονης περιγραφής και δυναμικής πρόβλεψης των παραμέτρων της περιβαλλοντικής διαχείρισης λιμένων. Εν τω μεταξύ, η διαχείριση μέσω DT, με τεχνολογία δικτύου, βοηθά το λιμάνι να μειώσει την κατανάλωση και τη σπατάλη ενέργειας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Acciaro, M., Renken, K., &Dirzka, C. (2020). Integrated port cities: The case of Hamburg. *European Port Cities in Transition: Moving Towards More Sustainable Sea Transport Hubs*, 287-301.

Ahn, J., Joung, T. H., Kang, S. G., & Lee, J. (2019). Changes in container shipping industry: Autonomous ship, environmental regulation, and reshoring. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 3(3-4), 21-27.

Aregall, M. G., Bergqvist, R., & Monios, J. (2018). A global review of the hinterland dimension of green port strategies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 23-34.

Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE access*, 7, 167653-167671.

Barros, C. P., & Athanassiou, M. (2004). Efficiency in European seaports with DEA: evidence from Greece and Portugal. *Maritime Economics & Logistics*, 6, 122-140.

Belfkih, A., Duvallet, C., & Sadeg, B. (2017). The Internet of Things for smart ports: Application to the port of Le Havre. *Proceedings of IPaSPort, 2017*(May).

Bo, W., Karpathiotaki, P., & Changzheng, D. (2018). The central role of the Mediterranean Sea in the BRI and the importance of Piraeus Port. *J. WTO & China*, 8, 98.

Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, A. S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. D. J. (2022). Digital twin

technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335.

Bracke, V., Sebrechts, M., Moons, B., Hoebeke, J., De Turck, F., & Volckaert, B. (2021). Design and evaluation of a scalable Internet of Things backend for smart ports. *Software: Practice and Experience*, 51(7), 1557-1579.

Campfens, V., & Dekker, C. (2018). Turning Rotterdam into the “World’s Smartest Port” with IBM Cloud & IoT. *Ibm. com*, 31, 2018.

Castellano, R., Fiore, U., Musella, G., Perla, F., Punzo, G., Risitano, M., ... & Zanetti, P. (2019). Do digital and communication technologies improve smart ports? A fuzzy DEA approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(10), 5674-5681.

Chen, J., Huang, T., Xie, X., Lee, P. T. W., & Hua, C. (2019). Constructing governance framework of a green and smart port. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(4), 83.

Cheng, S., Azarian, M. H., & Pecht, M. G. (2010). Sensor systems for prognostics and health management. *Sensors*, 10(6), 5774-5797.

Clemente, D., Cabral, T., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2023). Blue Seaports: The Smart, Sustainable and Electrified Ports of the Future. *Smart Cities*, 6(3), 1560-1588.

Costa, J. P., LaCalle, I., Llorente, M. A., LE BRUN, O. L. I. V. I. E. R., Ptsikas, L., de Marco, G., ... & ŠIR, M. (2021). Advantage of a Green and Smart Port of the Future. *WIT Transactions on The Built Environment*, 204, 203-217.

D'Amico, G., Szopik-Depczyńska, K., Dembińska, I., & Ioppolo, G. (2021). Smart and sustainable logistics of Port cities: A framework for comprehending enabling factors, domains and goals. *Sustainable Cities and Society*, 69, 102801.

de la Peña Zarzuelo, I., Soeane, M. J. F., & Bermúdez, B. L. (2020). Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, 20, 100173.

Douaioui, K., Fri, M., & Mabrouki, C. (2018, April). Smart port: Design and perspectives. In *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)* (pp. 1-6). IEEE.

Douaioui, K., Fri, M., & Mabrouki, C. (2018, April). The interaction between industry 4.0 and smart logistics: concepts and perspectives. In *2018 international colloquium on logistics and supply chain management (LOGISTIQUA)* (pp. 128-132). IEEE.

Du, R., Mahmood, A., & Auer, G. (2022). Realizing 5G smart-port use cases with a digital twin. *Ericsson Technology Review*, 2022(13), 2-11.

Dufour, C., Soghomonian, Z., & Li, W. (2018, June). Hardware-in-the-loop testing of modern on-board power systems using digital twins. In *2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)* (pp. 118-123). IEEE.

Durán, C. A., Córdova, F. M., & Palominos, F. (2019). A conceptual model for a cyber-social-technological-cognitive smart medium-size port. *Procedia computer science*, 162, 94-101.

- Falkenthal, M., Breitenbücher, U., Christ, M., Endres, C., Kempa-Liehr, A. W., Leymann, F., & Zimmermann, M. (2016). Towards function and data shipping in manufacturing environments: how cloud technologies leverage the 4th industrial revolution. *Proceedings of the 10th Advanced Summer School on Service Oriented Computing*, 16-25.
- Fotopoulou, S., Karafagka, S., Karatzetzou, A., & Pitolakis, K. (2022). System-Wide Seismic Risk Assessment of Port Facilities; Application to the Port of Thessaloniki, Greece. *Sustainability*, 14(3), 1424.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE access*, 8, 108952-108971.
- Giering, J. E., & Dyck, A. (2021). Maritime Digital Twin architecture: A concept for holistic Digital Twin application for shipbuilding and shipping. *at-Automatisierungstechnik*, 69(12), 1081-1095.
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches*, 85-113.
- Guze, S., & Ledóchowski, M. (2016). Ship traffic and port operation information critical infrastructure network. *Journal of Polish Safety and Reliability Association*, 7(2).
- Hannesson, E. (2008). SafeSeaNet and traffic monitoring of ships and dangerous or polluting goods in maritime transport within the European Economic Area. *International Journal of Liability and Scientific Enquiry*, 1(4), 351-362.

- Harper, K. E., Malakuti, S., & Ganz, C. (2019). Digital twin architecture and standards.
- HAYES, A. M. (2019). SafeSeaNet Ecosystem Quick Start Guide v0. 3.3 APRIL.
- He, B., & Bai, K. J. (2021). Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review. *Advances in Manufacturing*, 9, 1-21.
- Heikkilä, M., Saarni, J., & Saurama, A. (2022). Innovation in Smart Ports: Future Directions of Digitalization in Container Ports. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1925.
- Helbing, D., & Sánchez-Vaquerizo, J. A. (2023). Digital twins: potentials, ethical issues and limitations. In *Handbook on the politics and governance of Big Data and Artificial Intelligence* (pp. 64-104). Edward Elgar Publishing.
- Hentschel, M., Ketter, W., & Collins, J. (2018). Renewable energy cooperatives: Facilitating the energy transition at the Port of Rotterdam. *Energy policy*, 121, 61-69.
- Hirata, E., Watanabe, D., Lambrou, M., Banyai, T., Banyai, A., & Kaczmar, I. (2022). Shipping digitalization and automation for the smart port. In *Supply chain—recent advances and new perspectives in the industry 4.0 era*. IntechOpen.
- Ilin, I., Jahn, C., Weigell, J., & Kalyazina, S. (2019, September). Digital technology implementation for smart city and smart port cooperation. In *International Conference on Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019)* (pp. 493-496). Atlantis Press.
- Ilin, I., Jahn, C., Weigell, J., & Kalyazina, S. (2019, September). Digital technology implementation for smart city and smart port cooperation. In *International Conference*

on *Digital Technologies in Logistics and Infrastructure (ICDTLI 2019)* (pp. 493-496).

Atlantis Press.

Im, I., Shin, D., & Jeong, J. (2018). Components for smart autonomous ship architecture based on intelligent information technology. *Procedia computer science, 134*, 91-98.

Javaid, M., & Haleem, A. (2023). Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*.

Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP journal of manufacturing science and technology, 29*, 36-52.

Jović, M., Kavran, N., Aksentijević, S., & Tijan, E. (2019, May). The transition of Croatian seaports into smart ports. In *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 1386-1390). IEEE.

Jović, M., Tijan, E., Aksentijević, S., & Čišić, D. (2019, May). An overview of security challenges of seaport IoT systems. In *2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 1349-1354). IEEE.

Kapkaeva, N., Gurzhiy, A., Maydanova, S., & Levina, A. (2021). Digital platform for maritime port ecosystem: Port of Hamburg case. *Transportation Research Procedia, 54*, 909-917.

Karaś, A. (2020). Smart port as a key to the future development of modern ports. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 14(1).

Klar, R., Fredriksson, A., & Angelakis, V. (2023). Digital twins for ports: Derived from smart city and supply chain twinning experience. *arXiv preprint arXiv:2301.10224*.

Kosse, S., Vogt, O., Wolf, M., König, M., & Gerhard, D. (2022). Digital twin framework for enabling serial construction. *Frontiers in Built Environment*, 8, 864722.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihm, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *Ifac-PapersOnline*, 51(11), 1016-1022.

Kuo, S. Y., Huang, X. R., & Chen, L. B. (2022). Smart ports: Sustainable smart business port operation schemes based on the Artificial Intelligence of Things and blockchain technologies. *IEEE Potentials*, 41(6), 32-37.

Kupriyanovsky, Y., Kupriyanovsky, V., Klimov, A., Namiot, D., Dolbnev, A., Sinyagov, S., ... & Larin, O. (2018). Smart container, smart port, BIM, Internet Things and blockchain in the digital system of world trade. *International Journal of Open Information Technologies*, 6(3), 49-94.

Kupriyanovsky, Y., Kupriyanovsky, V., Klimov, A., Namiot, D., Dolbnev, A., Sinyagov, S., ... & Larin, O. (2018). Smart container, smart port, BIM, Internet Things and blockchain in the digital system of world trade. *International Journal of Open Information Technologies*, 6(3), 49-94.

- Laas, B. T. (2020). The new port infrastructure: strategic design of a container data platform for Port of Rotterdam.
- Lam, J. S. L., & Van de Voorde, E. (2012). Green port strategy for sustainable growth and development. In *International Forum on Shipping, Ports and Airports (IFSPA) 2012: Transport Logistics for Sustainable Growth at a New Level Hong Kong Polytechnic University*.
- Lee, P. T. W., & Lam, J. S. L. (2017). A review of port devolution and governance models with compound eyes approach. *Transport Reviews*, 37(4), 507-520.
- Lee, T. H. (2020). Smart Port Policy Trend of Europe and Singapore and Its Political Implications. *Journal of Korea Port Economic Association*, 36(1), 77-90.
- Li, K. X., Li, M., Zhu, Y., Yuen, K. F., Tong, H., & Zhou, H. (2023). Smart port: A bibliometric review and future research directions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 174, 103098.
- Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346-361.
- Liu, X., Jiang, D., Tao, B., Xiang, F., Jiang, G., Sun, Y., ... & Li, G. (2023). A systematic review of digital twin about physical entities, virtual models, twin data, and applications. *Advanced Engineering Informatics*, 55, 101876.
- Ma, Y., & Peverelli, P. J. (2019). Strategic decisions in Chinese state-owned enterprises as outcome of the sensemaking of the CEO: the case of COSCO's

emerging involvement in the Port of Piraeus. *Transnational Corporations Review*, 11(1), 50-64.

Madusanka, N. S., Fan, Y., Yang, S., & Xiang, X. (2023). Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), 1021.

Mashaly, M. (2021). Connecting the twins: A review on digital twin technology & its networking requirements. *Procedia Computer Science*, 184, 299-305.

Mendes Constante, J., de Langen, P. W., & FurióPruñonosa, S. (2023). Innovation ecosystems in ports: a comparative analysis of Rotterdam and Valencia. *Journal of Shipping and Trade*, 8(1), 18.

Merk, O., & Notteboom, T. (2013). The Competitiveness of Global Port-Cities: The Case of Rotterdam/Amsterdam, the Netherlands.

Mi, W., & Liu, Y. (2022). Smart Port and Artificial Intelligence. In *Smart Ports* (pp. 81-98). Singapore: Springer Singapore.

Mi, W., & Liu, Y. (2022). Smart Port and Machine Vision. In *Smart Ports* (pp. 99-125). Singapore: Springer Singapore.

Mi, W., & Liu, Y. (2022). Smart Port and System Simulation/Emulation. In *Smart Ports* (pp. 149-170). Singapore: Springer Singapore.

Min, H. (2022). Developing a smart port architecture and essential elements in the era of Industry 4.0. *Maritime Economics & Logistics*, 24(2), 189-207.

Molavi, A., Lim, G. J., & Race, B. (2020). A framework for building a smart port and smart port index. *International journal of sustainable transportation*, 14(9), 686-700.

Moon, D. S. H., Woo, J. K., & Kim, T. G. (2018). Green ports and economic opportunities. *Corporate social responsibility in the maritime industry*, 167-184.

Nardo, M., Forino, D., & Murino, T. (2020). The evolution of man-machine interaction: The role of human in Industry 4.0 paradigm. *Production & manufacturing research*, 8(1), 20-34.

Nayak, S. P., Das, S., Rai, S. C., & Pradhan, S. K. (2019). SIMAS: smart IoT model for acute stroke avoidance. *International Journal of Sensor Networks*, 30(2), 83-92.

Nikghadam, S., Molkenboer, K. F., Tavasszy, L., & Rezaei, J. (2021). Information sharing to mitigate delays in port: the case of the Port of Rotterdam. *Maritime Economics & Logistics*, 1-26.

Ortiz, G., Boubeta-Puig, J., Criado, J., Corral-Plaza, D., Garcia-de-Prado, A., Medina-Bulo, I., & Iribarne, L. (2022). A microservice architecture for real-time IoT data processing: A reusable Web of things approach for smart ports. *Computer Standards & Interfaces*, 81, 103604.

Ottonicar, S. L. C., Valentim, M. L. P., & Mosconi, E. (2018). A competitive intelligence model based on information literacy: organizational competitiveness in the context of the 4th Industrial Revolution. *Journal of Intelligence Studies in Business*, 8(3).

Pallis, A. A., & Vaggelas, G. K. (2017). A Greek prototype of port governance. *Research in transportation business & management*, 22, 49-57.

Patel, A. K., Patel, A., & Patel, K. M. (2022). An Insight to Digital Twin. *Digital Twin Technology: Fundamentals and Applications*, 33-46.

Pavlic, B., Cepak, F., Sucic, B., Peckaj, M., & Kandus, B. (2014). Sustainable port infrastructure, practical implementation of the green port concept. *Thermal Science*, 18(3), 935-948.

Petrikina, J., Krieger, M., Schirmer, I., Stoeckler, N., Saxe, S., & Baldauf, U. (2017). Improving the readiness for change-addressing information concerns of internal stakeholders in the Smartport Hamburg.

Pham, T. Y. (2023). A smart port development: Systematic literature and bibliometric analysis. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*.

Philipp, R. (2020, June). Digital readiness index assessment towards smart port development. In *Sustainability Management Forum| NachhaltigkeitsManagementForum* (Vol. 28, No. 1-2, pp. 49-60). Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Philipp, R. (2021). *Smart seaports as innovation drivers for blue growth* (Doctoral dissertation, PhD Thesis. Tallinn: Tallinn University of Technology, School of Business and Governance, 2021. Search in).

Philipp, R., Prause, G., Olaniyi, E. O., & Lemke, F. (2021). Towards green and smart seaports: renewable energy and automation technologies for bulk cargo loading operations. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 25(1), 650-665.

Pinto, S. C. D., Masson, D., Villeneuve, E., Boy, G., &Urfels, L. (2021). From requirements to prototyping: Application of human-system integration methodology to digital twin design. *Proceedings of the Design Society, 1*, 1617-1626.

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital twin and big data towards smart manufacturing and industry 4.0: 360 degree comparison. *Ieee Access, 6*, 3585-3593.

Qi, Q., Zhao, D., Liao, T. W., & Tao, F. (2018, June). Modeling of cyber-physical systems and digital twin based on edge computing, fog computing and cloud computing towards smart manufacturing. In *International Manufacturing Science and Engineering Conference* (Vol. 51357, p. V001T05A018). American Society of Mechanical Engineers.

Qianqian, L., &Davarinou, P. (2019). Sino-greek economic cooperation: COSCO's investment in the port of Piraeus.

Rajabi, A., Saryazdi, A. K., Belfkih, A., &Duvallet, C. (2018, June). Towards smart port: An application of AIS data. In *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)* (pp. 1414-1421). IEEE.

Rajabi, A., Saryazdi, A. K., Belfkih, A., &Duvallet, C. (2018, June). Towards smart port: An application of AIS data. In *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)* (pp. 1414-1421). IEEE.

- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016, October). Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies. In *proceedings of the international conference on computers and industrial engineering (CIE46), Tianjin, China* (pp. 29-31).
- Ross, P., & Maynard, K. (2021). Towards a 4th industrial revolution. *Intelligent Buildings International*, 13(3), 159-161.
- Sadek, I., & Elgohary, M. (2020). Assessment of renewable energy supply for green ports with a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(5), 5547-5558.
- Samadi, S., Lechtenböhmer, S., Schneider, C., Arnold, K., Fishedick, M., Schüwer, D., & Pastowski, A. (2016). *Decarbonization pathways for the industrial cluster of the port of Rotterdam*. Wuppertal, Germany: Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy.
- Saraga, D. E., Tolis, E. I., Maggos, T., Vasilakos, C., & Bartzis, J. G. (2019). PM2.5 source apportionment for the port city of Thessaloniki, Greece. *Science of the Total Environment*, 650, 2337-2354.
- Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H., & Dassisti, M. (2021). Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, 103469.
- Shin, Y. J., Oh, J. S., Shin, S. H., & Jang, H. L. (2018). A study on the countermeasures of shipping and port logistics industry in responding to the progression of fourth industrial revolution. *Journal of Navigation and Port Research*, 42(5), 347-356.

Simoni, M., Schiavone, F., Risitano, M., Leone, D., & Chen, J. (2022). Group-specific business process improvements via a port community system: the case of Rotterdam. *Production Planning & Control*, 33(4), 371-385.

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital twin: Origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36.

Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2022). Applications of digital twin across industries: A review. *Applied Sciences*, 12(11), 5727.

Skilton, M., & Hovsepian, F. (2018). *The 4th industrial revolution*. Springer Nature.

Sohaib, R. M., Onireti, O., Sambo, Y., & Imran, M. A. (2021). Network slicing for beyond 5G systems: An overview of the smart port use case. *Electronics*, 10(9), 1090.

Sordello, M. (2021). *5G-Enabled Business Models for Logistics and Smart Ports in collaboration with 5G-LOGINNOV* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).

SOROOSHIAN, S., & PANIGRAHI, S. (2020). Impacts of the 4th Industrial Revolution on Industries. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 17(8), 903-915.

Tahmasebinia, F., Lin, L., Wu, S., Kang, Y., & Sepasgozar, S. (2023). Exploring the Benefits and Limitations of Digital Twin Technology in Building Energy. *Applied Sciences*, 13(15), 8814.

Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J., & Ji, P. (2022). Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, 372-389.

Tran, T. A. (2023). A critical review of using Internet of Things technology for decarbonizing the shipping transportation industry in industrial revolution 4.0. *Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications*, 53-63.

Triska, Y., Frazzon, E. M., Silva, V. M. D., & Heilig, L. (2022). Smart port terminals: Conceptual framework, maturity modeling and research agenda. *Maritime Policy & Management*, 1-24.

Tyler, N. (Ed.). (2020). *The Smart Port Network*.

Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C. E., Rajabifard, A., & Acuto, M. (2022). Potential and limitations of digital twins to achieve the sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 5(10), 822-829.

Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0. *Procedia Cirp*, 61, 335-340.

Uhlemann, T. H. J., Schock, C., Lehmann, C., Freiburger, S., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: demonstrating the potential of real time data acquisition in production systems. *Procedia Manufacturing*, 9, 113-120.

Uhlenkamp, J. F., Hauge, J. B., Broda, E., Lütjen, M., Freitag, M., & Thoben, K. D. (2022). Digital twins: A maturity model for their classification and evaluation. *IEEE Access*, 10, 69605-69635.

Vaggelas, G. K., & Pallis, A. A. (2019). Configuration and prospects of the Piraeus shipping cluster. *SPOUDAI Journal of Economics and Business*, 69(1-2), 3-17.

- Van Den Bosch, F. A., Hollen, R., Volberda, H. W., & Baaij, M. G. (2011). The strategic value of the Port of Rotterdam for the international competitiveness of the Netherlands: A first exploration. *Rotterdam: Erasmus University*.
- Van der Horst, M. R., & Van der Lugt, L. M. (2011). Coordination mechanisms in improving hinterland accessibility: empirical analysis in the port of Rotterdam. *Maritime Policy & Management*, 38(4), 415-435.
- Van Dooren, N. (2012). Port Vision 2030 shows the way for the port of Rotterdam. *Port Technology International*, 53, 36-40.
- Van Os, J. (2018, October). The digital twin throughout the lifecycle. In *SNAME Maritime Convention* (p. D023S003R002). SNAME.
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision support systems*, 145, 113524.
- Vellinga, T., & De Jong, M. I. C. H. I. E. L. (2012). Approach to climate change adaptation in the port of Rotterdam. *Maritime transport and the climatechangechallenge*, 305-319.
- Wang, H., Osen, O. L., Li, G., Li, W., Dai, H. N., & Zeng, W. (2015, November). Big data and industrial Internet of Things for the maritime industry in Northwestern Norway. In *TENCON 2015-2015 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-5). IEEE.
- Wang, L., Deng, T., Shen, Z. J. M., Hu, H., & Qi, Y. (2022). Digital twin-driven smart supply chain. *Frontiers of Engineering Management*, 9(1), 56-70.
- Wang, Y., Yang, W., Zheng, Y., Zhang, L., & Zhang, Z. (2022, August). Digital Twin Modeling Method for Container Terminal in Port. In *International Design*

Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (Vol. 86212, p. V002T02A036). American Society of Mechanical Engineers.

Wenner, M., Meyer-Westphal, M., Herbrand, M., & Ullerich, C. (2022). smartBRIDGE Hamburg: A digital twin to optimise infrastructure maintenance. In *Bridge Safety, Maintenance, Management, Life-Cycle, Resilience and Sustainability* (pp. 964-970). CRC Press.

Wenner, M., Meyer-Westphal, M., Herbrand, M., & Ullerich, C. (2021, October). The concept of digital twin to revolutionise infrastructure maintenance: The pilot project smartBRIDGE Hamburg. In *Proceedings of the 27th ITS world congress, Hamburg, Germany* (pp. 11-15).

Yao, H., Wang, D., Su, M., & Qi, Y. (2021, March). Application of Digital Twins in Port System. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1846, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.

Yao, H., Wang, D., Su, M., & Qi, Y. (2021, March). Application of Digital Twins in Port System. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1846, No. 1, p. 012008). IOP Publishing.

Yau, K. L. A., Peng, S., Qadir, J., Low, Y. C., & Ling, M. H. (2020). Towards smart port infrastructures: Enhancing port activities using information and communications technology. *Ieee Access*, 8, 83387-83404.

Zhang, S., Liang, T., & Dinavahi, V. (2023). Hybrid ML-EMT Based Digital Twin for Device-Level HIL Real-Time Emulation of Ship-Board Microgrid on FPGA. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*.

Zhen, L., Zhuge, D., Murong, L., Yan, R., & Wang, S. (2019). Operation management of green ports and shipping networks: overview and research opportunities. *Frontiers of Engineering Management*, 6(2), 152-162.

Zheng, Y., & Smith, C. (2017). New voyages in search of treasure: China Ocean Shipping Company (COSCO) in Europe. *Chinese Investment in Europe: Corporate Strategies and Labour Relations, Brussels: European Trade Union Institute*, 231-250.

Zhong, M., Yang, Y., Yao, H., Fu, X., Dobre, O. A., & Postolache, O. (2019). 5G and IoT: Towards a new era of communications and measurements. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 22(6), 18-26.

Zhou, Y., Soh, Y. S., Loh, H. S., & Yuen, K. F. (2020). The key challenges and critical success factors of blockchain implementation: Policy implications for Singapore's maritime industry. *Marine policy*, 122, 104265.

Zis, T. P. (2019). Green ports. *Sustainable Shipping: A Cross-Disciplinary View*, 407-432.