



*ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ*

*ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ*



*ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ*

*ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ*

**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΚΗ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

Διπλωματική Εργασία

**ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ ΠΛΟΙΟΥ: ΣΚΟΠΟΣ,  
ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ, ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ  
ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ**

Όνομα-Επίθετο φοιτήτριας

Ιωάννα Δελή

Όνομα-Επίθετο επιβλέποντος

Ευθύμιος Παριώτης

Πειραιάς

Μάρτιος 2026



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

## **ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT**

«Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού, που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας του τμήματος, που χρησιμοποιεί σε σχέση με το όλο κείμενο υπό copyright, και των πιθανών συνεπειών της χρήσης αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου».



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

«Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΕΔιΕ του ΔΠΜΣ σύμφωνα με τον Κανονισμό Λειτουργίας του ΔΠΜΣ ‘Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία’.

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- ΜΕΛΟΣ Α’: Ευθύμιος Παριώτης
- ΜΕΛΟΣ Β’: Ιωάννης Κατσάνης
- ΜΕΛΟΣ Γ’: Θεόδωρος Ζάννης

Η έγκριση της Διπλωματική Εργασίας από το Τμήμα Ναυτιλιακών Σπουδών του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.»



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την στήριξη ανθρώπων στους οποίους οφείλω θερμές ευχαριστίες.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Ευθύμιο Παριώτη, για την πολύτιμη καθοδήγηση και για την προσφορά εύστοχων και σαφών οδηγιών και συμβουλών κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, οφείλω να αναφέρω τις ευχαριστίες μου προς τους υπεύθυνους και τη διεύθυνση του μεταπτυχιακού προγράμματος, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν επιλέγοντάς με να παρακολουθήσω το πρόγραμμα, δίνοντάς μου την ευκαιρία να αποκτήσω πολύτιμες γνώσεις και να επεκτείνω τους ακαδημαϊκούς μου ορίζοντες.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ θα ήθελα να το αποδώσω στην οικογένειά μου. Συγκεκριμένα, στον σύζυγό μου για την αδιάκοπη συμπαράσταση, ενθάρρυνση και πίστη και στον μικρό μου γιο που παρά το νεαρό της ηλικίας του έδειξε κατανόηση για τις ώρες που χρειάστηκε να με στερηθεί και με την ανιδιοτελή του αγάπη μου έδινε θάρρος. Μέσα από όλη αυτή την διαδρομή, ελπίζω να αποτελέσω έμπνευση και παράδειγμα πως η γνώση δεν σταματά και πως μπορούμε να εξελισσόμαστε καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μας. Το έργο αυτό αφιερώνεται σε εκείνους.



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετάει την ανάπτυξη και την αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων (Digital Twins), μια νέα, καινοτόμο τεχνολογική τάση που αναμένεται να κυριαρχήσει στην 4<sup>η</sup> Βιομηχανική επανάσταση (I4.0). Τα ψηφιακά δίδυμα παρουσιάζουν έντονη δυναμική και προοπτικές εφαρμογής σε πολλούς τομείς συμπεριλαμβανομένων και ο τομέας της ναυτιλίας. Σκοπός της έρευνας είναι η ανάδειξη των χαρακτηριστικών της τεχνολογίας, η διερεύνηση των ιδιαιτεροτήτων εφαρμογής της σε σχέση με την πολυπλοκότητα που εμφανίζει ο ναυτιλιακός κλάδος και η συστηματική καταγραφή της απαιτούμενης υποδομής. Μέσω εκτενούς βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αναλύονται οι ορισμοί, τα βασικά συστατικά στοιχεία καθώς και οι τεχνολογίες που υποστηρίζουν την ανάπτυξή τους. Παράλληλα, ταξινομούνται τα κριτήρια επιλογής αυτών των στοιχείων με στόχο την διαμόρφωση ενός οδικού χάρτη για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς (πλοιοκτήτες, ναυπηγεία, διαχειριστές στόλου κ.ά.). Επιπλέον, αναδεικνύονται οι τεχνολογικές και επιχειρησιακές προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτησή τους. Τέλος, παρουσιάζονται σύγχρονα ερευνητικά έργα, εκτιμώνται οι μελλοντικές προοπτικές και εφαρμογές και διατυπώνονται προτάσεις για την βέλτιστη αξιοποίηση της τεχνολογίας σε ναυτικές εφαρμογές.

**Λέξεις – κλειδιά:** Ψηφιακό Δίδυμο, Ναυτιλία, Βιομηχανία 4.0 (I4.0), Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου, Έξυπνη Ναυτιλία



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

## **ABSTRACT**

This thesis examines the development and application of digital twins, a relatively new and innovative technological trend that is expected to dominate the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0). Digital Twins demonstrate strong potential and application prospects in many sectors, including the shipping industry. The purpose of this research is to highlight the characteristics of the technology, investigate the specificities of its application in relation to the complexity of the shipping industry, and systematically document the required infrastructure. Through an extensive literature review, the definitions, key components, and the technologies supporting their development are analyzed. At the same time, the selection criteria for these elements are classified with the aim of developing a roadmap for all stakeholders (shipowners, shipyards, fleet managers, etc.). Furthermore, the technological and operational challenges to their widespread adoption are highlighted. Finally, current research projects are presented, future prospects and applications are assessed, and recommendations are formulated for the optimal utilization of the technology in maritime applications.

**Keywords:** Digital Twin, Maritime Industry, Industry 4.0 (I4.0), Digital Twin Ship, Smart Shipping



## **ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	5
ABSTRACT .....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	10
ΠΙΝΑΚΕΣ .....	11
ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ .....	12
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.1 ΥΠΟΒΑΘΡΟ .....	13
1.2 ΚΙΝΗΤΡΟ .....	16
1.3 ΣΚΟΠΟΣ .....	18
1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....	19
1.5 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	20
ΜΕΡΟΣ Ι: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ.....	21
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	21
2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	21
2.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	33
2.3 ΤΟΜΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ DT .....	39
2.3.1 ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ/ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ.....	40
2.3.2 ΜΕΤΑΠΟΙΗΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ.....	43
2.3.3 ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	44
2.3.4 ΥΓΕΙΑ .....	46
2.3.5 ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	48
2.3.6 ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ .....	50
2.3.7 ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	51
2.4 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ DT .....	55
2.4.1 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	58
2.4.2 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ .....	60
2.4.3 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ.....	62
2.4.4 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΡΣΗΣ.....	63
2.5 ΟΦΕΛΗ ΤΟΥ DT .....	64
3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ DT.....	68
3.1 ΦΥΣΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ DT.....	71
3.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ DT.....	74
3.3 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΟΥ DT.....	77
3.4 ΤΥΠΟΙ DT – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	80
3.4.1 ΑΒΑΤΑΡ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ – PRODUCT AVATAR .....	80
3.4.2 ΨΗΦΙΑΚΟ ΝΗΜΑ – DIGITAL THREAD.....	81
3.4.3 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ – DIGITAL MODEL .....	82
3.4.4 ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΚΙΑ – DIGITAL SHADOW .....	82



3.4.5	ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ – DIGITAL TWIN .....	83
3.5	ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	84
4.	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ .....	87
4.1	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	88
4.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	90
4.1.1	ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	90
4.1.2	ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΦΥΣΙΚΗ.....	95
4.3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ .....	99
	ΜΕΡΟΣ ΙΙ – ΔΤ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ .....	102
5.	ΟΔΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ.....	102
5.1	ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ .....	102
5.2	ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ .....	104
5.2.1	ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ .....	104
5.2.2	ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ .....	105
5.2.3	ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ .....	112
5.2.4	ΚΛΙΜΑΚΩΣΗ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ.....	115
5.2.5	ΣΥΝΕΧΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	119
5.3	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: STENA LINE (STENA FUEL PILOT).....	120
6.	ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΔΤ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ .....	122
6.1	ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	122
6.1.1	ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ.....	122
6.1.2	ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ.....	125
6.1.3	ΚΟΣΤΟΣ .....	127
6.2	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	128
6.2.1	ΚΥΒΕΡΝΟΑΣΦΑΛΕΙΑ .....	128
6.2.2	ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....	132
6.2.3	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ.....	134
6.3	ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ.....	136
6.3.1	ΕΛΛΕΙΨΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ.....	137
6.3.2	ΔΙΑΚΥΒΕΡΝΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	138
6.3.3	ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ .....	140
7.	ΑΞΙΑ ΔΤ ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	142
7.1	ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΑ .....	143
7.1.1	ΜΕΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ (ΟΡΕΧ).....	143
7.1.2	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΞΙΑΣ ΠΕΡΙΟΥΣΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	144
7.1.3	ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΓΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ .....	145
7.2	ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗ (ΙΜΟ & ΕΥ ΕΤΣ) .....	145
7.2.1	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (CII) .....	146
7.2.2	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΡΥΠΩΝ ΤΗΣ ΕΕ (ΕΥ ΕΤΣ)	



7.2.3	ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ .....	147
7.3	ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	148
7.3.1	ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ (Shipbuilding 4.0).....	149
7.3.2	ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΑ (MASS, ASV).....	150
7.3.3	ΕΞΥΠΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΙΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΔΟΜΩΝ (SMART PORTS) 151	
8.	ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ .....	153
8.1	ΕΥΡΩΠΑΪΚΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	154
8.1.1	DT4GS: ΑΝΟΙΧΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΠΡΑΣΙΝΗ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ	154
8.1.2	TwinShip: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΜΗΔΕΝΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ 157	
8.1.3	VesselAI: Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (HPC) 158	
8.1.4	DIGITSENSE: DIGITAL TWIN ΠΛΟΙΟΥ.....	160
8.2	ΠΡΩΤΟΒΟΥΛΙΕΣ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	161
8.2.1	DNV (Det Norske Veritas).....	161
8.2.2	LR (Lloyd’s Register) .....	162
8.2.3	ABS (American Bureau of Shipping) .....	163
8.2.4	ClassNK (Nippon Kaiji Kyokai) .....	164
8.2.5	Bureau Veritas (BV) .....	165
8.3	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ DT ΣΕ ΕΞΥΠΝΟΥΣ ΛΙΜΕΝΕΣ.....	165
8.3.1	ΛΙΜΑΝΙ ΤΟΥ ΡΟΤΕΡΝΤΑΜ.....	166
8.3.2	ΛΙΜΑΝΙ ΤΗΣ ΑΜΒΕΡΣΑΣ – ΜΠΡΙΖ.....	167
8.3.3	ΛΙΜΑΝΙ ΤΗΣ ΣΙΓΚΑΠΟΥΡΗΣ .....	168
8.4	ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑΣ ΑΠΟ ΑΛΛΟΥΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ ΚΛΑΔΟΥΣ.....	169
8.4.1	ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ).....	169
8.4.2	ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ (ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ) 170	
8.4.3	ΑΣΦΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ).....	171
9.	ΕΥΡΗΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	172
9.1	ΕΥΡΗΜΑΤΑ .....	172
9.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	176
9.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	177
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	179



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (DNV-GL) .....	17
<b>Σχήμα 2.1:</b> Καταγραφή των εργασιών που δημοσιεύονται κάθε χρόνο σε διάφορους κλάδους με στοιχεία από τις βάσεις δεδομένων Scopus (πάνω) και WoS (κάτω) (Αύγουστος 2013- 2022), (Mauro and Kana, 2023) .....	34
<b>Σχήμα 2.2:</b> Εφαρμογές DT σε διαφορετικούς τομείς (Qi κ.ά., 2021).....	40
<b>Σχήμα 2.3:</b> Το ψηφιακό δίδυμο ως εργαλείο για την υποστήριξη των πλοίων σε όλο τον κύκλο ζωής, (Ludvigsen and Smogeli, 2018).....	53
<b>Σχήμα 2.4:</b> Conceptual Ideal for PLM, (Grieves and Vickers, 2017).....	56
<b>Σχήμα 2.5:</b> Σχεδιασμός προϊόντος με βάση το DT (Tao κ.ά., 2018a) .....	60
<b>Σχήμα 3.1:</b> Αρχιτεκτονική DT (Botín-Sanabria κ.ά., 2022) .....	71
<b>Σχήμα 3.2:</b> Ροή δεδομένων σε ένα Ψηφιακό μοντέλο (Kritzinger κ.ά., 2018).....	82
<b>Σχήμα 3.3:</b> Ροή δεδομένων σε μία Ψηφιακή σκιά (Kritzinger κ.ά., 2018).....	83
<b>Σχήμα 3.4:</b> Ροή δεδομένων σε ένα Ψηφιακό δίδυμο (Kritzinger κ.ά., 2018).....	84
<b>Σχήμα 4.1:</b> Τεχνολογίες που επιτρέπουν τη διαχείριση των δεδομένων του ψηφιακού διδύμου, (Qi κ.ά., 2021).....	91
<b>Σχήμα 4.2:</b> Εργαλεία για τη διαχείριση δεδομένων DT, (Qi κ.ά., 2021).....	95
<b>Σχήμα 4.3:</b> Πλαίσιο τεχνολογιών και εργαλείων για την κατασκευή μοντέλων, (Tao κ.ά., 2022) .....	99
<b>Σχήμα 6.1:</b> Απεικόνιση της πολυπλοκότητας των ναυπηγείων: Αριθμός εξαρτημάτων και ωρών, (Morais κ.ά., 2018) .....	123



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

## ΠΙΝΑΚΕΣ

<b>Πίνακας 2.1:</b> Ορισμοί για το Ψηφιακό Δίδυμο (Semeraro κ.ά., 2021) .....	32
<b>Πίνακας 2.2:</b> Κύριοι πάροχοι πλατφόρμας Digital Twin για τη ναυτιλιακή βιομηχανία (Mauro and Kana, 2023).....	55
<b>Πίνακας 6.2:</b> Περίληψη των κύριων τρωτών σημείων των σύγχρονων συστημάτων πλοίων και των συνεπειών τους, (Akran κ.ά., 2024) .....	131
<b>Πίνακας 8.1:</b> Living Labs του Έργου DT4GS, (DT4GS, 2023).....	156



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ

AI	Artificial Intelligence
ANN	Artificial Neural Networks
API	Application Programming Interface
AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer-Aided Design
CAE	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CPS	Cyber-Physical Systems
CPPS	Cyber-Physical Production Systems
CRM	Customer Relationship Management
DFS	Distributed File Storage
DL	Deep Learning
DT	Digital Twin
DTP	Digital Twin Prototype
DTS	Digital Twin Shop-floor
ERP	Enterprise Resource Planning
FEA	Finite Element Analysis
FEM	Finite Element Model

GIS	Geographic Information System
HMI	Human Machine Interface
IDS	Industrial Data Space
IMO	International Maritime Organization
IoT	Internet of Things
IT	Information Technology
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
M2M	Machine to Machine
MDS	Maritime Data Space
MES	Manufacturing Execution Systems
ML	Machine Learning
OT	Operation Technology
PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
RFID	Radio Frequency Identification
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SCM	Supply Chain Management
SDT	Ship Digital Twin
TPS	Thermal Protection System



## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 ΥΠΟΒΑΘΡΟ**

Στην εποχή μας, διανύουμε την 4η Βιομηχανική επανάσταση (I4.0) η οποία υιοθετεί νέες ψηφιακές τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), Ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων (Big Data Analytics), Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing), Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR), Εικονική Πραγματικότητα (VR), Κυβερνοασφάλεια (Cyber Security), Ρομποτική (Robotics), Ευφυής προσομοίωση (Intelligent simulation), τεχνολογίες που δημιουργούν τάσεις σε όλους τους βιομηχανικούς κλάδους.

Σύμφωνα με την ευρεία συναίνεση, το I4.0 (Industry 4.0), είναι μια πρωτοβουλία για την αύξηση της διαχείρισης δεδομένων, της επικοινωνίας των συσκευών και της ψηφιοποίησης μέσω τόσο της κάθετης όσο και της οριζόντιας ολοκλήρωσης. Παρέχεται μέσω κυβερνοφυσικών συστημάτων (CPS), του διαδικτύου και τεχνολογιών προσανατολισμένων στο μέλλον που ενισχύουν τα παραδείγματα αλληλεπίδρασης ανθρώπου-μηχανής για την παροχή διαδικασιών προστιθέμενης αξίας, συγχωνεύοντας αποτελεσματικά τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο για τη δημιουργία μιας συνέργειας μεταξύ επιχειρησιακών τεχνολογιών και τεχνολογιών πληροφοριών για βελτιωμένη προβλεψιμότητα και δυνατότητες βελτιστοποίησης, (Sullivan κ.ά., 2020).

Τα ψηφιακά δίδυμα (DT) διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις τρέχουσες τάσεις ψηφιοποίησης σε όλους τους κλάδους και αναμένεται να κυριαρχήσουν στο I4.0. Η έννοια του DT πρωτοεμφανίστηκε στην αεροπορική βιομηχανία αλλά πλέον παρουσιάζει έντονη δυναμική και προοπτικές εφαρμογής στην ναυτιλία. Καθώς οι ναυτιλιακές αγορές επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις πρόσφατες παγκόσμιες τάσεις, όπως η αύξηση του κόστους παράδοσης, η πολιτική πίεση για απαλλαγή από τον άνθρακα ή ακόμα και οι αναπάντεχες επιπτώσεις της πανδημίας Covid-19, η ανάπτυξη και αξιοποίηση των DT, είτε αυτά αφορούν μεμονωμένα προϊόντα, είτε σύνθετα συστήματα και διεργασίες που καλύπτουν όλο το φάσμα της παραγωγικής διαδικασίας (από τον σχεδιασμό έως την κατασκευή, την εγκατάσταση και λειτουργία), θα



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

μπορούσαν να παρέχουν σημαντική υποστήριξη στις ναυπηγικές και ναυτιλιακές εταιρείες για να αντιμετωπίσουν τις πρόσφατες και τις επερχόμενες προκλήσεις.

Ένα DT είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, μιας διαδικασίας ή μιας υπηρεσίας και έχει δυναμικό χρήση σε ποικίλα πλαίσια. Μπορεί να είναι ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός αντικειμένου στον φυσικό κόσμο, όπως ένα πλοίο, ένα αυτοκίνητο, μια ανεμογεννήτρια, ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ένας αγωγός, ένα κομμάτι εξοπλισμού, όπως ένας προωθητήρας ή ένας κινητήρας, ή ακόμη και μεγαλύτερα αντικείμενα, όπως κτίρια ή ακόμη και ολόκληρες πόλεις, αλλά και το πολλά υποσχόμενο ψηφιακό δίδυμο του ανθρώπινου σώματος.

Αυτό μπορεί να φαίνεται ότι δεν είναι τίποτα περισσότερο από ένα μοντέλο σχεδιασμένο σε υπολογιστή (CAD) που δημιουργήθηκε κατά τη φάση του σχεδιασμού, αλλά εξελίσσεται σε κάτι πολύ ανώτερο όταν προστίθενται πληροφορίες σχετικά με υλικά, αστοχίες, τάσεις και καταπονήσεις, χρήση, χρονοδιαγράμματα συντήρησης και προσδόκιμο ζωής των εξαρτημάτων.

Οι ασύρματες επικοινωνίες υψηλής ταχύτητας (5G), το IoT και οι εξελίξεις στην τεχνολογία αισθητήρων έχουν δημιουργήσει ένα συνδεδεμένο περιβάλλον όπου όλες οι πληροφορίες είναι δυναμικά προσβάσιμες σε πολλούς. Υπάρχουν τόσες πολλές πληροφορίες, ώστε τα Δεδομένα έχουν γίνει Μεγάλα (Big Data), και ίσως η ικανότητα αποτελεσματικής χρήσης αυτών των Μεγάλων Δεδομένων είναι που τώρα πραγματικά ανοίγει το δρόμο για την ανάπτυξη του DT.

Αυτό το DT εξελίσσεται σε ένα δυσδιάκριτο αλλά λειτουργικό αντίγραφο του φυσικού του αντίστοιχου. Κατά συνέπεια, μπορούν να εκτελεστούν προσομοιώσεις στο DT που παρέχουν ακριβείς απεικονίσεις του πώς οι πιθανές αλλαγές θα επηρεάσουν το πραγματικό προϊόν.

Είτε πρόκειται για διαδικασία ή υπηρεσία ή οτιδήποτε άλλο, τα DT βιώνουν μια πληθυσμιακή έκρηξη καθώς οι ενδιαφερόμενοι φορείς συνειδητοποιούν ότι αυτό το εικονικό μοντέλο μπορεί πλέον να προσφέρει τεράστια οφέλη σε όλο τον κύκλο ζωής οποιουδήποτε έργου.

Η εταιρεία ερευνών αγοράς Grand View Research, επισημαίνει στην αναφορά της πως η παγκόσμια αγορά ψηφιακών διδύμων αποτιμήθηκε σε 7,48 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ το 2021 και αναμένεται να αναπτυχθεί με σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης



(CAGR) 39,1% μεταξύ 2022 και 2030. Κατά το πρώτο εξάμηνο του 2020, η πανδημία COVID-19 επηρέασε την αγορά. Ωστόσο, καθώς ο αριθμός των κρουσμάτων COVID-19 άρχισε να μειώνεται και οι περιορισμοί καταργήθηκαν, η αγορά άρχισε να ανακάμπτει γρήγορα, (Grand View Research, Inc., 2022). Σύμφωνα με τον Wang κ.ά., (2022), ακόμα και τα επιστημονικά επιτεύγματα στο θέμα της τεχνολογίας του DT από το 2014 και μετά έχουν αυξηθεί δραματικά.

Αρχικά υιοθετήθηκε από τους κατασκευαστές επειδή μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν την προσομοίωση για να προβλέψουν καλύτερα και να βελτιστοποιήσουν τα χρονοδιαγράμματα απόδοσης και συντήρησης των προϊόντων τους σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, από την αρχική ιδέα έως την τελική απόσυρση. Τα δεδομένα αισθητήρων του πραγματικού προϊόντος χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση του ψηφιακού του αντιτύπου, επιτρέποντας στα δύο να εξελίσσονται παράλληλα ανταλλάσσοντας πληροφορίες (δεδομένα) σε πραγματικό χρόνο.

Πιο πρόσφατα, κατασκευαστές υιοθετούν την ψηφιακή δίδυμη φιλοσοφία για να καλύπτουν τις διαδικασίες και τα εργοστάσιά τους και να διασφαλίζουν ότι λειτουργούν όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα και αποτελεσματικά. Με μικρότερους κύκλους ανάπτυξης προϊόντων και λιγότερο χρόνο για τη βελτιστοποίηση φυσικών πρωτοτύπων, τα τελικά προϊόντα είναι υψηλότερης ποιότητας.

Δεν προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι τα πλεονεκτήματα της ύπαρξης ενός εικονικού μοντέλου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως έλεγχος όσο και ως βάση δοκιμής έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον πολλών άλλων βιομηχανιών συμπεριλαμβανομένου και του ναυτιλιακού τομέα.

Καθώς η εξέλιξη της τεχνολογίας αναπτύσσεται εκθετικά, η ναυτιλία εδώ και πολλά χρόνια έχει επιδιώξει την υιοθέτηση τεχνολογικών καινοτομιών με σκοπό, την ασφαλή ναυσιπλοΐα τόσο σε θέματα ασφάλειας όσο και σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος. Αυτό έχει ως συνέπεια ο κλάδος να προχωρά με αργά αλλά σταθερά βήματα προς τον ψηφιακό του μετασχηματισμό. Οι τεχνολογίες του I4.0 σε συνδυασμό με το DT, έχουν γίνει για τον κλάδο η νέα τάση που θα υποστηρίξει την ταχύτερη ολοκλήρωση των διαδικασιών και τη χρήση δεδομένων κατά τη λήψη αποφάσεων στην αλυσίδα αξίας των θαλάσσιων μεταφορών.



## 1.2 ΚΙΝΗΤΡΟ

Από τον σχεδιασμό, τη ναυπήγηση και τη συντήρηση των πλοίων έως τη βελτιστοποίηση των εμπορευματικών διαδρομών, ο ναυτιλιακός κλάδος αναπτύσσεται ταχύτατα ανταποκρινόμενος στις οικονομικές, πολιτικές, δημογραφικές και τεχνολογικές εξελίξεις. Ως εκ τούτου, η χρήση της ψηφιακής τεχνολογίας έχει αναγνωριστεί ως ένα μέσο βελτίωσης που μπορεί να επιτρέψει την αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζει ο κλάδος, όπως μείωση του οικολογικού αποτυπώματος και του λειτουργικού κόστους, με προληπτικό και αξιόπιστο τρόπο, (Sullivan κ.ά., 2020).

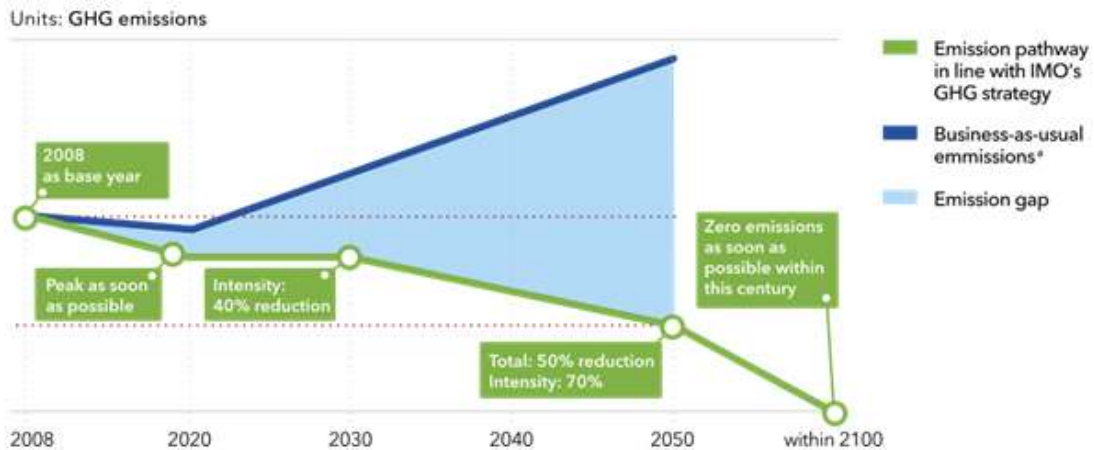
Το οικολογικό αποτύπωμα της ναυτιλίας εντοπίζεται στις εκπομπές διαφόρων αερίων από τα καύσιμα των πλοίων και στην επιβάρυνση του θαλάσσιου οικοσυστήματος από το έρμα των πλοίων.

Τα τελευταία χρόνια η ναυτιλιακή βιομηχανία δέχεται τεράστιες πιέσεις πολιτικές αλλά και κοινωνικές για την δραστική μείωση των εκπομπών αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, μια διαδικασία που έχει ονομαστεί απανθρακοποίηση, με τελικό στόχο την μηδενική εκπομπή αερίων στο μέλλον από τα καράβια.

Τον Απρίλιο του 2018, ο IMO υιοθέτησε μια φιλόδοξη στρατηγική μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου με όραμα την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας το συντομότερο δυνατό εντός αυτού του αιώνα, (Σχήμα 1.1). Με το 2008 ως έτος αναφοράς, αυτή η στρατηγική στοχεύει στη μείωση με τουλάχιστον 50% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη ναυτιλία έως το 2050, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τη μέση πυκνότητα άνθρακα (CO<sub>2</sub> ανά τόνο-μίλι) κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030, και 70% πριν από τα μέσα του αιώνα.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”



Σχήμα 1.1: Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (DNV-GL)

Σήμερα, η πλειονότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται στη ναυτιλία προέρχεται από ορυκτά καύσιμα ενώ εναλλακτικές μορφές καυσίμων δεν είναι τόσο διαδεδομένες. Ο IMO έχει δώσει κάποιες κατευθύνσεις και χρονοδιαγράμματα από το 2016, όμως λόγω της πολυπλοκότητας της ναυτιλιακής βιομηχανίας δεν είναι εφικτή η υιοθέτηση των νέων τεχνολογιών, στο βαθμό που γίνεται σε άλλες βιομηχανίες, έτσι ώστε να μπορέσουν να δώσουν τη δυνατότητα στη ναυτιλία να προχωρήσει σε μείωση των εκπομπών, ούτε κάποια μέθοδο, τεχνολογική ή λειτουργική, που να μπορούσε να εφαρμοστεί άμεσα. Παράλληλα θα πρέπει να διατηρηθεί και το λειτουργικό κόστος σε βιώσιμα επίπεδα για τον πλοιοκτήτη.

Αναγνωρίζοντας ότι οι πρωτοβουλίες ψηφιοποίησης έχουν βελτιώσει σημαντικά την έξυπνη πλοήγηση των πλοίων (δηλαδή, παρακολούθηση και εντοπισμός των πλοίων σε πραγματικό χρόνο κατά τη διέλευση), υπάρχει μια αυξανόμενη απαίτηση από τους πελάτες για πιο σύγχρονα και αποδοτικά πλοία. Οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν αποφυγή συγκρούσεων, οθόνες πληροφοριών, οθόνες, συναγερμούς, δορυφορική επικοινωνία, ολοκληρωμένη διαχείριση πλοίων και υποβοηθούμενους λιμενικούς ελιγμούς.

Σήμερα, η ψηφιοποίηση στη ναυτιλία συνδέεται κυρίως με τη βελτιστοποίηση του κόστους και της χωρητικότητας, καθώς και με τη διαχείριση των λειτουργιών και των επιδόσεων πλοήγησης. Κάθε ένα από αυτά τα κριτήρια επηρεάζει την αξία πέρα από το πλοίο, συμπεριλαμβανομένης της βελτιωμένης δέσμευσης των πελατών και της



λήψης πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων, της αποδοτικής χρήσης των υποδομών μεταφορών και των νέων μοντέλων λειτουργίας, με εφαρμογές στους ακόλουθους τομείς: καινοτόμες μεταφορές, εξ αποστάσεως λειτουργία, συντήρηση, παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, σχεδιασμός διαδρομών, βελτιστοποίηση, διαχείριση κινδύνων, παρακολούθηση εξοπλισμού, παρακολούθηση κύτους, εκπαίδευση και διαχείριση ναυτικών, (Sullivan κ.ά., 2020).

Μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για την εφαρμογή της έξυπνης ναυτιλίας είναι το ψηφιακό δίδυμο (DT). Η απρόσκοπτη συγχώνευση του κυβερνοχώρου και του φυσικού χώρου είναι ένα καθοριστικό χαρακτηριστικό των DT. Τόσο η ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και η βιομηχανία αναγνωρίζουν όλο και περισσότερο τη σημασία τους. Με βάση τους ειδικούς, το DT αποτελεί μια ευκαιρία για τον ναυτιλιακό τομέα να βελτιωθεί. Οι ενδιαφερόμενοι θα μπορούν να προβλέψουν πιθανούς κινδύνους κάνοντας καλύτερο σχεδιασμό, ως εκ τούτου η ασφάλεια και η λειτουργία θα αναβαθμιστούν. Θα βοηθήσει τη ναυτιλιακή βιομηχανία να αξιοποιήσει καλύτερα την ψηφιοποίηση και να περάσει σε μια νέα εποχή αφαιρώντας το άγνωστο στοιχείο, μια μεταβλητή που επηρεάζει τα υψηλής αξίας κι υψηλού ρίσκου κινητά περιουσιακά στοιχεία των ναυτιλιακών εταιρειών, που έρχονται καθημερινά αντιμέτωπα με πολλές προκλήσεις. Τα DT μπορούν να βοηθήσουν στη καλύτερη διαχείριση και την βελτιστοποίηση του στόλου, τη βελτιστοποίηση των λιμένων, τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας από άκρο σε άκρο και την αύξηση της επίγνωσης της κατάστασης των βασικών ενδιαφερομένων.

### 1.3 ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πρωτίστως η κατανόηση της έννοιας της αναδύομενης τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου και πως μπορεί να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του στον κλάδο της ναυτιλίας.

Μέσω της έρευνας και της μελέτης του υλικού που συγκεντρώθηκε, θα γίνει εκτεταμένη προσπάθεια στο να απαντηθούν τα παρακάτω ερωτήματα:

1. Υπάρχει ενιαίος και σαφής ορισμός;
2. Ποια είναι τα συστατικά του στοιχείου του, από τι αποτελείται;
3. Με ποιες τεχνολογίες συνδέεται;



4. Σε ποιους τομείς εφαρμόζεται με το παρόν αλλά και δυνητικά;
5. Ποια είναι τα οφέλη του;
6. Είναι εφικτή η εφαρμογή του ψηφιακού δίδυμου στην ναυτιλία και σε ποιον βαθμό;
7. Ποιες προκλήσεις πρέπει να υπερκεράσει για την υιοθέτησή του;
8. Πώς μπορεί να αξιοποιήσει η ναυτιλιακή κοινότητα την αναδυόμενη τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου;

#### 1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση επικεντρώθηκε σε υλικό που σχετίζονται με την τεχνολογία του DT, από επιστημονικά άρθρα, περιοδικά, ηλεκτρονικά βιβλία, πρακτικά συνεδρίων, ηλεκτρονικές βιβλιοθήκες πανεπιστημίων, πηγές διαδικτύου.

Η πρώτη προσέγγιση ώστε να δοθεί η ευκαιρία στο χτίσιμο των βάσεων όσον αφορά την γνώση πραγματοποιήθηκε μέσω του Google Scholar με τη λέξη-κλειδί "digital twin" για δημοσιεύσεις από 2012 έως 2025 και τα αποτελέσματα ταξινομήθηκαν κατά συνάφεια. Επιπλέον πραγματοποιήθηκε αναζήτηση με την ίδια λέξη-κλειδί και μέσω του διαδικτύου, αναζητώντας άρθρα σχετικά με την συγκεκριμένη τεχνολογία, πως αυτή χρησιμοποιείται και την συνεισφορά της στην ναυτιλία.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε συστηματική βιβλιογραφική αναζήτηση στις βάσεις δεδομένων, ScienceDirect, IEEE Xplore, Taylor & Francis Online, ResearchGate, Springer Link, MDPI, καλύπτοντας μεγάλο μέρος των διεπιστημονικών ερευνητικών άρθρων και δημοσιεύσεων.

Η αναζήτηση στις παραπάνω βάσεις δεδομένων δεν έγινε εξαρχής και ταυτόχρονα αλλά εξελισσόταν καθώς εξελισσόταν και η έρευνα για το υλικό που έπρεπε να συγκεντρωθεί ώστε να είναι δυνατή η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Εκτός από τον όρο “Digital Twin”, χρησιμοποιήθηκαν όροι αναζήτησης όπως “Digital Twin Ship”, “Digital Twin in Maritime”, “Maritime 4.0”, “Industry 4.0 technologies”, “Digital Twin and CPS”, “Digital Twin maintenance” “Digital Twin applications” και “Digital Twin use cases” για τον εντοπισμό σχετικών εργασιών στο πλαίσιο των στόχων και του πεδίου εφαρμογής της παρούσας ανασκόπησης.



Επιπλέον με τους όρους αναζήτησης επιλέχθηκαν παράμετροι με: Χρονική περίοδος: 2012-2025, Γλώσσα: Αγγλικά, Τύπος = “Άρθρο”, “Άρθρο περιοδικού”, “Πρακτικά συνεδρίου” και “Κεφάλαιο βιβλίου”.

Μέσω της αναζήτησης εντοπίστηκε μεγάλος αριθμός εργασιών, πάνω από 100. Η σχετική βιβλιογραφία επιλέχθηκε με την ανάλυση του τίτλου, της περίληψης, των λέξεων-κλειδιών, του σώματος της εργασίας και του κύριου τομέα ενδιαφέροντος του εκάστοτε υλικού (άρθρου, περιοδικού, κλπ.). Τέλος, επιλέχθηκε η βιβλιογραφία σύμφωνα με την οποία η θεματική εστίαση του εκάστοτε εγγράφου ήταν το ψηφιακό δίδυμο αντί να αναφέρεται τυχαία ο όρος .

Κατά την διαδικασία της ανασκόπησης αυτό που εύκολα παρατηρείται είναι, η έλλειψη ενός καθολικού, τυποποιημένου ορισμού και χαρακτηριστικών, το οποίο και είναι ένα από τα εμπόδια που αντιμετωπίζουν οι αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως τα DT, όταν προσπαθούν να αποκτήσουν ευρεία κοινωνική αποδοχή. Ωστόσο, υπάρχουν θεμελιώδη στοιχεία και έννοιες σχετικά με το τι πρέπει να κάνει ένα DT τα οποία και θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια.

## 1.5 ΔΟΜΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

### **ΜΕΡΟΣ I**

**Κεφάλαιο 2:** Με βάση την ανάλυση εκτεταμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης παρουσιάζονται οι διάφορες εκδοχές / ορισμοί των DT που έχουν προταθεί έως σήμερα στην Βιομηχανία γενικά και πιο συγκεκριμένα εστιάζοντας στις Ναυτικές εφαρμογές.

**Κεφάλαιο 3:** Παρουσίαση και ανάλυση των βασικών συστατικών στοιχείων του DT αποσκοπώντας στον προσδιορισμό της αρχιτεκτονικής του. Επιπλέον θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν οι διαφορετικοί τύποι του DT με σκοπό να διαχωριστούν και να θα αποδοθεί μια ταξινόμηση με βάση τον βαθμό ολοκλήρωσης. Τέλος θα γίνει περιγραφή του ρόλου και στάθμιση της συμβολής κάθε μίας παραμέτρου στην διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

**Κεφάλαιο 4:** Παρουσίαση και ανάλυση των κριτηρίων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή και διαμόρφωση των βασικών συστατικών στοιχείων του DT (αισθητήρες, δίκτυα επικοινωνίας, πρωτόκολλα επικοινωνίας, μοντέλα προσομοίωσης, τεχνικές επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων, τεχνικές



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

υποστήριξης αποφάσεων και διαχείρισης δεδομένων, ασφάλεια διαχείρισης δεδομένων, κ.λ.π.).

## **ΜΕΡΟΣ II**

**Κεφάλαιο 5:** Θα γίνει μια συστηματική ταξινόμηση των ανωτέρω κριτηρίων ανάλογα με την αποστολή του ψηφιακού δίδυμου (εστιάζοντας σε Ναυτικές εφαρμογές), ώστε να διαμορφωθεί ένας οδικός χάρτης για την ανάπτυξη και αξιοποίηση των DT από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς (κατασκευαστές μηχανημάτων / εξοπλισμού, ναυπηγεία, διαχειριστές στόλου, πλοιοκτήτες, νηογνώμονες, πάροχοι υποστηρικτικών υπηρεσιών, κ.λ.π)

**Κεφάλαιο 6:** Ανάδειξη και σχολιασμός των τεχνολογικών και επιχειρησιακών προκλήσεων για την ευρεία υιοθέτηση και αξιοποίηση των DT στη Ναυτιλία.

**Κεφάλαιο 7:** Με βάση την πλέον σύγχρονη και ώριμη να εφαρμοστεί τεχνολογία, την δυνατότητα / δυναμική της Ναυτιλίας για την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών, αλλά και τις απαιτήσεις που διαμορφώνονται στο σύγχρονο επιχειρηματικό περιβάλλον, θα εκτιμηθεί η προοπτική αξιοποίησης των ψηφιακών διδύμων στην Ναυτιλία καθώς και οι εφαρμογές που αναμένεται ότι θα κυριαρχήσουν.

**Κεφάλαιο 8:** Παρουσίαση των σύγχρονων ερευνητικών / πιλοτικών έργων που βρίσκονται σε εξέλιξη και αφορούν τα ψηφιακά δίδυμα στην Ναυτιλία αλλά και σε συγγενείς κλάδους από όπου εκτιμάται ότι δύναται να μεταφερθεί στο μέλλον η σχετική τεχνογνωσία και στην Ναυτιλία.

**Κεφάλαιο 9:** Συμπεράσματα και προτάσεις για την βέλτιστη αξιοποίηση της τεχνολογίας του ψηφιακού δίδυμου σε Ναυτικές εφαρμογές.

## **ΜΕΡΟΣ I: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΔΙΔΥΜΩΝ**

### **2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ**

#### **2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

Το ψηφιακό δίδυμο (DT) είναι μία από τις νέες και βασικές έννοιες που τα τελευταία χρόνια έχουν συνδεθεί με την τρέχουσα τάση της αυτοματοποίησης και της ανταλλαγής δεδομένων στις τεχνολογίες παραγωγής, το κύμα Βιομηχανία 4.0. Ο όρος DT



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο στη βιομηχανία και σε ερευνητικές πρωτοβουλίες κυβερνητικές ή ιδιωτικές.

Σύμφωνα με τους Gartner (2019), η τεχνολογία DT κατατάσσεται ως μία από τις δέκα κορυφαίες στρατηγικές τεχνολογικές τάσεις με τη δυναμική της να αυξάνεται στα επόμενα τρία έως πέντε χρόνια και εκατοντάδες εκατομμύρια φυσικές οντότητες θα αντιπροσωπεύονται από τους ψηφιακούς τους διδύμους.

Ο όρος «ψηφιακό δίδυμο» (DT), μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλα πλαίσια και από την μελέτη του αντικειμένου παρατηρείται πως η επιστημονική βιβλιογραφία δεν παρέχει έναν μοναδικό ορισμό αυτής της έννοιας.

Στον πυρήνα του, αναφέρεται σε μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή μιας διαδικασίας.

Η Κοινοπραξία Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin Consortium) έχει συσταθεί ως η Αρχή για τον συντονισμό πρωτοβουλιών από τις επιχειρήσεις, την κυβέρνηση και τον ακαδημαϊκό χώρο. Έχει δημοσιεύσει τη γενική περιγραφή ενός DT ως εξής:

*«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση οντοτήτων και διαδικασιών του πραγματικού κόσμου, που συγχρονίζονται σε μια καθορισμένη συχνότητα και πιστότητα.*

*Τα ψηφιακά δίδυμα συστήματα μεταμορφώνουν τις επιχειρήσεις επιταχύνοντας την ολιστική κατανόηση, τη βέλτιστη λήψη αποφάσεων και την αποτελεσματική δράση.*

*Τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και ιστορικά δεδομένα για να αναπαραστήσουν το παρελθόν και το παρόν και να προσομοιάσουν τα προβλεπόμενα μέλλοντα.*

*Τα ψηφιακά δίδυμα παρακινούνται από αποτελέσματα, είναι προσαρμοσμένα στις περιπτώσεις χρήσης, τροφοδοτούνται από την ενοποίηση, βασίζονται σε δεδομένα, καθοδηγούνται από τη γνώση του τομέα και εφαρμόζονται σε συστήματα IT/OT.»*

Η πρώτη προσέγγιση της έννοιας ενός ψηφιακού διδύμου, χρονολογείται από τα πρώιμα διαστημικά προγράμματα Apollo της NASA το 1970. Κατά τη διάρκεια της αποστολής αυτών των προγραμμάτων, μια πανομοιότυπη έκδοση της διαστημικής κάψουλας παρέμενε στη Γη για να αξιολογεί και να προσομοιώνει τις συνθήκες στο Apollo 13. Αυτό επετεύχθη με τη φυσική αντιγραφή των διαστημικών συστημάτων στο



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

έδαφος. Η NASA χρησιμοποίησε βασικές έννοιες αδελφοποίησης για τον διαστημικό προγραμματισμό κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

Ο καθηγητής Michael Grieves (Grieves, 2014), σε μια διάλεξη του 2002 για τη διαχείριση του κύκλου ζωής του προϊόντος (PLM), εισήγαγε για πρώτη φορά την έννοια του ψηφιακού διδύμου. Οι ψηφιακές αναπαραστάσεις των πραγματικών φυσικών προϊόντων ήταν ακόμη αρκετά νέες και σε νηπιακό στάδιο όταν προτάθηκε για πρώτη φορά αυτή η ιδέα. Επιπλέον, οι πληροφορίες που συλλέγονταν για το φυσικό προϊόν κατά τη διάρκεια της παραγωγής ήταν περιορισμένες, συλλέγονταν χειροκίνητα και κυρίως σε χαρτί. Στη δεκαετία που ακολούθησε, η ανάπτυξη και η συντήρηση εικονικών προϊόντων, καθώς και ο σχεδιασμός και η παραγωγή φυσικών προϊόντων, υποστηρίχθηκαν από την έκρηξη της τεχνολογίας των πληροφοριών (IT).

Σύμφωνα με τον Grieves (2014), ο ορισμός διαμορφώνεται ως εξής:

*«Τα εικονικά προϊόντα είναι λεπτομερείς αναπαραστάσεις φυσικών προϊόντων που είναι σχεδόν πανομοιότυπα και ο όρος ψηφιακός δίδυμος αναφέρεται σε μια ολιστική, ψηφιακή προοπτική μηχανικής που εκτείνεται από τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη προϊόντων έως τον προγραμματισμό παραγωγής, τη μηχανική, την παραγωγή και τις συναφείς υπηρεσίες (Διαχείριση κύκλου ζωής προϊόντος - PLM).»*

Η εξάπλωση των συστημάτων εκτέλεσης της παραγωγής στους χώρους των εργοστασίων είχε ως αποτέλεσμα τη συλλογή και αποθήκευση πλήθους πληροφοριών σχετικά με την παραγωγή και τη μορφή των φυσικών προϊόντων. Επιπλέον, η συλλογή αυτή έχει εξελιχθεί από την χειροκίνητη καταγραφή σε έντυπα μέσα, στη ψηφιακή καταγραφή και με τη χρήση ενός ευρέος φάσματος φυσικών τεχνολογιών μη καταστροφικής ανίχνευσης, όπως αισθητήρες και μετρητές, μηχανές μέτρησης συντεταγμένων, λέιζερ, συστήματα όρασης και σάρωση λευκού φωτός.

Από τη σύλληψη της έννοιας του DT από τον Grieves, πολλοί συγγραφείς έχουν προσπαθήσει να ορίσουν τον όρο ψηφιακό δίδυμο, ξεκινώντας από την αεροδιαστημική βιομηχανία με έμφαση στη δομική μηχανική, την επιστήμη των υλικών και τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη των επιδόσεων των αεροσκαφών και των διαστημοπλοίων.

Ο ορισμός του DT που αποδόθηκε από τη NASA είναι ο εξής:



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

*«Το ψηφιακό δίδυμο της NASA είναι μια ολοκληρωμένη πολυφυσική πολλαπλής κλίμακας, πιθανολογική προσομοίωση ενός οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, ιστορικό στόλου κ.λπ., για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του ιπτάμενου δίδυμου του. Ο ψηφιακός δίδυμος είναι εξαιρετικά ρεαλιστικός και μπορεί να εξετάζει ένα ή περισσότερα σημαντικά και αλληλοεξαρτώμενα συστήματα οχήματος, συμπεριλαμβανομένων της πρόωσης/αποθήκευσης ενέργειας, των ηλεκτρονικών συστημάτων αεροσκάφους, της υποστήριξης ζωής, της δομής του οχήματος, της θερμικής διαχείρισης/TPS κ.λπ.»*

Ο ορισμός αυτός έκανε την εμφάνισή του για πρώτη φορά στο προκαταρκτικό σχέδιο και στη συνέχεια στην οριστική έκδοση του σχεδίου στρατηγικού χάρτη πορείας της NASA για τον τομέα μοντελοποίησης προσομοίωσης, τεχνολογίας πληροφοριών και τεχνολογίας επεξεργασίας. Δηλώνοντας πως είναι ιδιαίτερα θεωρητικό, επιδίωξαν να δώσουν μια ιδέα για το πώς θα μπορούσαν να αναπτυχθούν οι εξελίξεις στους τομείς της πληροφορικής, της μοντελοποίησης, της προσομοίωσης και της επεξεργασίας πληροφοριών από το 2010 και για τα επόμενα 10 - 20 χρόνια, (Shafto κ.ά., 2010).

Το DT χρησιμοποιήθηκε επίσης εκτενώς για την εκπαίδευση κατά την προετοιμασία πτήσεων. Υπό αυτή την έννοια, κάθε είδος πρωτοτύπου που χρησιμοποιείται για να αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας για την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να θεωρηθεί ως δίδυμο, (Boschert and Rosen, 2016).

Έκτοτε, οι ερευνητές της αεροδιαστημικής αναφέρονταν στον συγκεκριμένο στρατηγικό χάρτη πορείας της NASA ως το καθοριστικό έργο για τον ορισμό του DT με σκοπό να αντιμετωπιστούν οι ελλείψεις των συμβατικών προσεγγίσεων για να είναι σε θέση να διαχειριστούν οι ακραίες απαιτήσεις των μελλοντικών γενεών των οχημάτων της NASA και της πολεμικής αεροπορίας των ΗΠΑ.

Έτσι λοιπόν, σύμφωνα με τους Glaessgen and Stargel (2012), οι οποίοι επικυρώνουν τον παραπάνω ορισμό, χαρακτηρίζουν το DT ως υπερρεαλιστικό και που μπορεί να λάβει υπόψη του πολλαπλά κρίσιμα και διασυνδεδεμένα συστήματα οχήματος, ενσωματώνοντας δεδομένα αισθητήρων από το σύστημα IVHM (Integrated Vehicle Health Management) του οχήματος, το ιστορικό συντήρησης και όλα τα σχετικά δεδομένα του στόλου αλλά και ιστορικά δεδομένα. Με την συγχώνευση των



δεδομένων, το DT είναι σε θέση να προβλέπει συνεχώς την υγεία του οχήματος ή του συστήματος, την εναπομένουσα ωφέλιμη ζωή και την επιτυχία της αποστολής.

Τα συστήματα DT μπορούν να μειώσουν τις ζημιές ή την υποβάθμιση ενεργοποιώντας μηχανισμούς αυτοθεραπείας ή συμβουλευοντας αλλαγές στο προφίλ της αποστολής για τη μείωση των φορτίων, ενισχύοντας έτσι τη διάρκεια ζωής και την επιτυχία της αποστολής.

Το 2013 έκαναν την εμφάνισή τους οι πρώτες έρευνες για το DT στον τομέα της μεταποίησης και έτσι έχουμε αναφορά για το εικονικό αντίστοιχο των πόρων παραγωγής και όχι μόνο του προϊόντος, θέτοντας τις βάσεις σχετικά με τον ρόλο του DT στο εξελιγμένο περιβάλλον παραγωγής των έξυπνων εργοστασίων της Βιομηχανίας 4.0 με τις βασικές τεχνολογίες της, την ανάλυση μεγάλων δεδομένων και τις πλατφόρμες cloud.

Οι Rios κ.ά. (2015), αναφέρεται στον ορισμό του DT ως ένα ψηφιακό αντίστοιχο προϊόν ενός φυσικού προϊόντος. Έτσι, βλέπουμε να περιλαμβάνεται ένα γενικό «προϊόν», γεγονός που βοήθησε στην χρήση μιας τέτοιας έννοιας και σε άλλους τομείς και όχι μόνο στην αεροδιαστημική.

Το ίδιο έτος, οι Rosen κ.ά. (2015), παρουσιάζουν την εφαρμογή του DT στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του εξοπλισμού και επικεντρώνονται στη σημασία και των τεσσάρων πτυχών που καθοδηγούν το μέλλον της μεταποίησης: (1)αρθρωτότητα, (2)συνδεσιμότητα, (3)αυτονομία, (4)DT. Εισηγάγαν την έννοια του DT σαν ένα νέο παράδειγμα στην προσομοίωση:

*«Ρεαλιστικά μοντέλα της τρέχουσας κατάστασης της διαδικασίας και της δικής τους συμπεριφοράς σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους στον πραγματικό κόσμο.»*

Η μοντελοποίηση και η προσομοίωση αποτελούν πλέον συνήθεις πρακτικές στην ανάπτυξη συστημάτων, υποστηρίζοντας τόσο τον αρχικό σχεδιασμό όσο και την επικύρωση των ιδιοτήτων του συστήματος. Κατά συνέπεια, η υλοποίηση ενός DT είναι ο πρωταρχικός στόχος για τις βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς επιτρέπει την απλοποίηση των διαδικασιών και των ροών εργασίας σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής, (Boschert and Rosen, 2016).

Η Βιομηχανία 4.0, βασίζεται στην διασύνδεση φυσικού και ψηφιακού κόσμου μέσω του IoT και των CPS συστημάτων επιτρέποντας την συνεχή ροή δεδομένων, τον



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

απομακρυσμένο έλεγχο και των συγχρονισμό των δραστηριοτήτων του πραγματικού κόσμου με τον εικονικό χώρο, γεγονός που οδηγεί σε βελτιωμένη αποδοτικότητα, ακρίβεια και οικονομικά οφέλη.

Οι Negri κ.ά. (2017), ορίζουν το DT για συστήματα παραγωγής που βασίζονται σε CPS:

*«Το DT νοείται ως το εικονικό και ψηφιοποιημένο αντίστοιχο ενός φυσικού συστήματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωσή του για διάφορους σκοπούς, αξιοποιώντας τον συγχρονισμό σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων που λαμβάνονται από το πεδίο. Ένας τέτοιος συγχρονισμός είναι δυνατός χάρη στις τεχνολογίες που επιτρέπουν τη Βιομηχανία 4.0 και, ως εκ τούτου, το DT συνδέεται στενά με αυτήν.»*

Με την ευρεία έννοια, το DT είναι ένας τύπος CPS, καθώς και τα δύο υλοποιούν τη συγχώνευση του εικονικού και του φυσικού χώρου. Ωστόσο, το σύστημα DT επικεντρώνεται περισσότερο στα δεδομένα και τα μοντέλα με προσομοιώσεις εξαιρετικά υψηλής πιστότητας, γεγονός που αποτελεί ένα από τα διακριτικά χαρακτηριστικά του. Το DT είναι το παράδειγμα του πώς θα εξελιχθούν τα πληροφοριακά συστήματα στο μέλλον, (Zheng κ.ά., 2018).

Οι Haag και Anderl (2018), ορίζουν το DT ως μια ολοκληρωμένη αναπαράσταση όλων των δεδομένων, των πληροφοριών και της γνώσης του DT αποδεικνύοντας την έννοια του DT, μέσω της ανάπτυξης ενός κυβερνοφυσικού πάγκου δοκιμών δοκού κάμψης, στο ερευνητικό εργαστήριο DiK. Πιο συγκεκριμένα ορίζουν το DT:

*«Το ψηφιακό δίδυμο είναι μια ολοκληρωμένη ψηφιακή αναπαράσταση ενός μεμονωμένου προϊόντος. Περιλαμβάνει τις ιδιότητες, τις συνθήκες και τη συμπεριφορά του πραγματικού αντικειμένου μέσω μοντέλων και δεδομένων. Το ψηφιακό δίδυμο είναι ένα σύνολο ρεαλιστικών μοντέλων που μπορούν να προσομοιώσουν την πραγματική του συμπεριφορά στο περιβάλλον ανάπτυξης. Το ψηφιακό δίδυμο αναπτύσσεται παράλληλα με το φυσικό του δίδυμο και παραμένει το εικονικό του αντίγραφο σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος.»*

Ανεξάρτητα από τον αναπαριστώμενο φυσικό χώρο, είναι απαραίτητο να καθοριστεί ποια στοιχεία του φυσικού χώρου θα πρέπει να μεταφερθούν στον εικονικό χώρο. Η βιβλιογραφία είναι διχασμένη όσον αφορά τον τρόπο μοντελοποίησης της συμπεριφοράς του φυσικού χώρου. Κάποιοι προσπαθούν να αναπαράγουν τη φυσική



συμπεριφορά, τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά σε εξαιρετικά ρεαλιστικά εικονικά μοντέλα για να προσομοιώσουν τη συμπεριφορά του φυσικού χώρου στην τρέχουσα κατάσταση του, (Semerago κ.ά., 2021).

Οι Ταο κ.ά., (2018b), στην ερευνά τους, εξετάζουν το πλαίσιο σχεδιασμού προϊόντων παραγωγής χρησιμοποιώντας το DT, το οποίο μέχρι τότε, είχε χρησιμοποιηθεί για τη διάγνωση ελαττωμάτων, την προληπτική συντήρηση και την ανάλυση επιδόσεων. Διερευνούν λοιπόν, πώς η επικοινωνία, η συνέργεια και η συνεξέλιξη ενός φυσικού προϊόντος με την ψηφιακή του αναπαράσταση (εικονικό προϊόν) μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο ενημερωμένη, επιταχυνόμενη και καινοτόμο διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων και ορίζουν το DT ως:

*«Το ψηφιακό δίδυμο είναι μια πραγματική χαρτογράφηση όλων των συστατικών στοιχείων στον κύκλο ζωής του προϊόντος χρησιμοποιώντας φυσικά δεδομένα, εικονικά δεδομένα και δεδομένα αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.»*

Καθώς ο τομέας του DT φαίνεται να λαμβάνει πολύ μεγαλύτερη προσοχή τόσο από τον ακαδημαϊκό κόσμο όσο και από τη βιομηχανία, η Διεθνής Ακαδημία Μηχανικών Παραγωγής CIRP, δημοσίευσαν έναν ορισμό του DT με σκοπό την αποσαφήνιση του όρου, (Stark and Damerau, 2019) :

*«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός ενεργού μοναδικού προϊόντος (πραγματική συσκευή, αντικείμενο, μηχανή, υπηρεσία ή άυλο περιουσιακό στοιχείο) ή ενός μοναδικού συστήματος προϊόντων-υπηρεσιών (σύστημα που αποτελείται από ένα προϊόν και μια σχετική υπηρεσία) που περιλαμβάνει τα επιλεγμένα χαρακτηριστικά του, ιδιότητες, συνθήκες και συμπεριφορές μέσω μοντέλων, πληροφοριών και δεδομένων σε μια ή ακόμη και σε πολλαπλές φάσεις του κύκλου ζωής.»*

Οι van der Valk κ.ά. (2020), συνιστούν την ανάπτυξη του DT ακόμη και πριν από την ύπαρξη του φυσικού αντίστοιχου, συμφωνώντας έτσι με τους Grieves and Vickers (2017), κατά τους οποίους το ψηφιακό μέρος θα πρέπει να υποστηρίζει την εισαγωγή ενός φυσικού προϊόντος και ως εκ τούτου πρέπει να αναπτυχθεί πριν από το φυσικό μέρος. Μετά από ενδελεχή βιβλιογραφική ενοποίηση, ορίζουν ένα τυπικό DT ως:

*«Το DT είναι ένα πανομοιότυπο μοντέλο ενός φυσικού συστήματος που λαμβάνει συνεχείς ενημερώσεις και επεξεργάζεται ακατέργαστα, καθώς και προεπεξεργασμένα δεδομένα μέσω ενός αμφίδρομου συνδέσμου δεδομένων που το συνδέει φυσικά με το*



*αντίστοιχο του πραγματικού κόσμου. Επιπλέον, μια διεπαφή ανθρώπου-μηχανής (HMI) και η διεπαφή από μηχανή σε μηχανή (M2M) θεωρούνται επίσης μέρος του DT.»*

Με την πάροδο του χρόνου και κυρίως από το 2018 και έπειτα παρατηρείται μια αύξηση σχετικά με την έρευνα της τεχνολογίας DT. Οι Singh κ.ά. (2021), επισημαίνουν πως η ξαφνική αύξηση του αριθμού των δημοσιεύσεων καθώς και η αυξανόμενη δημοτικότητα του DT, έχουν οδηγήσει σε σύγχυση και έλλειψη συναίνεσης μεταξύ των διαφόρων ορισμών. Στην προσπάθεια στους να μειώσουν την σύγχυση γύρω από τους διάφορους όρους που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του DT, προσφέρεται από τους συγγραφείς ένας ορισμός που είναι εφαρμόσιμος ανεξάρτητα από τον κλάδο ή την εφαρμογή:

*«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα δυναμικό και αυτοεξελισσόμενο ψηφιακό/εικονικό μοντέλο ή προσομοίωση ενός πραγματικού αντικειμένου ή αντικειμένου (εξαρτήματος, μηχανής, διαδικασίας, ανθρώπου κ.λπ.) που αντιπροσωπεύει την ακριβή κατάσταση του φυσικού του δίδυμου σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή μέσω της ανταλλαγής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο καθώς και της διατήρησης των ιστορικών δεδομένων. Δεν είναι μόνο το ψηφιακό δίδυμο που μιμείται τον φυσικό του δίδυμο, αλλά τυχόν αλλαγές στο ψηφιακό δίδυμο μιμούνται και από το φυσικό δίδυμο.»*

Οι Semeraro κ.ά. (2021), πραγματοποιούν μια εκτενή και λεπτομερή ανάλυση της βιβλιογραφίας σε 150 εργασίες από το 2002 έως και το 2020. Χρησιμοποιώντας ανάλυση εξόρυξης κειμένου διευκρινίζονται οι ορισμοί που έχουν αποδοθεί σχετικά με το DT και με την χρήση τεχνικής ομαδοποίησης, ομαδοποιούνται σε συνιστώσες (C1-C5) όπου κάθε συνιστώσα υποδεικνύει το κύριο χαρακτηριστικό γύρω από το οποίο διαμορφώνονται οι ορισμοί στην βιβλιογραφία. Στον Πίνακα 2.1 αποτυπώνεται η πληθώρα των ορισμών. Υπό το πρίσμα των προηγούμενων, οι συγγραφείς διατύπωσαν έναν επιπλέον ορισμό ως εξής:

*«Ένα σύνολο προσαρμοστικών μοντέλων που μιμούνται τη συμπεριφορά ενός φυσικού συστήματος σε ένα εικονικό σύστημα που λαμβάνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να ενημερώνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Ο ψηφιακός δίδυμος αναπαράγει το φυσικό σύστημα για να προβλέψει τις αποτυχίες και τις ευκαιρίες αλλαγής, να προδιαγράψει δράσεις σε πραγματικό χρόνο για τη βελτιστοποίηση ή/και τον*



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

*μετριάσμο απροσδόκητων συμβάντων παρατηρώντας και αξιολογώντας το προφίλ του λειτουργικού συστήματος.»*



“Ιωάννα Δελή”,  
 “Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
 Εφαρμογές και Προοπτικές ”

<b>DIGITAL TWIN DEFINITIONS</b>				
<b>ID</b>	<b>Year</b>	<b>Authors</b>	<b>DT Definition</b>	<b>Belonging Cluster</b>
1	2002	(Grieves, 2014)	“a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin. The Digital Twin concept model contains three main parts: a) physical products in Real Space, b) virtual products in Virtual Space, and c) the connections of data and information that ties the virtual and real products together.”	C1
2	2012	(Glaessgen & Stargel, 2012)	“an integrated multi-physics, multi-scale, probabilistic simulation of a complex product and uses the best available physical models, sensor updates, etc., to mirror the life of its corresponding twin.”	C1
3	2012	(Tuegel, 2012)	“a cradle-to-grave model of an aircraft structure’s ability to meet mission requirements, including sub-models of the electronics, the flight controls, the propulsion system, and other subsystems.”	C5
4	2013	(Lee et al., 2013)	“a coupled model enables a digital twin of the real machine that operates in the cloud platform in parallel with the real process and simulates the health condition with an integrated knowledge from both data driven analytical algorithms as well as other available physical knowledge. The coupled model approach first constructs a digital image of a machine from the early design stage.”	C3
5	2015	(Ríos et al., 2015)	“a product equivalent digital counterpart that exists along the product life cycle from conception and design to usage and servicing, knows the product past, current and possible future states, and facilitates the development of product related intelligent services.”	C1
6	2015	(Rosen et al., 2015)	“a very realistic model of the current state of the process and their own behaviour in interaction with their environment in the real world.”	C4
7	2016	(Schroeder et al., 2016b)	“a virtual representation of the real product. It has product’s information from the beginning of the life until the disposal of the product. The Digital Twin is a counterpart of the physical device, machine or product in a CPS. It has the information related to the whole life cycle of a product.”	C1
8	2017	(Alam & El Saddik, 2017)	“the cyber layer of CPS, which evolves independently and keeps close integration with the physical layer.”	C2
9	2017	(Brenner & Hummel, 2017)	“a digital copy of a real factory, machine, worker etc., that is created and can be independently expanded, automatically updated as well as being globally available in real time.”	C3
10	2017	(Ciavotta et al., 2017)	“a digital avatar encompassing CPS data and intelligence, representing structure, semantics, and behaviour of the associated CPS, and providing services to mesh the virtual and physical worlds.”	C4



“Ιωάννα Δελή”,  
 “ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
 Εφαρμογές και Προοπτικές ”

11	2017	(Graessler & Poehler, 2017)	“a cyber-physical device of its own, which is connected to the CPPS and tries to emulate the human employee through dynamically adapted values of a database, which represent for example properties, preferences, work schedule and skillset.”	C2
12	2017	(Zhang et al., 2017a)	“a set of realistic product and production process models linking enormous amounts of data to fast simulation and allowing the early and efficient assessment of the consequences, performance, quality of the design decisions on products and production line.”	C1
13	2017	(Negri et al., 2017)	“a virtual and computerized counterpart of a physical system that can exploit a real-time synchronization of the sensed data coming from the field and is deeply linked with Industry 4.0.”	C5
14	2017	(Schleich et al., 2017)	“a bi-directional relation between a physical artefact and the set of its virtual models, enabling the efficient execution of product design, manufacturing, servicing, and various other activities throughout the product life cycle.”	C1
15	2017	(Schluse et al., 2017)	“a one-to-one virtual replica of a “technical asset” (e.g., machine, component, and part of the environment). A digital twin contains models of its data (geometry, structure,...), its functionality (data processing, behaviour, . . .), and its communication interfaces. It integrates all knowledge resulting from modelling activities in engineering (digital model) and from working data captured during real-world operation (digital shadow).”	C3
16	2017	(Söderberg et al., 2017)	“a digital copy of a product or a production system, going across the design, pre-production, and production phases and performing real-time optimization.”	C1
17	2017	(Stark et al., 2017)	“a unique instance of the universal Digital Master model of an asset, its individual Digital Shadow and an intelligent linkage (algorithm, simulation model, correlation, etc.) of the two elements above.”	C3
18	2017	(Weber et al., 2017)	“a digital representation that contains all the states and functions of a physical asset and has the possibility to collaborate with other digital twins to achieve a holistic intelligence that allows for decentralized self-control.”	C3
19	2017	(Yun et al., 2017)	“a perfect digital entity of a physical system; it accurately reflects the status of the corresponding physical machine. We can tightly control the system through a digital twin, that is, a cyber model of the machine.”	C3
20	2018	(Autiosalo, 2018)	“the cyber part of a Cyber-Physical System.”	C2
21	2018	(Asimov et al., 2018)	“a virtual replica of real physical installation, which can check the consistency for monitoring data, perform data mining to detect existing and forecast upcoming problems, and which uses an AI knowledge engine to support effective business decisions.”	C5
22	2018	(Bao et al., 2018)	“a virtual model in the virtual space, and it is used to simulate the behaviour and characteristics of the corresponding physical object in real time.”	C4



*“Ιωάννα Δελή”,  
“Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

23	2018	(Lee & Kim, 2018)	“a near real-time digital image of a physical object or process that helps optimize business performance. Two concepts of IoT (Internet of things) and IoS (Internet of Service) are combined to realise the smart factory based on a digital twin.”	C3
24	2018	(Haag & Anderl, 2018)	“a comprehensive digital representation of an individual product. It includes the properties, condition, and behaviour of the real-life object through models and data. The digital twin is a set of realistic models that can simulate its actual behaviour in the deployed environment. The digital twin is developed alongside its physical twin and remains its virtual counterpart across the entire product life cycle.”	C3
25	2018	(Luo et al., 2018)	“a complete virtual prototype of an entire system and a one-to-one mapping relationship. Therefore, a multi-domain digital modelling method is needed; a consistent model between the designed and the actual environment of a machine tool should be established, which needs the real-time and accurate data mapping method; an effective machine learning algorithm to mine the data gathered from sensors and the control system is also necessary.”	C5
26	2018	(Nikolakis et al., 2018)	“a digital replica of the physical environment along with the operator. This model constrains the behaviour of the twin towards replicating the actions of the physical system’s actuators.”	C4
27	2018	(Tao et al., 2018b)	“a set of virtual models. These mirror images and mapping of the physical products in the virtual space. They could reflect the whole life cycle process, as well as simulate, monitor, diagnose, predict, and control the state and behaviours of the corresponding physical entities. The virtual models include not only the geometric models, but also all rules and behaviours, such as material properties, mechanical analysis, health monitoring.”	C4
28	2018	(Liu et al., 2018b)	“a living model that continually adapts to change in the environment or operation using real-time sensory data and can forecast the future of the corresponding physical assets for predictive maintenance.”	C4
29	2018	(Zhuang et al., 2018)	“a dynamic model in the virtual world that is fully consistent with its corresponding physical entity in the real world and can simulate its physical counterpart’s characteristics, behaviour, life, and performance in a timely fashion.”	C4
30	2019	(Leng et al., 2019)	“each physical device will have its cyber part as a digital representation of the real device, culminating in the digital twin models. So, the digital twin can monitor and control the physical entity, while the physical entity can send data to update and synchronize its virtual model.”	C3

**Πίνακας 2.1:** Ορισμοί για το Ψηφιακό Δίδυμο (Semeraro κ.ά., 2021)



Λαμβάνοντας υπόψιν τον Πίνακα 2.1 και την μέχρι τώρα μελέτη της βιβλιογραφίας, μπορούμε να συμπεράνουμε πως, εκτός από την πληθώρα ορισμών, οι πρώτες έννοιες περιγράφουν το DT σε σχέση με την αεροδιαστημική βιομηχανία γιατί και πρωτοστάτησε η λέξη όχημα για να περιγράψει την αδελφοποίηση των αεροσκαφών ή διαστημικών οχημάτων. Στην συνέχεια με την άνοδο της Βιομηχανίας 4.0 οι λέξεις αυτές αντικαταστάθηκαν από προϊόν, σύστημα, μοντέλο, αντίγραφο, ψηφιακή αναπαράσταση, οντότητα, παράδειγμα, CPS σύστημα για να περιγράψουν το DT ενός αντικειμένου όπως μηχανής, εξαρτήματος, αλλά και διαδικασίας.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που καθορίζουν τον ορισμό του ψηφιακού διδύμου είναι η ικανότητα προσομοίωσης καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος (C1), ο συγχρονισμός και η διασύνδεση του CPS με τα φυσικά περιουσιακά στοιχεία (C2), η ενσωμάτωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (C3), η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του φυσικού χώρου (C4) και οι υπηρεσίες που προσφέρει το εικονικό σύστημα (C5).

Προκύπτει λοιπόν, πως ενώ πολυάριθμες μελέτες έχουν αφιερωθεί στην ανάλυση της έννοιας του DT, στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει ενιαία και συνεπής κατανόηση του τι είναι. Ανάλογα με το πλαίσιο εφαρμογής η έννοια δίνει ξεχωριστά αποτελέσματα. Αυτή η έλλειψη συνοχής έχει οδηγήσει σε μια ποικιλία χαρακτηρισμών και ορισμών για τα ψηφιακά δίδυμα και τη διαδικασία ψηφιακής αδελφοποίησης, η οποία, λόγω της ποικιλομορφίας των πλαισίων σε επίπεδο βιομηχανίας, ενέχει τον κίνδυνο να αποδυναμωθεί η έννοια και να παραβλεφθούν τα οφέλη για τα οποία προοριζόταν το DT.

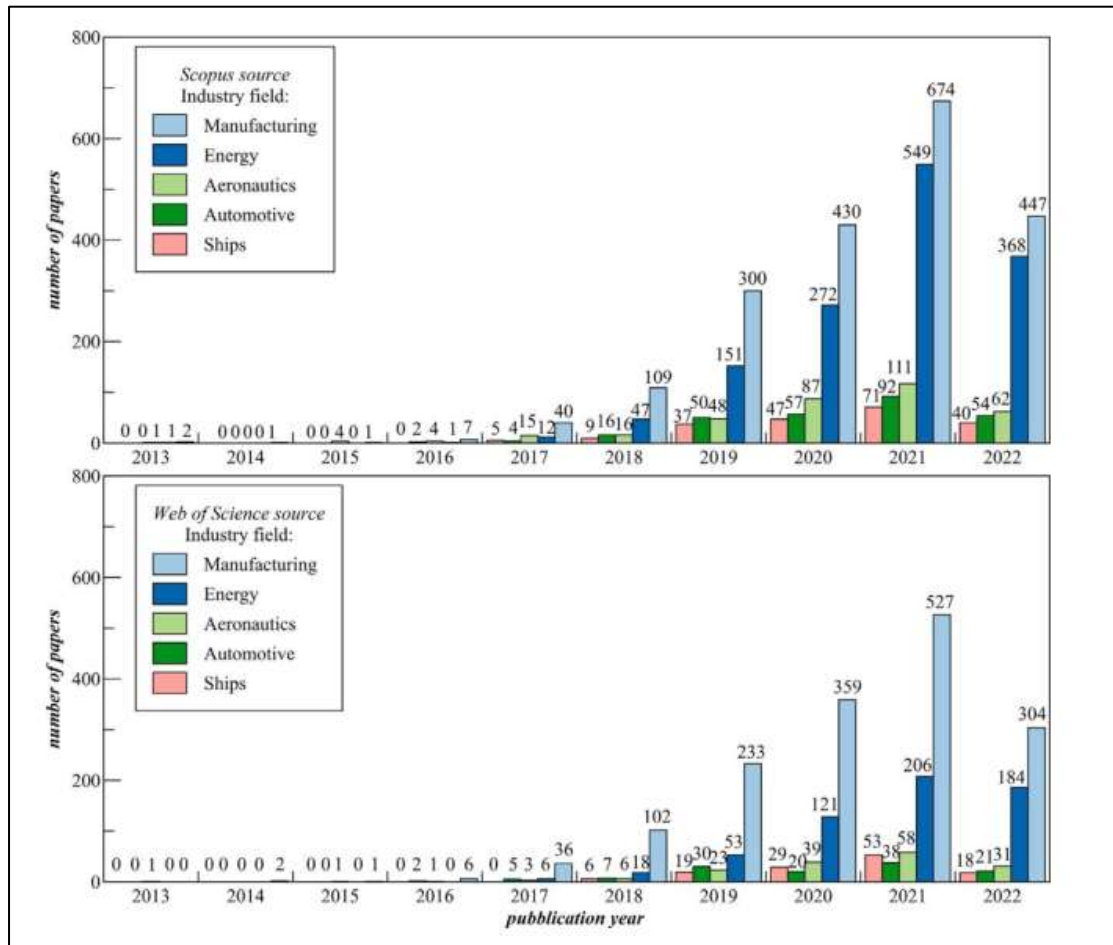
Στην επόμενη ενότητα, η βιβλιογραφική ανασκόπηση επεκτείνεται με σκοπό να αποτυπωθούν οι ορισμοί που έχουν αποδοθεί μέσα από την εφαρμογή του DT στην βιομηχανία της ναυτιλίας.

## 2.2 ΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Οι δημοσιευμένες εργασίες στον τομέα των μεταφορών εξακολουθούν να βρίσκονται ένα βήμα πίσω σε σύγκριση με τους τομείς που σχετίζονται με τη μεταποίηση ή την ενέργεια, με τη ναυτιλιακή βιομηχανία να παρουσιάζει χαμηλότερα επίπεδα από την αεροδιαστημική ή την αυτοκινητοβιομηχανία. Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα



αποτελέσματα της μη φιλτραρισμένης έρευνας από τους Mauro and Kana (2023), για αυτά τα κύρια θέματα στις βάσεις δεδομένων Scopus και WoS. Αυτό δείχνει τις διαφορές μεταξύ των προαναφερθέντων τομέων.



**Σχήμα 2.1:** Καταγραφή των εργασιών που δημοσιεύονται κάθε χρόνο σε διάφορους κλάδους με στοιχεία από τις βάσεις δεδομένων Scopus (πάνω) και WoS (κάτω) (Αύγουστος 2013- 2022), (Mauro and Kana, 2023)

Παρακάτω αποτυπώνονται οι σχετικοί με τον κλάδο ορισμοί του DT.

Οι Lind κ.ά. (2020), σε άρθρο τους όπου αναλύουν τον τρόπο με τον οποίο το DT μπορεί να βελτιώσει τη λήψη αποφάσεων από φορείς, στο οικοσύστημα των μεταφορών και της ναυτιλίας, αποδίδουν τον παρακάτω ορισμό για το DT:

«Το ψηφιακό δίδυμο είναι μια δυναμική ψηφιακή αναπαράσταση ενός αντικειμένου ή ενός συστήματος. Περιγράφει μοναδικά σε δυαδική μορφή τα βασικά χαρακτηριστικά και



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

*τις ιδιότητες ενός ατόμου, προϊόντος ή περιβάλλοντος και μπορεί να αποδοθεί σε έναν ή περισσότερους φυσικούς ή ψηφιακούς χώρους.»*

Τα DT απαιτούν την ανάπτυξη ενός ακριβούς συνόλου εξισώσεων για κάθε συστατικό του μοντέλου και τις αλληλεπιδράσεις τους. Επιπλέον, απαιτούν δεδομένα για τη βαθμονόμηση και τη λειτουργία. Καθώς ο ψηφιακός μετασχηματισμός του ναυτιλιακού τομέα συνεχίζεται, μπορεί επίσης να δημιουργήσει τα δεδομένα που απαιτούνται για τη βαθμονόμηση των ψηφιακών διδύμων των διαφόρων στοιχείων ενός πλοίου, ενός λιμένα και άλλων στοιχείων της υποδομής μεταφορών, συμπεριλαμβανομένων των μεταφερόμενων εμπορευμάτων (όπως π.χ. ξηρά και ψυκτικά εμπορευματοκιβώτια). Υπάρχουν ευκαιρίες για την ψηφιακή αναπαράσταση και προσομοίωση αντικειμένων και γεγονότων πριν από τη λήψη μιας απόφασης σε πολλούς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της ναυτιλίας.

Καθώς περισσότερες συσκευές, όπως ένα έξυπνο εμπορευματοκιβώτιο με δεδομένα που παράγονται από διάφορες περιπτώσεις χρήσης (π.χ. εκτελούμενος χρόνος διέλευσης, ειδοποιήσεις για αποκλίσεις και χρήση υποδομών που σχετίζονται με τις μετακινήσεις και τις λειτουργίες των εμπορευματοκιβωτίων), συνδέονται, οι ψηφιακές ροές δεδομένων που βασίζονται στην τυποποιημένη ανταλλαγή δεδομένων προσφέρουν ευκαιρίες για αναπαράσταση και προσομοίωση αυθεντικών καταστάσεων σε πραγματικό χρόνο. Τα DT θα εκτοπίσουν τα μοντέλα προσομοίωσης ως αποτέλεσμα της αύξησης κατά τάξη μεγέθους της πιστότητας της αναπαράστασης του φυσικού κόσμου και της συνεχούς επαναβαθμονόμησής τους μέσω ψηφιακών ροών δεδομένων σε απόκριση στις μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Οι Johansen and Nejad (2019), περιγράφουν την παρακολούθηση της κατάστασης των συστημάτων μετάδοσης κίνησης ενός θαλάσσιου συστήματος ισχύος, τονίζοντας πως υπάρχει σημαντική προστιθέμενη αξία για ένα DT όταν εφαρμόζεται σε περιουσιακά στοιχεία υψηλής αξίας σε δύσκολα προσβάσιμες τοποθεσίες, όπως ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης σε μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια, ή σε ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης πλοίου. Οι συγγραφείς δίνουν τον παρακάτω ορισμό:

*«Ο ψηφιακός δίδυμος είναι μια εικονική αναπαράσταση ενός συστήματος που περιέχει όλες τις πληροφορίες που είναι διαθέσιμες επιτόπου.»*



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Αυτό σημαίνει ότι όλες οι περιγραφικές πληροφορίες για την κατάσταση που βρίσκονται επί τόπου είναι διαθέσιμες σε ένα ψηφιακό μοντέλο μέσα σε ένα εικονικό και δυναμικό περιβάλλον που είναι πανομοιότυπο με την πραγματική ζωή του συστήματος.

Μεγάλοι νηογνώμονες όπως είναι οι DNV, LR, ClassNK, ABS, BV έχουν προσθέσει αξία στις υπηρεσίες (π.χ. παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, βελτιστοποίηση των διαδικασιών) που προσφέρουν στις ναυτιλιακές εταιρείες χρησιμοποιώντας εργαλεία που υποστηρίζουν την ανάπτυξη της Βιομηχανίας 4.0 (IoT, Big Data analysis, AI, VR, κ.α.) και έχουν αναφερθεί στην έννοια του ψηφιακού διδύμου στην στρατηγική τους για την ψηφιοποίηση. Οι ορισμοί που αποδίδονται στο DT είναι οι παρακάτω:

- DNV (Det Norske Veritas)

*«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου, περιουσιακού στοιχείου ή συστήματος: ένα πλοίο, ένα αυτοκίνητο, μια ανεμογεννήτρια, ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ένας αγωγός, ή ένα κομμάτι εξοπλισμού, όπως ένας προωθητήρας ή ένας κινητήρας.»*, (Smogeli, 2017).

- LR (Lloyd’s Register)

*«Ορίζουμε τα ψηφιακά δίδυμα ως μια "πολυφυσική, καθοδηγούμενη από δεδομένα αναπαράσταση (ή μοντέλο) ενός φυσικού περιουσιακού στοιχείου, που συχνά βρίσκεται σε περιβάλλον που βασίζεται στο cloud και χρησιμοποιεί δεδομένα που μεταδίδονται από το φυσικό περιουσιακό στοιχείο. Ο συνδυασμός του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου επιτρέπει την εφαρμογή σύνθετων αναλυτικών τεχνικών στο ψηφιακό δίδυμο, οι οποίες μπορούν να παράγουν πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του περιουσιακού στοιχείου, να εντοπίζουν και να δοκιμάζουν ευκαιρίες βελτιστοποίησης σε ένα ψηφιακό περιβάλλον δοκιμών ή να προβλέπουν τη μελλοντική κατάσταση των φυσικών περιουσιακών στοιχείων, επιτρέποντας τη λήψη καλύτερων αποφάσεων συντήρησης και λειτουργίας. Ένα ψηφιακό δίδυμο θα μαθαίνει και θα βελτιώνει τις γνώσεις του με την πάροδο του χρόνου, συλλέγοντας δεδομένα σχετικά με την απόδοση ενός περιουσιακού στοιχείου υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας, με την υποστήριξη μαθηματικών κανόνων που βασίζονται στη φυσική του πραγματικού κόσμου.»*, (LR, 2018)



- ClassNK (Nippon Kaiji Kyokai)

*«Το ψηφιακό δίδυμο είναι μια ψηφιακή αναπαραγωγή προϊόντων και εγκαταστάσεων που μπορεί να προσομοιώσει την κίνηση και τη λειτουργία και να κάνει προβλέψεις για το εν λόγω περιουσιακό στοιχείο.»*, (ClassNK, 2018)

- ABS (American Bureau of Shipping)

*«Πρόκειται για μια εικονική αναπαράσταση ενός μεμονωμένου φυσικού συστήματος που μαθαίνει συνεχώς με την αφομοίωση όλο και νεότερων δεδομένων που το αφορούν, βελτιώνοντας έτσι σταδιακά την ικανότητά του να αναπαριστά το περιουσιακό στοιχείο.»*, (Tremblay 2020).

- BV (Bureau Veritas)

*«Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα ψηφιακό αντίγραφο μιας ζωντανής ή μη ζωντανής φυσικής οντότητας. Γεφυρώνοντας τον φυσικό και τον εικονικό κόσμο, τα δεδομένα μεταδίδονται απρόσκοπτα, επιτρέποντας στην εικονική οντότητα να υπάρχει ταυτόχρονα με τη φυσική οντότητα.»*, (Bureau Veritas, n.d.)

Οι Berre and Rødseth (2018), στην εργασία τους για το έργο ανάπτυξης Maritime Data Space (MDS) που αφορά την κυριότητα και την διακυβέρνηση των δεδομένων που προκύπτουν καθημερινά στον κόσμο της ναυτιλίας, προτείνουν τον παρακάτω ορισμό που εστιάζει στα δεδομένα και στις πληροφορίες.

*«Το ψηφιακό δίδυμο είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού συστήματος, που συνήθως περιλαμβάνει πρόσθετα συναφή δεδομένα, λεπτομέρειες παραγωγής και άλλες πληροφορίες.»*

Η Bekker (2018), εξετάζει τα δυνητικά οφέλη της τεχνολογίας DT για το SA Agulhas II (SAA II), ένα πολιτικό εφοδιαστικό και ερευνητικό πλοίο και χρησιμοποιεί τον παρακάτω ορισμό για τον προσδιορισμό του DT,

*«Πρόκειται για μια ψηφιακή, σε πραγματικό χρόνο, στο πλαίσιο, λειτουργική μίμηση ενός περιουσιακού στοιχείου, η οποία συνδέει τις ψηφιακές και τις πραγματικές αναπαραστάσεις με στόχο την αξιοποιήσιμη πληροφόρηση.»*

Στο άρθρο παρουσιάζεται πώς μια υποδομή αισθητήρων σε συνδυασμό με ανάλυση δεδομένων και μηχανικής μάθησης (ML) μπορεί να υποστηρίξει λειτουργίες όπως παρακολούθηση κατάστασης, πρόβλεψη συμπεριφοράς και θέτει τα θεμέλια για



εστίαση στον ανθρώπινο παράγοντα επί του πλοίου (ανθρώπινη απόκριση στην πρόσκρουση κυμάτων), με σκοπό να βοηθήσει στον καλύτερο σχεδιασμό πλοίων.

Οι Assani κ.ά. (2022), στην εργασία τους μεταξύ άλλων, διερεύνησαν μια νέα έννοια ψηφιακού διδύμου πλοίου (SDT), με σκοπό την αποσαφήνιση της έννοιας επιχειρώντας να ξεκαθαρίσουν τις παρανοήσεις και τις ασάφειες γύρω από τον ορισμό της έννοιας του DT στην ναυτιλία. Περιγράφουν την έννοια του ψηφιακού διδύμου πλοίου ως:

*«Το ψηφιακό δίδυμο πλοίου (SDT) είναι ένα ψηφιακό αρχείο της συμπεριφοράς ενός πλοίου ή ένας κλώνος λογισμικού, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση σεναρίων που είναι δαπανηρό ή δύσκολα εφικτό να εκτελεστούν σε ένα πραγματικό αντικείμενο και ιδίως σε πραγματικό χρόνο.»*

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, το SDT είναι μια εξελισσόμενη έννοια που μπορεί να βελτιώσει τη συνολική στρατηγική ελέγχου και τη διαχείριση του πλοίου. Συγκεκριμένα, η έρευνα αποκάλυψε ότι το σύστημα πρόωσης (18%), η δομή του πλοίου (18%) και τα ηλεκτρικά συστήματα (23%) είναι τα πιο συχνά μελετώμενα συστήματα. Το SDT επιπλέον μπορεί να αξιολογηθεί αποτελεσματικά και αποδοτικά όσον αφορά την συντήρηση, την πρόβλεψη και ανίχνευση βλαβών σε πραγματικό χρόνο, τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών επί του πλοίου, π.χ. μείωση της κατανάλωσης καυσίμων, μείωση των επιπτώσεων της ρύπανσης, παρακολούθηση της κατάστασης του κύτους του πλοίου και συνολική μείωση του κόστους, με τις επικρατέστερες εφαρμογές SDT να επικεντρώνονται στην παρακολούθηση της κατάστασης.

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων βρίσκεται ακόμη υπό διερεύνηση και ο ορισμός και η κατανόησή της ποικίλλουν με βάση το πλαίσιο που μέχρι τώρα έχει εφαρμοστεί στην βιομηχανία αλλά και με βάση την φάση του κύκλου ζωής που αυτό εφαρμόζεται. Όσον αφορά την ναυτική βιομηχανία η κατάσταση της συγκεκριμένης τεχνολογίας των DT είναι σε πολύ πρώιμα στάδια και παρατηρούμε από το Σχήμα 2.1 πως μόλις το 2017 ξεκινάει η έρευνα της τεχνολογίας εντός του τομέα. Η επιτυχής εφαρμογή απαιτεί ένα πλήρες σύστημα τεχνικών προτύπων και προδιαγραφών. Η οικοδόμηση ενός τυποποιημένου συστήματος για την τεχνολογία των DT είναι σημαντική για τους σχεδιαστές σε όλα τα επίπεδα ώστε εντός του τομέα να επιτευχθεί μια εννοιολογική



συναίνεση, να καθιερωθεί ένα ενιαίο ερευνητικό πρότυπο και να διαμορφωθεί μια τυποποιημένη μέθοδος σχεδιασμού, (Zhou et al. 2021).

### 2.3 ΤΟΜΕΙΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥ DT

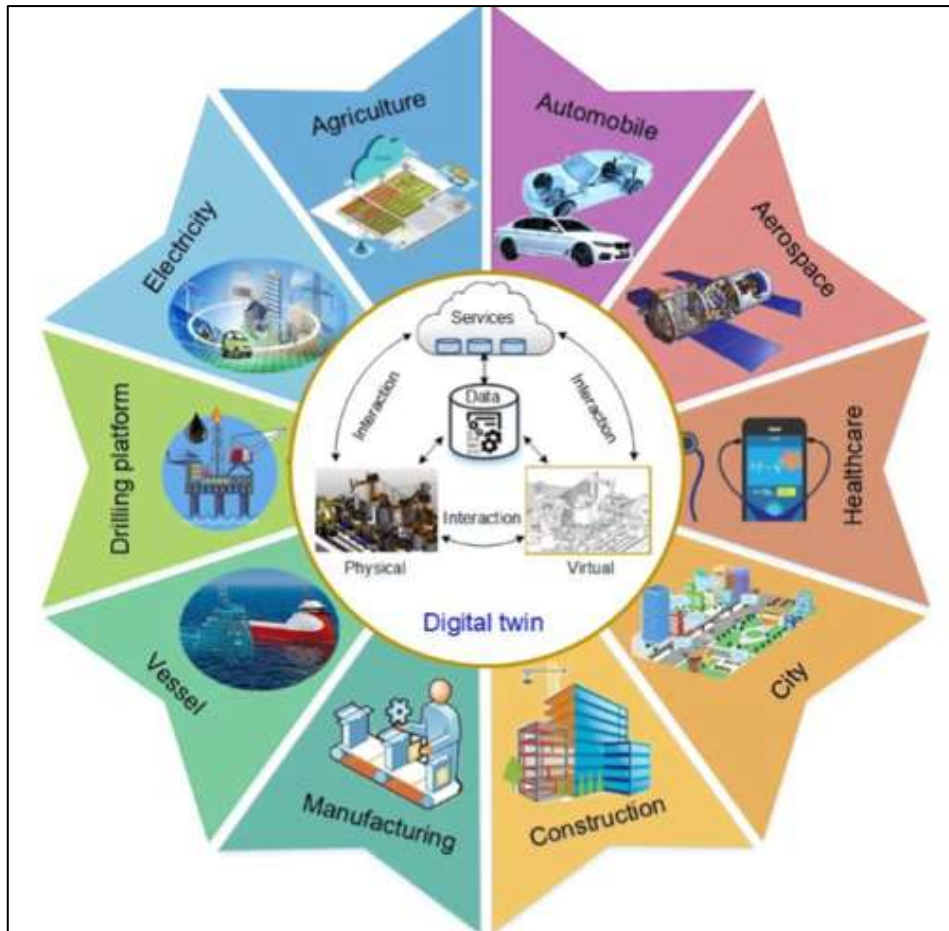
Το DT συγκέντρωσε σημαντική προσοχή και κερδίζει ολοένα και μεγαλύτερη δημοτικότητα στην ακαδημαϊκή κοινότητα και τη βιομηχανία τα τελευταία χρόνια. Όσον αφορά την ακαδημαϊκή κοινότητα, έχουν μελετηθεί πολυάριθμες εφαρμογές για αυτό όπως για παράδειγμα, στους κλάδους της επιστήμης και της μηχανικής, της διαχείρισης της ζωής των εργαλειομηχανών, της διαχείρισης της υγείας των προϊόντων (PHM), των έξυπνων πόλεων, της παρακολούθησης της υγείας των ασθενών κ.λπ. (Liu κ.ά., 2022).

Λόγω των δυνατοτήτων ρεαλιστικών προσομοιώσεων σε πραγματικό χρόνο για την ενίσχυση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων, μη ακαδημαϊκά ιδρύματα, όπως κυβερνήσεις και επιχειρήσεις, αποκτούν ενδιαφέρον για την τεχνολογία DT

Από την βιβλιογραφία προκύπτει πως ενώ η διερεύνηση και η εφαρμογή της τεχνολογίας του DT ξεκίνησαν από την αεροδιαστημική, τα οφέλη της σύντομα εκμεταλλεύτηκαν και άλλοι τομείς, μερικοί από αυτούς είναι η μεταποίηση, η αυτοκινητοβιομηχανία, η υγειονομική περίθαλψη, η ναυτιλία και ο τομέας της διαχείρισης πόλεων κ.λπ. (Σχήμα 2.2). Η ανάλυση της ιδέας του DT αποδίδει διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής (αεροδιαστημική, μεταποίηση, διαχείριση πόλεων κ.λπ.). Ταυτόχρονα, τα DT έχουν τα δικά τους ειδικά χαρακτηριστικά για το πλαίσιο με βάση τη φάση του κύκλου ζωής του προϊόντος, δηλαδή το σχεδιασμό, την παραγωγή, την υπηρεσία και την απόσυρση.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”



**Σχήμα 2.2:** Εφαρμογές DT σε διαφορετικούς τομείς (Qi κ.ά., 2021)

### 2.3.1 ΑΕΡΟΠΟΡΙΚΗ/ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ

Οι αεροπορική/αεροδιαστημική (NASA και η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ) είναι οι τομείς που διερεύνησαν πρώτοι το DT.

Στον τομέα της αεροδιαστημικής, οι πρωταρχικές χρήσεις των DT περιλαμβάνουν τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας των διαστημικών οχημάτων και των αεροσκαφών, την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση των δυσκολιών συντήρησης και την αύξηση της ασφάλειας των αποστολών του πληρώματος. Η κύρια εφαρμογή των DT σε αυτόν τον τομέα ξεκίνησε με στόχο τη βελτίωση των επιδόσεων και της αξιοπιστίας των διαστημικών οχημάτων και αεροσκαφών. Ο τεχνολογικός οδικός χάρτης της NASA για το 2010 (Shafto κ.ά., 2010), ανέφερε τις ακόλουθες τέσσερις εφαρμογές του DT:



1. Προσομοίωση της μελλοντικής αποστολής του πραγματικού οχήματος πριν από την εκτόξευσή του με σκοπό την βελτιστοποίηση της επιτυχίας της αποστολής.
2. Συνεχής αντικατοπτρισμός της πορείας πτήσης του ιπτάμενου δίδυμου του και συνεχής ενημέρωση των μοντέλων με συνθήκες όπως του πραγματικού φορτίου, της θερμοκρασίας και άλλων περιβαλλοντικών δεδομένων αλλά και δεδομένων υγείας (παρουσία και η έκταση των ζημιών, θερμοκρασία του κινητήρα) επιτρέποντας στο ιπτάμενο δίδυμο να κάνει προβλέψεις όσο το όχημα βρίσκεται σε πτήση.
3. Διάγνωση σε περίπτωση δυνητικά καταστροφικού ατυχήματος ή βλάβης.
4. Χρήση ως πλατφόρμα για τη μελέτη των συνεπειών των αλλαγών των παραμέτρων της αποστολής που δεν είχαν ληφθεί υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού.

Η NASA προβλέπει ότι η εφαρμογή της τεχνολογίας DT θα μειώσει κατά το ήμισυ τα έξοδα συντήρησης των αεροσκαφών και θα παρατείνει τη διάρκεια ζωής τους κατά δέκα φορές έως το 2035, (Guo and Lv, 2022).

Στην αεροπορική βιομηχανία, το DT χρησιμοποιείται κυρίως ως εργαλείο για την προληπτική συντήρηση, για παράδειγμα, για τον εντοπισμό δυνητικά επικίνδυνων δομικών αλλαγών στα αεροσκάφη και τη μετέπειτα ενεργοποίηση μηχανισμών αυτοθεραπείας, καθώς και για την υποστήριξη αποφάσεων, τη βελτιστοποίηση και τη διάγνωση, (Barricelli κ.ά., 2019).

Η Boeing άρχισε να υιοθετεί την έννοια του DT από το 2017, χρησιμοποιώντας εικονικά μοντέλα εξαιρετικά πολύπλοκων συστημάτων και εξαρτημάτων των αεροσκαφών της τα οποία υπόκειντο σε προσομοιώσεις σχετικά με τον κύκλο ζωής των περιβαλλόντων και των συνθηκών που μπορεί να αντιμετωπίσουν αυτά τα εξαρτήματα ή τα συστήματα. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της ποιότητας των εξαρτημάτων και των συστημάτων αεροσκαφών κατά 40%. Επιπλέον, η χρήση τους είχε οδηγήσει σε 40-50% αύξηση της ποιότητας κατά την πρώτη φορά.

Έως και το 70% των αεροσκαφών παγκοσμίως τροφοδοτείται από κινητήρες της General Electric (GE). Η εταιρεία για να προβλέψει τη φθορά και την ανάγκη



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

συντήρησης πριν εμφανιστούν προβλήματα, σχεδίασε ένα DT για τον κινητήρα GE90 που τροφοδοτεί τα αεροσκάφη μεγάλης εμβέλειας Boeing 777, (AltexSoft, 2025).

Επιπλέον, η GE ανέπτυξε το πρώτο DT για το σύστημα προσγείωσης ενός αεροπλάνου και αισθητήρες εγκαταστάθηκαν σε τυπικά σημεία βλάβης, όπως η υδραυλική πίεση και η θερμοκρασία των φρένων, για να παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Αυτό βοήθησε στην πρόβλεψη πρώιμων βλαβών και στη διάγνωση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής του συστήματος προσγείωσης. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες του περιουσιακού στοιχείου συγκρίνονται με δεδομένα από το DT και πραγματοποιούνται προσομοιώσεις σχετικά, για παράδειγμα, με την κανονική φθορά και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Σε περίπτωση που τα δύο σύνολα δεδομένων δεν ταιριάζουν, εκτελούνται βήματα και το περιουσιακό στοιχείο τίθεται σε κατάσταση συντήρησης, (Ibrion κ.ά., 2019).

Η Airbus (Airbus, 2025), χρησιμοποιεί την τεχνολογία DT σε 3 βασικά στάδια του κύκλου ζωής των αεροσκαφών της:

1. Σχεδιασμός: Χρησιμοποιεί 3D μοντέλα και προσομοιώσεις πριν την κατασκευή των φυσικών πρωτοτύπων.
2. Παραγωγή: Προσομοιώνει τις γραμμές παραγωγής και βελτιώνει τις βιομηχανικές διαδικασίες.
3. Λειτουργία: Στην φάση αυτή μέσω της πλατφόρμας Skywise δεδομένα από αισθητήρες τροφοδοτούν συνεχώς το ψηφιακό τους αντίγραφο, επιτρέποντας την πρόβλεψη της φθοράς την μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και την παράταση της διάρκειας ζωής των εξαρτημάτων.

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας του DT, επιτρέπει σε οργανισμούς όπως η SpaceX να καινοτομούν συνεχώς και να ανεβάζουν τον πήχη του ανταγωνισμού στον κλάδο. Χρησιμοποιώντας μεθόδους που αξιοποιούν το DT, η SpaceX είναι σε θέση να σχεδιάσει και να δοκιμάσει και να επιλύσει προβλήματα ικανοποιώντας τις προδιαγραφές απόδοσης, πριν από την κατασκευή των προϊόντων. Αυτό οδηγεί στην υλοποίηση πυραύλων με το μισό κόστος. Τα DT επιτρέπουν στους χειριστές του κέντρου ελέγχου αποστολών να διαθέτει έναν ψηφιακό κλώνο του οχήματος Dragon της SpaceX, για την παρακολούθηση της κατάστασής του (τροχιά, φορτία, συστήματα προώθησης κ.λπ.) με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από τους εκατοντάδες



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

αισθητήρες του διαστημικού οχήματος. Οι πληροφορίες αυτές βελτιώνουν τελικά την αξιοπιστία και την ασφάλεια του SpaceX Dragon και άλλων οχημάτων, (Boger, 2017; Carlos, 2021).

### 2.3.2 ΜΕΤΑΠΟΙΗΤΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η μεταποίηση είναι ο 2<sup>ος</sup> βασικότερος τομέας μετά την αεροδιαστημική όπου η έννοια των DT πήρε σάρκα και οστά και ευδοκίμησε. Οι πρόσφατες τεχνολογικές ανακαλύψεις έχουν βοηθήσει στην ανάπτυξη των DT στη μεταποίηση. Τα εργοστάσια δήλωσαν ότι χρησιμοποιούν την τεχνολογία για να προσομοιώνουν τις διαδικασίες τους, (Shao and Helu, 2020). Το DT στη μεταποίηση αποτελείται από πολλές εφαρμογές που βασίζονται στα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού, της κατασκευής, της εφοδιαστικής, της συντήρησης και της απόσυρσης.

Σύμφωνα με τους Tao κ.ά. (2018a), το DT μπορεί να βοηθήσει τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων στην πρόβλεψη επικείμενης βλάβης του εξοπλισμού, στην ειδοποίηση των χειριστών όταν ένα περιουσιακό στοιχείο αρχίζει να εμφανίζει δείκτες μη βέλτιστης απόδοσης και στη βελτίωση της εμπειρίας του πελάτη.

Οι Barricelli κ.ά. (2019), επισημαίνουν πως με τη χρήση της τεχνολογίας DT, οι κατασκευαστές μπορούν να ελέγχουν σε πραγματικό χρόνο και αμφίδρομα μεταξύ των φυσικών αντικειμένων και των ψηφιακών αναπαραστάσεών τους, οδηγώντας σε μια έξυπνη, προγνωστική, κανονιστική προσέγγιση που περιλαμβάνει στοχευμένα μέτρα βελτιστοποίησης, παρακολούθησης και αυτοθεραπείας.

Οι Tao και Zhang, 2017, οραματίστηκαν πώς τα DT θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν την ευφυή κατασκευή αναπτύσσοντας μια νέα έννοια του DT του χώρου παραγωγής (DTS). Έτσι μέσω διαδικασιών σύγκλισης μεταξύ φυσικού και εικονικού χώρου είναι δυνατόν να υλοποιηθεί μια σειρά έξυπνων λειτουργιών στη διαδικασία κατασκευής, όπως η έξυπνη διασύνδεση, η έξυπνη αλληλεπίδραση, ο έξυπνος έλεγχος και η διαχείριση κ.λπ.

Η General Electric (GE) είναι αναμφίβολα ο ηγέτης του κλάδου στην υιοθέτηση και προώθηση της έννοιας της DT. Έχει αναπτύξει DT προσδίδοντας επιχειρηματική αξία στις υπηρεσίες που προσφέρει στους πελάτες της εστιάζοντας στους τομείς:



περιουσιακά στοιχεία, δίκτυο και διαδικασίες. Το DT συλλέγει δεδομένα από τα περιβάλλοντα παραγωγής, συντήρησης, λειτουργίας και εκμετάλλευσης και χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα για να αναπτύξει ένα μοναδικό μοντέλο κάθε μεμονωμένου περιουσιακού στοιχείου, συστήματος ή διαδικασίας, με έμφαση σε σημαντικά χαρακτηριστικά όπως η διάρκεια ζωής, η αποδοτικότητα και η προσαρμοστικότητα.

Το λογισμικό DT, χρησιμοποιεί την ML και προηγμένη ανάλυση για την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο τεράστιων ποσοτήτων βιομηχανικών δεδομένων, από συστήματα HMI/SCADA, χρονοσειρές, συναγερούς, συμβάντα και μετρήσεις θερμοκρασίας περιβάλλοντος.

Η ισχυρή ανάλυση σε πραγματικό χρόνο των συλλεχθέντων δεδομένων, έχει ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό τυχόν ανωμαλιών/αποκλίσεων, ενώ η εφαρμογή αλγορίθμων ML βοηθά στην πραγματοποίηση ακριβών προβλέψεων για μακροπρόθεσμο σχεδιασμό.

Η GE έχει επίσης αναπτύξει DT επιχειρησιακής κλίμακας που προσομοιώνουν αλληλεπιδράσεις πολύπλοκων συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Αυτά τα DT προσομοιώνουν πολλαπλά μελλοντικά σενάρια «τι θα γίνει αν» και καθορίζουν τους βέλτιστους βασικούς δείκτες απόδοσης για γεγονότα με τη μεγαλύτερη πιθανότητα που επηρεάζουν την επιχείρηση, (GE Vernova, 2025).

### 2.3.3 ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Η ψηφιοποίηση για τον τομέα αποτελεί καταλύτη, αρχιτέκτονα και παράγοντα ενεργοποίησης για τις επιχειρήσεις αυτοκινητοβιομηχανίας και κινητικότητας. Σύμφωνα με τον Augustine (2020), ο ρόλος και η σημασία του DT στην εξέλιξη του υλικού, την κατασκευή και τον κύκλο ζωής της αξίας ενός οχήματος είναι τεράστιες. Ο απώτερος στόχος όλων των εταιρειών είναι να αξιοποιήσουν τα υπάρχοντα δεδομένα για την ανάπτυξη ταχύτερων, πιο οικονομικά αποδοτικών και υψηλής ποιότητας αγαθών.

Μια επιχείρηση που χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό την τεχνολογία DT για τη βελτίωση των υπηρεσιών και της αξιοπιστίας για τους ιδιοκτήτες αυτοκινήτων είναι η



Tesla Motors. Για κάθε όχημα που πωλείται από την Tesla έχει κατασκευαστεί και ένα ψηφιακό δίδυμο.

Αισθητήρες από χιλιάδες αυτοκίνητα μεταδίδουν συνεχώς δεδομένα στην προσομοίωση κάθε αυτοκινήτου στο εργοστάσιο, όπου η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) αξιολογεί τα δεδομένα για να καθορίσει αν ένα αυτοκίνητο λειτουργεί όπως προβλέπεται ή αν χρειάζεται συντήρηση. Οι ενσωματώσεις λογισμικού της Tesla είναι τόσο ολοκληρωμένες που πολλά προβλήματα συντήρησης μπορούν να επιλυθούν με ενημερώσεις λογισμικού. Συνδυάζοντας την τεχνητή νοημοσύνη και το IoT, η Tesla μπορεί να μαθαίνει συνεχώς από τον πραγματικό κόσμο και να βελτιστοποιεί κάθε ένα από τα οχήματά της σε πραγματικό χρόνο.

Η αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων και η αισθητά βελτιωμένη εμπειρία χρήσης για τον ιδιοκτήτη του αυτοκινήτου καθίστανται δυνατές με αυτή τη μέθοδο ανάπτυξης λογισμικού με βάση τα δεδομένα, (SAS, n.d.).

Η Bridgestone, ο κορυφαίος κατασκευαστής ελαστικών και καουτσούκ στον κόσμο, χρησιμοποιεί τα DT για να καθορίσει πώς στοιχεία όπως η ταχύτητα, οι οδικές συνθήκες, το στυλ οδήγησης και άλλες μεταβλητές επηρεάζουν την απόδοση και τη διάρκεια ζωής των προϊόντων της. Οπλισμένη με αυτές τις γνώσεις, η εταιρεία βοηθά τους στόλους στην επιλογή των καλύτερων εναλλακτικών λύσεων για τις μοναδικές απαιτήσεις τους και παρέχει καθοδήγηση για το πώς να αποτρέψουν τη θραύση των τροχών και να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, ο ηγέτης της αγοράς χρησιμοποιεί ψηφιακά δίδυμα για να σχεδιάζει και να δοκιμάζει νέους τύπους ελαστικών. Η Bridgestone εκτιμά ότι η μέθοδος αυτή μειώνει τον χρόνο ανάπτυξης κατά 50%, (AltexSoft, 2025).

Τα DT χρησιμοποιούνται και από εταιρείες που συμμετέχουν στην Formula 1 (F1) όπως είναι η Mercedes-AMG Petronas Motorsport, η οποία έχει αναπτύξει ένα DT για να προσομοιώνει την απόδοση του αγωνιστικού της μονοθέσιου κάτω από μια σειρά σεναρίων, μελετώντας τα πάντα, από τις καιρικές συνθήκες μέχρι τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε πίστας F1, (Persson, 2020). Από τη δημιουργία προσομοιώσεων οδηγού, μέχρι την ανάπτυξη εξαρτημάτων, ακόμη και μέχρι τον εργοστασιακό σχεδιασμό, η McLaren έχει ενσωματώσει DT για να μεγιστοποιήσει την απόδοση σε αυτές τις διαδικασίες. (Kwan, 2022).



Ένα ακόμη πεδίο στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας όπου τα DT βρίσκουν εφαρμογή είναι των αυτόνομων οχημάτων. Σύμφωνα με τους Ibrahim κ.ά. (2022), είναι σαφές ότι τα DT προσφέρουν προηγμένες λύσεις για τη δημιουργία συστημάτων κίνησης αυτόνομων ηλεκτρικών οχημάτων, λόγω της ικανότητάς τους να ανταλλάσσουν γρήγορα μεγάλες ποσότητες δεδομένων με το πραγματικό μοντέλο και να αντιπροσωπεύουν στοιχεία του συστήματος, περιουσιακά στοιχεία ή ολόκληρο το σύστημα. Τα DT μπορούν επίσης να εξυπηρετήσουν μια ποικιλία εφαρμογών, όπως η πρόγνωση και η προληπτική συντήρηση, η ανίχνευση σφαλμάτων, η παρακολούθηση της υγείας, η πρόβλεψη διάρκειας ζωής και η βελτιστοποίηση.

Από το σχεδιασμό έως τη διάθεση, όλες οι χρήσεις του DT που αναφέρονται για τη μεταποίηση μπορούν να εφαρμοστούν και σε αυτόν τον τομέα. Παρέχοντας μια πιο ελκυστική και καθηλωτική εμπειρία στον πελάτη, το DT στην αυτοκινητοβιομηχανία μπορεί να είναι επωφελές τόσο για τους κατασκευαστές όσο και για τις αντιπροσωπείες αυτοκινήτων στα στάδια της κατασκευής και πώλησης αντίστοιχα.

Επιπλέον, μπορεί επίσης να επιτρέψει στους πελάτες να προσαρμόσουν τα οχήματά τους σύμφωνα με τις προτιμήσεις τους. Τα DT παρέχουν αξία σε κάθε χρήστη, ανεξάρτητα από το αν είναι ερασιτέχνες ή επαγγελματίες οδηγοί.

#### 2.3.4 ΥΓΕΙΑ

Το DT μας παρέχει έναν τρόπο να σκεφτούμε πώς αυτές οι νέες πρακτικές μηχανικής επηρεάζουν και μπορούν να εφαρμοστούν οι βασικές ιδέες στις τρέχουσες συζητήσεις περί υγειονομικής περίθαλψης, όπως η υγεία, οι ασθένειες, η προληπτική φροντίδα και η βελτίωση.

Σύμφωνα με άρθρο του VentureBeat, αν και τα DT βρίσκονται ακόμη σε νηπιακό στάδιο, ο τομέας αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς λόγω των εξελίξεων στην εισαγωγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τη μηχανική μάθηση και τις τεχνολογίες AR/VR. Ως αποτέλεσμα, τα DT θα μπορούσαν να αλλάξουν σημαντικά τον τρόπο διάγνωσης και θεραπείας των ασθενών και να βοηθήσουν στον αναπροσανατολισμό των κινήτρων για τη βελτίωση της υγείας. Ένα DT στην υγειονομική περίθαλψη χρησιμοποιείται για την καταγραφή και την οπτικοποίηση ενός νοσοκομειακού συστήματος, προκειμένου να



παρέχεται ένα ασφαλές περιβάλλον και να δοκιμάζονται οι επιπτώσεις πιθανών τροποποιήσεων της απόδοσης του συστήματος, (Lawton, 2021).

Η GE (General Electric), χρησιμοποιεί DT για την δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης με σκοπό την ψηφιακή αναπαράσταση της λειτουργίας ενός νοσοκομείου, ενσωματώνοντας δεδομένα ασθενών, προσωπικού και πόρων. Μέσω της τεχνολογίας μπορούν να δοκιμάζουν εικονικά σενάρια λειτουργίας , όπως την βελτιστοποίηση της χωρητικότητας των κλινών, τον σχεδιασμό νέων εγκαταστάσεων, βελτίωση ροών εργασίας, πριν προχωρήσουν σε αλλαγές. Αυτή η προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή των δαπανηρών και μεγάλης διάρκειας πιλοτικών εφαρμογών, συμβάλλοντας στην λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων που βελτιώνουν την επιχειρησιακή απόδοση και την εμπειρία των ασθενών, (GE HealthCare, n.d.).

Σύμφωνα με τους Semeraro κ.ά. (2021), το αποτέλεσμα διαφόρων θεραπειών μπορεί να προβλεφθεί με τη χρήση ενός DT, αλλά και να καθορίσει τη βέλτιστη επιλογή θεραπείας για έναν συγκεκριμένο ασθενή. Στην υγειονομική περίθαλψη, ένα DT που περιέχει τα δεδομένα ενός ατόμου, σε συνδυασμό με αλγορίθμους AI, μπορεί να δώσει λύσεις σε κλινικές δυσκολίες.

Αρκετές εταιρείες (Philips, Siemens, Dassault Systèmes και η ευρωπαϊκή startup FEops) έχουν αναπτύξει εικονικές καρδιές που μπορούν να εξατομικεύονται για μεμονωμένους ασθενείς και να ενημερώνονται προκειμένου να κατανοηθεί η εξέλιξη των ασθενειών ή η αντίδραση σε νέα φάρμακα, θεραπείες ή χειρουργικές επεμβάσεις, (Lawton, 2021).

Σύμφωνα με τους Bruynseels κ.ά. (2018), μελλοντικά τα μοντέλα «εικονικού εαυτού» θα παρέχουν έναν λεπτομερή χάρτη που θα επιτρέπει τον εντοπισμό των αποκλίσεων από το φυσιολογικό με μεγαλύτερη ακρίβεια. Η προσέγγιση του DT θα βασίζεται κυρίως σε μια ακριβή εικόνα της υγιούς κατάστασης ενός ατόμου και όχι απλώς σε μια καταγραφή των καταστάσεων ασθενειών. Αυτή η φυσιολογική ή υγιής κατάσταση μπορεί να περιγράφει σε υψηλή ανάλυση και σε διάφορες διαστάσεις δεδομένων, χρησιμοποιώντας στοιχεία όπως μοριακά, φαινοτυπικά και συμπεριφορικά καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής ενός ατόμου. Οι έννοιες της θεραπείας, της προληπτικής φροντίδας και της βελτίωσης παρουσιάζουν εντυπωσιακή ομοιότητα με τις έννοιες της μηχανικής,



και έτσι παρέχουν μια χρήσιμη προοπτική για το πώς τα DT θα συμβάλλουν στο μέγιστο στην υγειονομική περίθαλψη.

Ο Shengli (2021), προβάλλει το εννοιολογικό μοντέλο του ανθρώπινου ψηφιακού δίδυμου (Human Digital Twin – HDT), με σκοπό την διαχείριση της υγείας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του ανθρώπου. Σκοπός του είναι να αναπαραχθεί ένα πιστό αντίγραφο ανθρώπου στον κυβερνοχώρο όπου με την υποστήριξη των τεχνολογιών Internet, 4G, 5G, WIFI κ.λπ., έξυπνοι φορητοί αισθητήρες, κινητά τηλέφωνα, και ιατρικά αρχεία από νοσοκομεία ή άλλα ιδρύματα που συλλέγουν και στέλνουν συνεχώς πληροφορίες ενημερώνοντας το περιεχόμενο του ψηφιακού αντίγραφου.

Ωστόσο, τονίζει την δυσκολία του εγχειρήματος καθώς ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα με το HDT είναι ότι, παρόλο που ορισμένες μεταβλητές μπορούν να παρακολουθούνται για να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με ορισμένες απειλές, άλλα ανθρώπινα χαρακτηριστικά, όπως η σκέψη, οι αντιδράσεις και η συμπεριφορά, μπορεί να είναι κάπως απρόβλεπτα, επειδή οι άνθρωποι είναι πιο περίπλοκοι από τα συστήματα παραγωγής. Ένας ακόμη προβληματισμός έγκειται στο γεγονός ότι, αν οι άνθρωποι θεωρούνται ως μοντέλα, δεν θα πρέπει να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η γενετική, η κληρονομικότητα, ακόμη και η κουλτούρα μπορεί να παίζουν ρόλο στον καθορισμό των διαφορών σε συγκεκριμένα ανθρώπινα χαρακτηριστικά. Εντούτοις, το μεγαλύτερο εμπόδιο μπορεί να είναι οι δυσκολίες της κοινωνικής ηθικής και οι ανησυχίες των ανθρώπων για την ασφάλειά τους.

### 2.3.5 ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ένας άλλος τομέας που εφαρμόζεται η τεχνολογία των DT είναι ο κλάδος της παραγωγής ενέργειας, είτε πρόκειται από ορυκτά καύσιμα όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια, αλλά είτε πρόκειται για εκμετάλλευση της πυρηνικής ενέργειας. Ο τομέας αυτός περιλαμβάνει μεγάλα και πολύπλοκα περιουσιακά στοιχεία, συχνά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν στην εξερεύνηση και την υιοθέτηση των DT ως τρόπο για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας, μαζί με την ανάγκη της διατήρησης του κόστους λειτουργίας υπό έλεγχο.



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Από τα αιολικά πάρκα έως τις εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας, η τεχνολογία DT χρησιμοποιείται στον τομέα της ενέργειας. Η GE (General Electric) ανέπτυξε με επιτυχία το DT για ένα αιολικό πάρκο. Συλλέγοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, όπως αναφορές καιρού, υπηρεσιών και επιδόσεων, μεταξύ άλλων, το DT μιας ανεμογεννήτριας ενισχύει την ενεργειακή της απόδοση, βελτιστοποιεί τις τεχνικές συντήρησης και βελτιώνει την αξιοπιστία της, (Singh κ.ά., 2022).

Ομοίως, ο DNV αξιοποιεί τα DT στον τομέα της αιολικής ενέργειας για την παρακολούθηση και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους. Το ψηφιακό μοντέλο δέχεται συνεχώς δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες και συστήματα SCADA, επιτρέποντας την προγνωστική συντήρηση, την έγκαιρη ανίχνευση βλαβών και την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Το εργαλείο DT για ανεμογεννήτριες (WindGEMINI) αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα. Μέσω της συνεχούς σύγκρισης μεταξύ της πραγματικής και της αναμενόμενης απόδοσης της της ανεμογεννήτριας εντοπίζονται οι αποκλίσεις στην λειτουργία και λαμβάνονται καλύτερες αποφάσεις από τους ενδιαφερόμενους για την λειτουργία και την συντήρηση. Τα οφέλη που προκύπτουν είναι η μείωση του λειτουργικού κόστους η αύξηση της διαθεσιμότητας των ανεμογεννητριών και η συνολική βελτιστοποίηση των αιολικών πάρκων, (DNV, 2017; DNV, 2020).

Η Βόρεια Θάλασσα αναδεικνύεται σε πεδίο δοκιμών για τα DT. Εκεί, οι φορείς εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων (Aker BP, Total, Shell) έχουν αναπτύξει ο καθένας DT που αναμένουν να αποδώσουν μεγάλα μερίσματα. Τα μέχρι στιγμής αποτελέσματα, σύμφωνα με πρόσφατα έγγραφα και παρουσιάσεις από τις εταιρείες αυτές και τους συνεργάτες τους, περιλαμβάνουν λιγότερα εμπόδια στη θέση σε λειτουργία, βελτιωμένες δομικές προσομοιώσεις και καλύτερα ενσωματωμένα συστήματα, προωθώντας την κίνηση της βιομηχανίας προς τις ελάχιστες επανδρωμένες πλατφόρμες, (JPT staff, 2019).

Οι γαλλικοί οργανισμοί της πυρηνικής βιομηχανίας συμμετέχουν σε μια πολυετή πρωτοβουλία ανάπτυξης DT για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες της χώρας. Τα DT προορίζονται να λειτουργήσουν ως προσομοιωτές για την εκπαίδευση της επόμενης γενιάς χειριστών και ως περιβάλλοντα προσομοίωσης για τη μηχανική έρευνα και



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

ανάπτυξη. Αναμένεται ότι θα καλύψουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής του σταθμού, από τον σχεδιασμό, τη λειτουργία, τη συντήρηση έως και τον παροπλισμό, (Murray, 2020).

### 2.3.6 ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

Πολλές κυβερνήσεις αναπτύσσουν την έννοια των "έξυπνων πόλεων" για την παροχή ολόκληρων υπηρεσιών στον πληθυσμό χωρίς καθυστέρηση ή διακοπή, με την συνδρομή της ML και της AI για την κατασκευή τους. Τα DT μπορούν να αξιοποιηθούν για την αποτελεσματική διαχείριση λειτουργικών τομέων όπως η συντήρηση, η κατανάλωση ενέργειας, η χρήση χώρου, η διαχείριση της κυκλοφορίας και η δημόσια ασφάλεια σε κάθε πόλη, (Augustine, 2020).

Το Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών της Σιγκαπούρης (National Research Foundation – NRF), δημιούργησε μια «Εικονική Σιγκαπούρη» το 2018 συγχωνεύοντας τρισδιάστατους χάρτες, μοντέλα πόλης και μια πλατφόρμα δεδομένων με ακριβή χαρακτηριστικά όπως υφή, δομικά υλικά, γεωμετρία και στοιχεία εγκαταστάσεων κ.λπ. Το NRF πιστεύει ότι η «Εικονική Σιγκαπούρη» θα είναι επωφελής όχι μόνο για την κυβέρνηση, αλλά και για τους πολίτες, τους ιδιοκτήτες επιχειρήσεων και άλλες ερευνητικές κοινότητες, καθώς θα χρησιμεύσει ως πεδίο δοκιμής νέων ιδεών και θα δώσει πληροφορίες που θα βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων, στον προγραμματισμό πόρων και στη διαχείριση. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και τη βελτίωση της προσβασιμότητας μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας, (Singh et al., 2022).

Το Αμαραβάτι της Ινδίας είναι μια ακόμη προσθήκη σε αυτόν τον κατάλογο. Σύμφωνα με την Cityzenith, την εταιρεία που είναι υπεύθυνη για την ανάπτυξη του DT της πόλης, το Αμαραβάτι θα είναι μία από τις τρεις κορυφαίες ψηφιακά εξελιγμένες πόλεις στον κόσμο μόλις ολοκληρωθεί. Η ύπαρξη πόλεων σε ψηφιακές πλατφόρμες θα επιτρέψει στους ενδιαφερόμενους φορείς τους να παρακολουθούν την πρόοδο της κατασκευής σε πραγματικό χρόνο, καθώς και την οικολογία και τη συνολική υγεία της πόλης, την κινητικότητα και την κυκλοφορία, το μικροκλίμα και την κλιματική αλλαγή κ.λπ. Επιπλέον, θα λειτουργήσει ως αγωγός για όλες τις κυβερνητικές πληροφορίες, ειδοποιήσεις, έντυπα και εφαρμογές προς όλους τους πολίτες, (Augustine, 2020).



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Οι μεταπτυχιακοί φοιτητές από το πανεπιστήμιο Newcastle του Ηνωμένου Βασιλείου, σε συνεργασία με την εταιρεία ύδρευσης Northumbrian Water, δημιούργησαν ένα DT της πόλης για να το βοηθήσουν να ανταποκρίνεται πιο αποτελεσματικά σε περιστατικά και καταστροφές. Η εικονική αναπαράσταση δίνει τη δυνατότητα στην εταιρεία να εκτελέσει προσομοιώσεις γεγονότων που δημιουργούνται από υπολογιστή, όπως διάρρηξη σωλήνων, έντονες βροχοπτώσεις και σοβαρές πλημμύρες, προκειμένου να αποδείξει μέσα σε λίγα λεπτά τις αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να έχουν αυτά τα γεγονότα στα σπίτια και τις κοινότητες των ανθρώπων για μια περίοδο 24 ωρών. Το DT θα βοηθήσει επιπλέον την πόλη στην αξιολόγηση πιθανών μελλοντικών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, υποδεικνύοντας ποιες κατασκευές θα πλημμυριστούν, ποια θεμέλια θα κλείσουν και ποιες κλινικές ενδέχεται να επηρεαστούν σε περίπτωση απρόβλεπτων έντονων βροχοπτώσεων και καταιγίδων. Οι δημιουργοί αυτής της πρωτοβουλίας ξεκαθαρίζουν ότι, σε περίπτωση που προκύψει ένα περιστατικό, το DT της έξυπνης πόλης μπορεί να συνεργαστεί με φορείς αντιμετώπισης κρίσεων για να πραγματοποιήσει αναπαραστάσεις σε οποιαδήποτε τοποθεσία και να εντοπίσει τα προβλήματα πιο γρήγορα, (Augustine, 2020).

Το DT μπορεί να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τις πόλεις και τους χώρους διαβίωσης. Είναι χρήσιμο για την κατανομή των πόρων, τον αστικό σχεδιασμό και τη βιώσιμη ανάπτυξη. Μπορεί επίσης να παρέχει στους αστικούς σχεδιαστές, αρχιτέκτονες, μηχανικούς, κατασκευαστές, ιδιοκτήτες ακινήτων και πολίτες τη δυνατότητα να μελετούν και να αναλύουν τις υποδομές της πόλης υπό διάφορα σενάρια και να αξιολογούν τυχόν μελλοντικούς κινδύνους, βελτιώνοντας έτσι τη συνολική απόδοση των υποδομών, των διαδικασιών και των υπηρεσιών μιας πόλης, (Singh et al., 2022).

### 2.3.7 *NAYTIAIA*

Οι κύριες χρήσεις του DT σε αυτόν τον τομέα είναι η βελτίωση της αξιοπιστίας των περιουσιακών στοιχείων, η μείωση του λειτουργικού κόστους, η βελτίωση της συντήρησης και ο απομακρυσμένος έλεγχος και παρακολούθηση. Η βελτίωση της συντήρησης είναι πρωταρχικής σημασίας για την ναυτιλία καθώς τα πλοία



διακρίνονται για τη μεγάλη διάρκεια ζωής του προϊόντος τους με την φάση σε λειτουργία να περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του κύκλου ζωής του προϊόντος τους. Η ιδέα του DT προβλέπει επίσης την ελαχιστοποίηση των ζητημάτων ασφάλειας, θέμα υψίστης σημασίας για τον χώρο της ναυτιλίας γενικότερα. Με την συνεχή εξέλιξη και ωρίμανση των τεχνολογιών που προαναφέρθηκαν και με την προσπάθεια ψηφιοποίησης του κλάδου αναμένεται ότι το DT θα χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο εγγύς μέλλον, (Chen κ.ά., 2021).

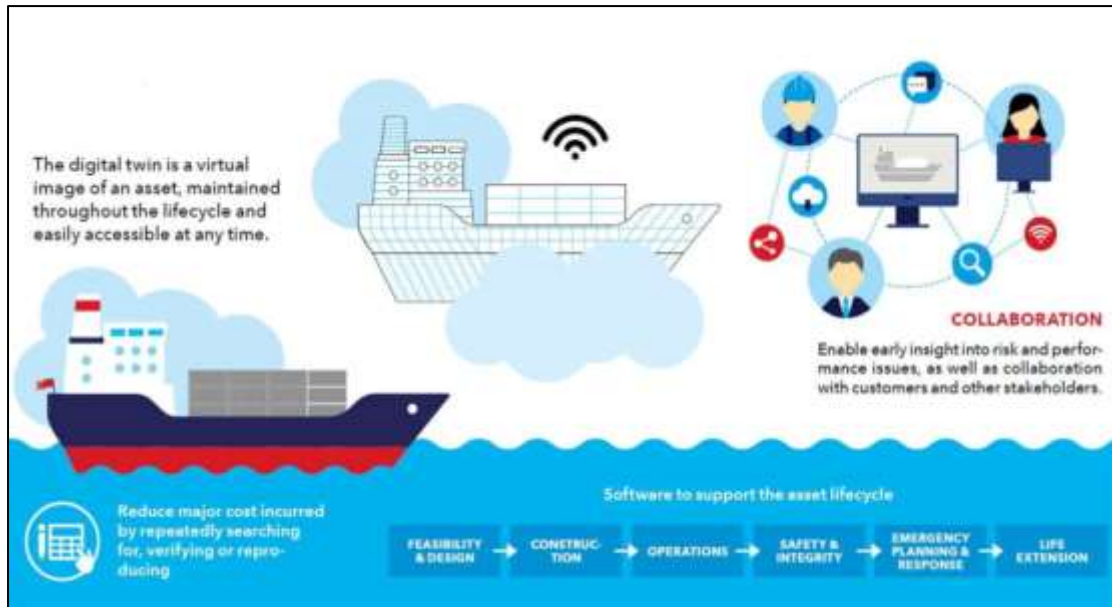
Οι Assani κ.ά. (2022), ανέπτυξαν την έννοια του SDT, το οποίο μπορεί να βελτιώσει τη συνολική στρατηγική ελέγχου και τη διαχείριση του πλοίου, προσθέτοντας αξία τόσο στην κατασκευή όσο και στη λειτουργία των πλοίων.

Ένα DT στη ναυπηγική αναφέρεται σε ένα ψηφιακό αντίγραφο ενός φυσικού πλοίου, το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της συντήρησης, της κατασκευής και της βιωσιμότητας του πλοίου. Τα ακριβή ψηφιακά αντίγραφα θα ενημερώνονται κατά τη διάρκεια της ζωής των πλοίων. Ως εκ τούτου, το DT των πραγματικών πλοίων είναι επωφελές για τον σχεδιασμό των μελλοντικών πλοίων. Χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως IoT, cloud, ML, AR και VR, μπορεί κανείς να κατασκευάσει περίπλοκες λειτουργικές προσομοιώσεις και εάν είναι απαραίτητο, να τροποποιήσει το σχεδιασμό ή τη διάταξη ενός πλοίου με βάση τα δεδομένα που αποκτώνται καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του πλοίου.

Σύμφωνα με τους Ibrion κ.ά. (2019), τα DT μπορούν να προωθούν την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών, όπως ιδιοκτήτες, κατασκευαστές, φορείς εκμετάλλευσης, πάροχοι υπηρεσιών, ολοκληρωτές συστημάτων, κυβερνητικές υπηρεσίες και άλλους προμηθευτές, αποτρέποντας δαπανηρά λάθη και εκ νέου επεξεργασία (Σχήμα 2.3). Η κοινή κατανόηση και η ανταλλαγή πληροφοριών μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους, συμπεριλαμβανομένης μιας πλατφόρμας που βασίζεται στο νέφος και παρέχει πρόσβαση σε επιχειρησιακά δεδομένα, δεδομένα από περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως ο καιρός και τα κύματα ρεύματος, δεδομένα αισθητήρων, ανάλυση και αναλυτικά μοντέλα προσομοίωσης και προσομοίωσης στο πεδίο του χρόνου.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”



**Σχήμα 2.3:** Το ψηφιακό δίδυμο ως εργαλείο για την υποστήριξη των πλοίων σε όλο τον κύκλο ζωής, (Ludvigsen and Smogeli, 2018)

Η ναυπηγική και αμυντική εταιρεία Navantia, αξιοποιεί την τεχνολογία DT αναπτύσσοντας εικονικά αντίγραφα των πλοίων, για την βελτιστοποίηση της απόδοσης, της συντήρησης και της επιχειρησιακή λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Μέσω τεχνολογιών όπως AI, προηγμένων αναλυτικών εργαλείων και τεχνολογιών VR, AR το DT συλλέγει και επεξεργάζεται τα δεδομένα παρέχοντας στους χειριστές προηγμένες διαγνωστικές πληροφορίες, όπως πρόβλεψη ζημιών, ανάλυση ενεργειακής απόδοσης ή υπολογισμό βέλτιστων διαδρομών. Το DT μέσω της προσομοίωσης και της πρόβλεψης, προσφέρει μια ολοκληρωμένη και προηγμένη διαχείριση των λειτουργιών του πλοίου, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και την σωστή χρήση των πόρων του πλοίου, (Navantia, n.d.).

Η Military Sealift Command, ο μεγαλύτερος πάροχος στρατιωτικών μεταφορικών πλοίων για το Πολεμικό Ναυτικό και το Υπουργείο Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών, με την συνεργασία της GE κατασκευάζει ένα DT για τα πολεμικά πλοία φορτίου πυρομαχικών. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τον κρίσιμο ναυτιλιακό εξοπλισμό, όπως οι μονάδες μεταβλητής συχνότητας, οι κινητήρες πρόωσης, οι κινητήρες ντίζελ και οι γεννήτριες, χρησιμοποιούνται για τη σύγκριση της απόδοσης του πλοίου σε πραγματικό χρόνο με την υπολογισμένη. Οποιοσδήποτε αποκλίσεις απόδοσης



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

αναφέρονται και επιλύονται πριν εμφανιστούν, βελτιώνοντας έτσι τη διαθεσιμότητα, την αποτελεσματικότητα, τις λειτουργίες και την ετοιμότητα των περιουσιακών στοιχείων και των αποστολών τους. Επιπλέον, το DT επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση και διάγνωση, (GE Aviation, 2018).

Ο νηογνώμονας DNV, έχει αναπτύξει DT βασισμένο στο cloud με σκοπό την διαχείριση περιουσιακών στοιχείων αξιοποιώντας τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτά σε συνδυασμό με προηγμένα αναλυτικά εργαλεία και ML. Επιχειρούν με το DT να αναπτύξουν μια πλατφόρμα πλήρως λειτουργική, απρόσκοπτη που θα παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, για τη συνεργασία μεταξύ του DNV, των πελατών τους και άλλων ενδιαφερομένων μερών. Οι υπηρεσίες και τα αποτελέσματα θα παρέχονται ψηφιακά, προσβάσιμα στον πελάτη μέσω του DT προς περαιτέρω αξιοποίηση, ανάλυση και λήψη αποφάσεων, (DNV, n.d.).

Ο Πίνακας 2.2 παρέχει μια επισκόπηση των κύριων παρόχων εφαρμογών DT για τη ναυτιλιακή βιομηχανία σύμφωνα με την έρευνα των Mauro and Kana, (2023).

Η έννοια του ψηφιακού διδύμου μπορεί να θεωρηθεί ως καταλύτης για μια πιο ολιστική προσέγγιση για την παραγωγή αξίας για όλους τους ενδιαφερόμενους του κλάδου, συμπεριλαμβανομένων των πλοιοκτητών, των κατασκευαστών εξοπλισμού, των αρχών, των πανεπιστημίων, των ναυτικών ακαδημιών και των συμβουλευτικών υπηρεσιών, (Ludvigsen and Smogeli, 2018).



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Πάροχος - Φορέας	Εφαρμογή
AVEVA	Πλατφόρμα DT για επιχειρησιακή επίγνωση και σύστημα υποστήριξης αποφάσεων επί του σκάφους, συλλογή δεδομένων για καθημερινές δραστηριότητες και διαδικασίες του πλοίου
China Classification Society (CCS)	Εφαρμογή DT για την παρακολούθηση της κατάστασης του συστήματος επί των πλοίων
Dassault Systèmes	Πλατφόρμα DT που επιτρέπει σύνδεση κλειστού βρόχου μεταξύ του εικονικού και του φυσικού περιβάλλοντος επιτρέποντας τη δοκιμή προϊόντων και διαδικασιών
Eniram-Wärtsilä	Μοντέλα DT για τη διαχείριση της ενεργειακής απόδοσης Μείωση της κατανάλωσης του κινητήρα και των εκπομπών ρύπων
Ericson	Εφαρμογή DT για χειρισμό φορτίου σε διάφορους τύπους πλοίων
Kongsberg	Περιβάλλον DT για την παρακολούθηση και προσομοίωση του πλοίου σε λειτουργία
Navantia	Μοντέλα DT για τον εντοπισμό πιθανών βλαβών που παρέχουν υποστήριξη αποφάσεων για προληπτική συντήρηση
Shadong Shipping Corporation (SDSC)	Μοντέλα DT για την επαλήθευση των δομών του πλοίου
Sertica (RINA)	Μοντέλα DT για τον εντοπισμό πιθανών αστοχιών που παρέχουν υποστήριξη αποφάσεων για προληπτική συντήρηση
Siemens	Μοντέλα DT για την παρακολούθηση των κύκλων συντήρησης του πλοίου

**Πίνακας 2.2:** Κύριοι πάροχοι πλατφόρμας Digital Twin για τη ναυτιλιακή βιομηχανία (Mauro and Kana, 2023)

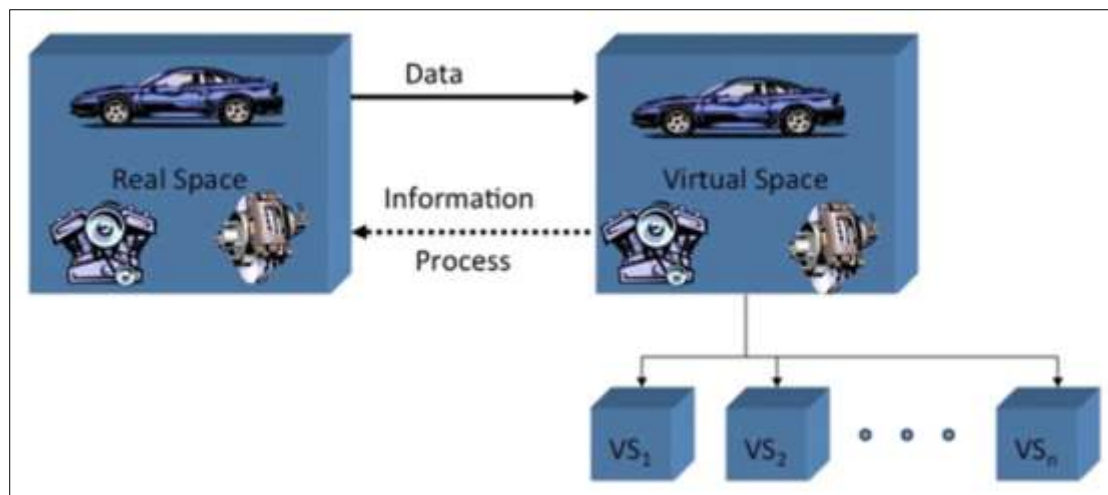
#### 2.4 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΤΟΥ DT

Η έννοια του DT ανάγεται σε μια παρουσίαση του 2002 από το Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν στη βιομηχανία για τη δημιουργία ενός κέντρου διαχείρισης του κύκλου ζωής του προϊόντος (Product Lifecycle Management – PLM). Ο τίτλος της διαφάνειας της παρουσίασης που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4, ήταν "Conceptual Ideal for PLM" και είχε όλα τα στοιχεία του DT: πραγματικό χώρο, εικονικό χώρο, σύνδεση για τη ροή δεδομένων από τον πραγματικό χώρο στον εικονικό χώρο, σύνδεση για τη ροή πληροφοριών από τον εικονικό χώρο στον πραγματικό χώρο και εικονικούς υποχώρους. Η δυνατότητα ύπαρξης πολλών εικονικών χώρων, όπως αντιπροσωπεύεται από τα μπλοκ VS1 έως VS<sub>n</sub>, σήμαινε ότι το σύστημα μπορούσε να υποβληθεί σε ποσοιτές καταστροφικές δοκιμές. Όταν τα φυσικά πρωτότυπα ήταν το κύριο μέσο



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

δοκιμής, μια καταστροφική δοκιμή θα είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή τόσο του πρωτοτύπου και ενδεχομένως του περιβάλλοντός του. Το PLM στον τίτλο σήμαινε ότι δεν επρόκειτο για μια στατική αναπαράσταση, αλλά ότι τα δύο συστήματα θα συνδέονταν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος, (Grieves and Vickers, 2017).



**Σχήμα 2.4:** Conceptual Ideal for PLM, (Grieves and Vickers, 2017)

Σύμφωνα με τον Stark (2020), το PLM είναι η επιχειρηματική δραστηριότητα της διαχείρισης των προϊόντων μιας εταιρείας με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, από την αρχική σύλληψη ενός προϊόντος έως την απόρριψη και την απόσυρσή του. Διαχειρίζεται, με ολοκληρωμένο τρόπο, όλα τα μέρη και τα προϊόντα, καθώς και το χαρτοφυλάκιο προϊόντων. Το PLM είναι η δραστηριότητα που επιτρέπει σε μια επιχείρηση να αυξήσει τα έσοδά της ενισχύοντας την καινοτομία, μειώνοντας το χρόνο διάθεσης των νέων προϊόντων στην αγορά και παρέχοντας εξαιρετική υποστήριξη και νέες υπηρεσίες για τα υπάρχοντα προϊόντα, καθώς και διευκολύνοντας την ενισχυμένη υποστήριξη των πελατών για τη χρήση του προϊόντος.

Με την ολοένα αυξανόμενη χρήση των τεχνολογιών πληροφορικής νέας γενιάς στους τομείς της βιομηχανίας και της παραγωγής τα δεδομένα που παράγονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος αξιοποιούνται σε μεγαλύτερο βαθμό από πριν.



Ωστόσο, σύμφωνα με τους Ταο κ.ά. (2018a), εξακολουθούν να υπάρχουν προβλήματα σχετικά με την αξιοποίηση των μεγάλων δεδομένων, όπως η διαχείριση δεδομένων στα φυσικά προϊόντα κι όχι στα εικονικά μοντέλα τους, αλλά και ακόμη και αν πρόκειται για δεδομένα από εικονικά μοντέλα, υπάρχει έλλειψη σύγκλισης μεταξύ του φυσικού και του εικονικού χώρου του προϊόντος με αποτέλεσμα τα δεδομένα στο PLM να είναι συνήθως απομονωμένα, κατακερματισμένα και στάσιμα. Επιπλέον, δεδομένα που επαναλαμβάνονται σε διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής του προϊόντος, τα οποία μπορεί να προκαλέσουν μεγάλη σπατάλη πόρων και πρόβλημα ανταλλαγής αυτών. Τέλος, είναι δύσκολο για μια εταιρεία να διατηρήσει τον έλεγχο όταν ένα προϊόν βρίσκεται στον τόπο του πελάτη, αλλά και να ανταποκριθεί εκ των προτέρων στην επερχόμενη ζήτηση ή αποτυχία, καθοδηγώντας το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση του προϊόντος. Τα προβλήματα αυτά, οδηγούν σε χαμηλό επίπεδο αποτελεσματικότητας, ευφυΐας και βιωσιμότητας στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τις φάσεις λειτουργίας και παροχής υπηρεσιών.

Επομένως, απαιτούνται νέοι τρόποι για τον χειρισμό των προβλημάτων που έχουν να κάνουν με την σωστή χρήση και την αποτελεσματική αξιοποίηση αυτών των δεδομένων. Σύμφωνα με τους ερευνητές και την βιομηχανία, η ιδέα και η αντίληψη του DT, μπορεί να πραγματοποιήσει σύγκλιση του φυσικού κόσμου με τον εικονικό, με αποτέλεσμα την καλύτερη εξυπηρέτηση του κύκλου ζωής του προϊόντος, ώστε ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η φάση σε λειτουργία και η εξυπηρέτηση των προϊόντων να εκτελούνται πιο έξυπνα, αποδοτικά, βιώσιμα, λαμβάνοντας τις καλύτερες δυνατές αποφάσεις και στον ελάχιστο δυνατό χρόνο απόκρισης.

Η εφαρμογή του DT θεωρείται ως μια αποτελεσματική προσέγγιση, καθώς είναι ικανό να συγκρίνει και να αναλύει άμεσα τις θεωρητικές και πραγματικές τιμές των μεγάλων δεδομένων και των δραστηριοτήτων του κύκλου ζωής του προϊόντος. Στον εικονικό χώρο του DT, πολλές διαδικασίες του κύκλου ζωής του προϊόντος μπορούν να αναπαραχθούν, να παρακολουθούνται, να βελτιστοποιούνται και να επαληθεύονται. Επιπλέον, μπορεί να επιτευχθεί συγχρονισμός του πλήρους κύκλου ζωής του προϊόντος. Έτσι, οι νησίδες πληροφοριών και η επανάληψη δεδομένων μπορούν να αποτραπούν με επιτυχία. Η εφαρμογή του λοιπόν, έχει ως αποτέλεσμα την βελτιστοποίηση των διαδικασιών του κύκλου ζωής του προϊόντος.



#### 2.4.1 ΤΟ ΔΤ ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Είναι κοινώς γνωστό ότι η διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων αναφέρεται στην πλήρη διαδικασία ενός συγκεκριμένου σχεδιασμού από την αρχή έως το τέλος, καθώς και στις διαδικασίες εργασίας για κάθε στάδιο, (Ταο κ.ά., 2018a). Οι παραδοσιακές διαδικασίες σχεδιασμού προϊόντων βασίζονται στις επαγγελματικές δεξιότητες και την εμπειρία από προηγούμενες εξελίξεις, όπου τα εικονικά και τα φυσικά προϊόντα κατασκευάζονται, αναλύονται και βελτιώνονται ανεξάρτητα το ένα από το άλλο.

Αντίθετα, ο σύγχρονος σχεδιασμός προϊόντων τείνει να τοποθετεί προοδευτικά τον πελάτη στο επίκεντρο και να ενθαρρύνει τη συμμετοχή του. Πλέον, η διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων είναι περισσότερο εικονικοποιημένη, δικτυωμένη και οπτικοποιημένη, όπως φαίνεται από την καθολική εφαρμογή ψηφιακών πακέτων σχεδιασμού (π.χ. CAD, FEA, CAE, CAM κ.λπ.), (Ταο κ.ά., 2018b).

Σύμφωνα με τους Grieves and Vickers (2017), στην φάση αυτή το φυσικό σύστημα δεν υπάρχει ακόμη και αρχίζει να παίρνει μορφή στον εικονικό χώρο ως ψηφιακό δίδυμο πρωτότυπο (DTP). Κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού της ιδέας ενός προϊόντος, μπορούν να τεθούν τα θεμέλια του ΔΤ μέσω της δημιουργίας ένας αριθμού δεδομένων και μοντέλων. Κατά τη διάρκεια όλων των επόμενων φάσεων, ο τρέχων σχεδιασμός πρέπει να επικυρώνεται σε σχέση με τις παραδοχές και τις απαιτήσεις. Ένα πιθανό μέσο για την επικύρωση είναι τα εικονικά πρωτότυπα (Virtual Prototype – VP), τα οποία αντικατοπτρίζουν την τρέχουσα κατάσταση ανάπτυξης, (Boschert and Rosen, 2016).

Σύμφωνα με τους Ταο κ.ά. (2018a), μια νέα διαδικασία σχεδιασμού προϊόντων που βασίζεται στο ΔΤ, μπορεί να χωριστεί σε εννοιολογικό σχεδιασμό, λεπτομερή σχεδιασμό και εικονική επαλήθευση (Σχήμα 2.5).

Κατά τον εννοιολογικό σχεδιασμό οι σχεδιαστές θα καθορίσουν την έννοια, την αισθητική και τις κύριες λειτουργίες του νέου προϊόντος. Επιπλέον, η επικοινωνία μεταξύ πελατών και σχεδιαστών μπορεί να καταστεί πιο διαφανή και ταχύτερη με τη χρήση των δεδομένων μετάδοσης στο cloud σε πραγματικό χρόνο και ανάλυσή τους με τη χρήση τεχνικής ανάλυσης μεγάλων δεδομένων. Σε αυτήν τη φάση, η οπτικοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να έχουμε μια πρώτη ματιά για το πώς θα είναι το εννοιολογικό σχέδιο του προϊόντος αλλά και να παράσχει μια προκαταρκτική ανάλυση κατά τη διάρκεια της επιχειρηματολογίας των πωλήσεων.



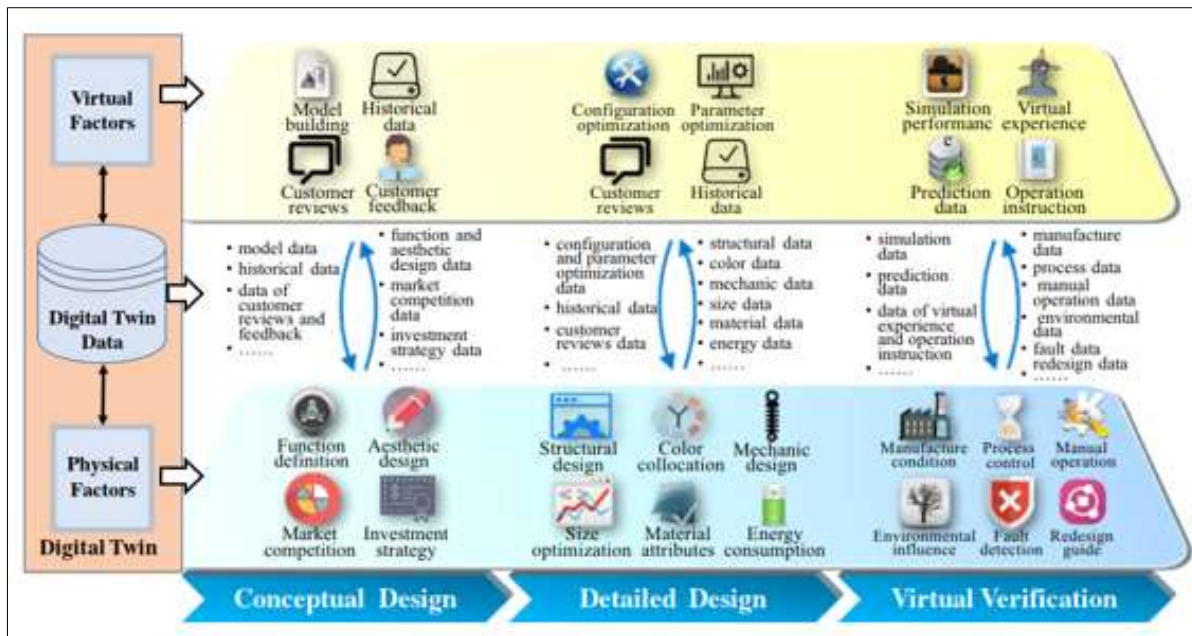
Κατά τον λεπτομερή σχεδιασμό, η χρήση του DT επιτρέπει επαναλαμβανόμενες δοκιμές προσομοίωσης για να διασφαλιστεί ότι το πρωτότυπο του προϊόντος μπορεί να επιτύχει την επιθυμητή απόδοση. Η τεχνικές VP (π.χ. CAD, CAE) εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ακριβής οπτικοποίηση του τελικού προϊόντος.

Κατά την εικονική επαλήθευση η ποιότητα, η απόδοση και γενικά η ορθότητα σχεδιασμού οποιωνδήποτε εξαρτημάτων ή και συστημάτων, θα προβλέπεται πριν από την πραγματική παραγωγή τους μέσω της προσομοίωσης απευθείας στο μοντέλο DT.

Μεταβάλλοντας τις παραμέτρους προσομοίωσης σε όλο το πιθανό εύρος τους, μπορούμε να εξετάσουμε τη μη γραμμική συμπεριφορά που μπορεί να περιλαμβάνει συνδυασμούς ή ασυνέχειες που οδηγούν σε καταστροφικά ζητήματα. Αν έχουμε αναπαραστήσει και προσομοιώσει με ακρίβεια τον πραγματικό κόσμο στον εικονικό χώρο σε μια ποικιλία πιθανοτήτων, ο αριθμός των απρόβλεπτων ανεπιθύμητων παραγόντων θα πρέπει να έχει μειωθεί δραστικά.

Κατά τη φάση αυτή, μπορούμε να επιδιώξουμε να περιορίσουμε ή να εξαλείψουμε την πηγή των μη αναμενόμενων ανεπιθύμητων παραγόντων - εκείνων που προκύπτουν από την ανθρώπινη εμπλοκή, (Grieves and Vickers, 2017).

Η προσομοίωση αποτελεί τη βάση για αποφάσεις σχεδιασμού, επικύρωσης και δοκιμής όχι μόνο για εξαρτήματα αλλά και για πλήρη συστήματα σε όλους σχεδόν τους τομείς εφαρμογών. Το DT είναι το επόμενο κύμα στην τεχνολογία προσομοίωσης. Συνεπώς, η υλοποίηση ενός DT περιλαμβάνει απλοποιημένες διαδικασίες μοντελοποίησης, εύκολη χρήση της προσομοίωσης, ροές εργασίας προσομοίωσης και απρόσκοπτα σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής, (Boschert and Rosen, 2016).



Σχήμα 2.5: Σχεδιασμός προϊόντος με βάση το DT (Ταο κ.ά., 2018a)

#### 2.4.2 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ – ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η κατασκευή ενός προϊόντος περιλαμβάνει ολόκληρη τη διαδικασία παραγωγής, ξεκινώντας από την προμήθεια των πρώτων υλών και καταλήγοντας στη διανομή των τελικών προϊόντων στους πελάτες. Για την πραγματοποίηση της παραγωγής προϊόντων, η “αίθουσα” παραγωγής είναι το εργοστάσιο που είναι και ο βασικός εκτελεστής, ο οποίος παρέχει τους πόρους και τους οργανώνει με τρόπο ώστε να αποδώσει εντός του χρονοδιαγράμματος το τελικό προϊόν.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, περιλαμβάνονται κυρίως τρεις πτυχές και συγκεκριμένα:

- Διαχείριση των πόρων, όπως υλικά, εξοπλισμός, εργαλεία, χειριστές κ.λπ. που πρέπει να προετοιμάζονται και να ανατίθενται με βάση το επιθυμητό προϊόν.
- Σχέδιο παραγωγής για τον προκαθορισμό της διαδικασίας παραγωγής, συμπεριλαμβανομένης της κατεργασίας, της συναρμολόγησης, της εφοδιαστικής κ.λπ. προκειμένου να επιτευχθούν στόχοι όπως η μείωση του κόστους, η μείωση του χρόνου και η βελτίωση της ποιότητας.
- Έλεγχος της διαδικασίας. Κατά τη φάση εκτέλεσης, πρέπει να παρακολουθούνται και να ρυθμίζονται καταστάσεις πραγματικού χρόνου, όπως



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

το χρονοδιάγραμμα παραγωγής, η αποθήκευση υλικών και η ποιότητα του προϊόντος, ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια, η συνέπεια και η υψηλή αποδοτικότητα αυτής της διαδικασίας, (Ταο κ.ά.,2018a).

Στον φυσικό κόσμο, κατασκευάζουμε φυσικά συστήματα με διακριτές και δυνητικά μοναδικές διαμορφώσεις. Αυτές οι διαμορφώσεις πρέπει να αντικατοπτρίζονται στον εικονικό χώρο, ώστε να μπορούμε να γνωρίζουμε τις ακριβείς προδιαγραφές και τη σύνθεση αυτών των συστημάτων. Στον ψηφιακό χώρο, κατασκευάζεται μια εικονική εκδοχή του ακριβούς φυσικού συστήματος, (Grievess and Vickers, 2017).

Το DT είναι ένα κοινό αποθετήριο για όλα τα ψηφιακά αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένων των αρχικών παραμέτρων σχεδιασμού και των μοντέλων που δημιουργούνται κατά την ανάπτυξη του προϊόντος. Σε έναν ιδανικό κόσμο, όλες οι πληροφορίες θα πρέπει να αποθηκεύονται σε ένα μοναδικό μέρος, όχι απαραίτητα στην ίδια φυσική τοποθεσία, ώστε να υπάρχει μια συνεπής πηγή για εισροή δεδομένων σε όλα τα μοντέλα.

Το τελικό στάδιο της ανάπτυξης του προϊόντος είναι η ενσωμάτωση των πολλών εξαρτημάτων στο συνολικό σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση όλα τα συστατικά πρέπει να συνδυάζονται τέλεια. Συνήθως, τα συστατικά στοιχεία δεν είναι έτοιμα ταυτόχρονα ή δεν είναι διαθέσιμα για δοκιμή όπως είναι. Στην περίπτωση αυτή, τα μοντέλα DT μπορούν να αντικαταστήσουν τα πραγματικά εξαρτήματα στη δοκιμή ολοκλήρωσης του συστήματος. Εάν μια ψηφιακή αναπαράσταση του εξαρτήματος παρέχεται μαζί με το φυσικό εξάρτημα (ή εκ των προτέρων), τα ζητήματα τοποθέτησης μπορούν εύκολα να εντοπιστούν εξαρχής όταν πρέπει να ενσωματωθούν εξαρτήματα από εξωτερικούς προμηθευτές. Η διαδικασία αυτή δεν λειτουργεί μόνο για φυσικά εξαρτήματα.

Επιπλέον, το λογισμικό αυτοματισμού μπορεί επίσης να δοκιμαστεί εκ των προτέρων χρησιμοποιώντας την εικονική αναπαράσταση του πραγματικού συστήματος (δηλ. εικονική θέση σε λειτουργία). Ακόμη και το τελικό περιβάλλον λειτουργίας μπορεί να προσομοιωθεί με αριθμητικά μοντέλα για να γίνει μια ρεαλιστική τελευταία δοκιμή πριν από την ανάπτυξη του τελικού προϊόντος, (Boschert and Rosen, 2016).



#### 2.4.3 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΥΠΗΡΕΣΙΑΣ

Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, η σχέση μεταξύ του πραγματικού και του εικονικού συστήματος διατηρείται και είναι αμφίδρομη. Εδώ προσδιορίζεται αν οι προβλέψεις σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος ήταν ακριβείς ή όχι, δηλαδή αν η προβλεπόμενη επιθυμητή απόδοση εμφανίζεται πραγματικά και αν οι προβλεπόμενες ανεπιθύμητες συμπεριφορές έχουν απομακρυνθεί.

Αλλαγές στο πραγματικό σύστημα συμβαίνουν τόσο στη μορφή όσο και στη λειτουργία, δηλαδή αντικατάσταση εξαρτημάτων και τροποποιήσεις της κατάστασης, (Grieves and Vickers, 2017).

Σύμφωνα με τον Wang (2020), το πλαίσιο εφαρμογής του DT στη διαδικασία εξυπηρέτησης προϊόντων αποτελείται κυρίως από τρία στοιχεία:

- Συλλογή δεδομένων στον φυσικό χώρο
- Εξέλιξη του DT στον εικονικό χώρο
- Έλεγχος παρακολούθησης και βελτιστοποίησης της κατάστασης

Κατά τη διάρκεια του σταδίου εξυπηρέτησης του προϊόντος (χρήση και συντήρηση του προϊόντος), η φυσική θέση του χώρου, το εξωτερικό περιβάλλον, η κατάσταση της ποιότητας, η κατάσταση χρήσης, η τεχνολογική κατάσταση και η λειτουργική κατάσταση του προϊόντος πρέπει να καταγράφονται και να παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο.

Η χρήση και η ανάλυση των καταγεγραμμένων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο παρέχουν την δυνατότητα της πρόβλεψης και της έγκαιρης προειδοποίησης για την υγεία, τη διάρκεια ζωής, την απρόσκοπτη λειτουργία και την απόδοση του προϊόντος.

Προσεγγίσεις ιχνηλασιμότητας και προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για τον ταχεία εντοπισμό προβλημάτων ποιότητας σε φυσικά αντικείμενα που έχουν αντιμετωπίσει ελαττώματα και προβλήματα ποιότητας. Συνεπώς, όταν ένα προϊόν παρουσιάζει βλάβη ή προβλήματα ποιότητας, είναι δυνατόν να επιτευχθεί άμεση αντίδραση για την αποκατάσταση των δυσλειτουργιών (αντικατάσταση εξαρτημάτων, συντήρηση του προϊόντος), αλλά ενισχύεται και η γνώση ως προς την προληπτική συντήρηση και την πιθανή αναβάθμιση του προϊόντος.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Στον φυσικό χώρο, χρησιμοποιώντας το IoT, την τεχνολογία αισθητήρων και την τεχνολογία κινητού Διαδικτύου, τα δεδομένα μέτρησης που συνδέονται με τα φυσικά προϊόντα (τα πιο πρόσφατα δεδομένα αισθητήρων, δεδομένα θέσης κ.λπ.), τα δεδομένα χρήσης του προϊόντος και τα δεδομένα συντήρησης αντιστοιχίζονται στο DT του αντικειμένου στον εικονικό χώρο.

Στο εικονικό περιβάλλον, η τεχνολογία οπτικοποίησης μοντέλων χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της διαδικασίας χρήσης του φυσικού προϊόντος σε πραγματικό χρόνο, (Wang, 2020).

Εάν τα δεδομένα λειτουργίας συλλέγονται με συνέπεια ως μέρος του DT, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση και την επικαιροποίηση των υφιστάμενων μοντέλων για τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και η γνώση που αποκτάται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επόμενη γενιά προϊόντων. Καθώς το DT έχει ήδη σχεδιαστεί από την πρώτη στιγμή, οι κατάλληλες διεπαφές για την αλληλεπίδραση με τα πραγματικά δεδομένα είναι ήδη έτοιμες. Έτσι, τα πραγματικά δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος για την επαλήθευση των μοντέλων προσομοίωσης, με αποτέλεσμα τη συνεχή βελτίωσή τους, (Boschert and Rosen, 2016).

#### 2.4.4 ΤΟ DT ΣΤΗΝ ΦΑΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΣΥΡΣΗΣ

Το τέλος του κύκλου ζωής αντιπροσωπεύει την τελική φάση της ύπαρξης ενός προϊόντος, όταν αυτό δεν μπορεί πλέον να χρησιμοποιηθεί όπως προβλέπεται από τον χρήστη. Σύμφωνα με τους Schleich κ.ά. (2019), οι εφαρμογές των DT κατά την διάρκεια του τέλους της ζωής του προϊόντος είναι προς το παρόν σπάνιες. Καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, ορισμένα στοιχεία μπορεί να παραμένουν σε συγκεκριμένα επίπεδα για επαναλήψεις του κύκλου ζωής, ενώ άλλα να εισέρχονται σε εναλλακτικούς κύκλους ζωής.

Ο Grieves (2005), αναφέρει πως για να έχει αξία το DT, η σύνδεση μεταξύ του εικονικού αντικειμένου και του φυσικού αντιστοίχου πρέπει να είναι ισχυρή, ακριβής και έγκαιρη. Έτσι, εάν ο μηχανικός σχεδιασμού σχεδιάζει ένα εξάρτημα ως ανακυκλώσιμο στην αρχή της ζωής του προϊόντος, το κέντρο ανακύκλωσης θα πρέπει να έχει αυτή τη γνώση και τη διαδικασία ανακύκλωσης για το ίδιο εξάρτημα στο τέλος της ζωής του προϊόντος. Το τελικό στάδιο, η απόρριψη και ο παροπλισμός, μερικές



φορές παραβλέπεται ως ξεχωριστή φάση και Grieves and Vickers (2017), τονίζουν τους λόγους για τους οποίους η φάση της απόρριψης πρέπει να λάβει μεγαλύτερη προσοχή.

1. Όταν ένα σύστημα αποσύρεται, η γνώση σχετικά με τη συμπεριφορά του συχνά χάνεται. Η επόμενη γενιά του συστήματος έχει συχνά ελαττώματα που θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί εάν είχαν χρησιμοποιηθεί οι πληροφορίες της προηγούμενης γενιάς. Ενώ μπορεί να είναι απαραίτητο να αποσυρθεί το φυσικό σύστημα, οι πληροφορίες σχετικά με αυτό μπορούν να διατηρηθούν με ελάχιστο κόστος.
2. Δεύτερον, ενώ το πρόβλημα που τίθεται είναι η αναδυόμενη συμπεριφορά του συστήματος κατά τη χρήση, υπάρχει επίσης το ζήτημα των αναδυόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος κατά τη απόρριψή του. Το σύστημα μπορεί να απορριφθεί τυχαία και ακατάλληλα, εάν δεν τηρούνται οι πληροφορίες σχεδιασμού σχετικά με το ποια υλικά περιέχονται στο σύστημα και πώς πρέπει να απορριφθούν.

Γιαυτό και οι Schleich κ.ά. (2019), επιβεβαιώνουν την ολιστική προσέγγιση για την διαχείριση του κύκλου ζωής του προϊόντος πως η πιο σημαντική πτυχή των εφαρμογών των DT στο τέλος του κύκλου ζωής είναι η πρόσβαση σε επίπεδο στοιχείου σε πληροφορίες και δεδομένα για ολόκληρο το ιστορικό χρήσης του προϊόντος ή του εξαρτήματος. Αυτό επιτρέπει όχι μόνο τον πιο τεκμηριωμένο προσδιορισμό του κατά πόσον ένα εξάρτημα ή προϊόν μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί ως έχει ή να ανακατασκευαστεί, αλλά και τον προσδιορισμό εναλλακτικών χρήσεων ώστε να υπάρχει μια σαφής ιεράρχηση των ενεργειών όσον αφορά τη βιωσιμότητά τους με την επαναχρησιμοποίηση/ανακατασκευή, την ανακύκλωση και την απόσυρση.

## 2.5 ΟΦΕΛΗ ΤΟΥ DT

Η ποικιλία των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνολογία DT είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο θεωρείται ένα από τα θεμελιώδη συστατικά στοιχεία της Βιομηχανίας 4.0. Τα οφέλη αυτά περιλαμβάνουν τη μείωση των σφαλμάτων, της αβεβαιότητας, της αναποτελεσματικότητας και του κόστους είτε αφορά σε μεμονωμένο εξάρτημα, σύστημα ή διαδικασία. Επιπλέον, εξαλείφει τα σιλό που είναι τυπικά για την



παραδοσιακή βιομηχανία, γεγονός που εξασφαλίζει ότι οι διαδικασίες, οι διευθύνσεις και οι οργανισμοί δεν λειτουργούν πλέον απομονωμένα μεταξύ τους. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν:

1. Ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων καθώς και επανασχεδιασμός προϊόντων  
Μόλις τεθεί σε εφαρμογή, το DT μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα σημεία της διαδικασίας σχεδιασμού προϊόντων, από τη δημιουργία μιας ιδέας έως τη δοκιμή του προϊόντος, (Ταο κ.ά., 2018a). Αυτό καθιστά την κατασκευή πρωτοτύπων ή τον επανασχεδιασμό ενός προϊόντος ευκολότερο και ταχύτερο. Εκτός από αυτό, μπορεί να διευκολύνει την πιο διαφανή και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ πελατών και σχεδιαστών μέσω της αξιοποίησης της μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η αξιοποίηση των εισροών των καταναλωτών και ο εντοπισμός των ζητημάτων που εμφανίστηκαν κατά τη χρήση της προηγούμενης γενιάς μπορεί να διευκολύνει αποτελεσματικά τη βελτίωση του νέου προϊόντος.

Δεδομένου ότι το DT είναι πάντα συνδεδεμένο με το φυσικό του δίδυμο, είναι δυνατή η σύγκριση της πραγματικής απόδοσης με την προβλεπόμενη. Αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς και τους σχεδιαστές προϊόντων να επανεξετάσουν τις υποθέσεις που έκαναν κατά την κατασκευή του προϊόντος, (Qi and Tao, 2018).

2. Οικονομικό κόστος, κόστος πρόληψης, περιβαλλοντικό κόστος  
Με την εφαρμογή του DT, μπορεί να μειωθεί το κόστος λειτουργίας και να παραταθεί η διάρκεια ζωής του εξοπλισμού και των περιουσιακών στοιχείων.

Με την εικονική επαλήθευση (Ταο κ.ά., 2018a), η ποιότητα οποιουδήποτε εξαρτήματος μπορεί να προβλεφθεί πριν από την κατασκευή του, διορθώνοντας σφάλματα και κάνοντας προβλέψεις, αξιοποιώντας όλες τις πληροφορίες σχετικά με τον εξοπλισμό, το περιβάλλον, τα υλικά, αλλά και τα δεδομένα του παρελθόντος.

Το DT καθιστά δυνατή τη δοκιμή προϊόντων σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένων των καταστροφικών, χωρίς επιπλέον κόστος. Το DT αποτελείται κυρίως από εικονικούς πόρους με το συνολικό κόστος της προτυποποίησης να μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Με την παραδοσιακή προτυποποίηση, ο επανασχεδιασμός ενός προϊόντος απαιτεί πολύ χρόνο και κόστος, επειδή χρησιμοποιούνται φυσικά υλικά και εργασία. Επιπλέον, μια καταστροφική δοκιμή οδηγεί στο τέλος του ακριβού πρωτοτύπου, αλλά με το DT, τα προϊόντα μπορούν να



ανακατασκευαστούν και να υποβληθούν σε καταστροφικές δοκιμές χωρίς επιπλέον κόστος για υλικά. Έτσι, ακόμη και αν το κόστος είναι το ίδιο στην αρχή, το πραγματικό κόστος συνεχίζει να αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο πληθωρισμός, αλλά το εικονικό κόστος μειώνεται πολύ με την πάροδο του χρόνου.

Επιπλέον, με τη χρήση της τεχνολογίας DT, υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί σημαντικά το κόστος που σχετίζεται με την πρόληψη του κινδύνου ανθρώπινης απώλειας μέσω της προσομοίωσης μεγαλύτερου αριθμού σεναρίων, για πρόβλεψη απρόβλεπτων καταστάσεων.

Κατά τη φάση της διάθεσης, η ύπαρξη πληροφοριών για τον τρόπο με τον οποίο κάθε εξάρτημα ή σύστημα σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να τεθεί σε ασφαλή απόσυρση ή παροπλισμό, θα μετριάσει σημαντικά το κόστος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, (Grieves and Vickers, 2017).

### 3. Πρόβλεψη προβλημάτων και ανεπιθύμητων συμπεριφορών

Η ανατροφοδότηση των δεδομένων της φάσης της δημιουργίας με δεδομένα από τη φάση της χρήσης και η προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο της συμπεριφοράς του συστήματος με τα δεδομένα από τις προαναφερθείσες φάσεις, θα μπορούσε να μας επιτρέψει να ανακαλύψουμε και να αντιμετωπίσουμε τις ανεπιθύμητες και απρόβλεπτες συμπεριφορές ή τα ζητήματα πολυπλοκότητας του κάθε συστήματος. Αυτό μας παρέχει την ευκαιρία να σχεδιάσουμε τα συστήματα αναλόγως.

Οι δυνατότητες πρόβλεψης διευκολύνονται από τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του φυσικού περιουσιακού στοιχείου και του DT, επιτρέποντας τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων σε διάφορα σημεία καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος. Αυτό είναι ιδιαίτερα επωφελές για προϊόντα που χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα, όπως αεροσκάφη, πλοία, οχήματα, εργοστασιακός εξοπλισμός και απομακρυσμένες δομές, (Grieves and Vickers, 2017).

### 4. Βελτιστοποίηση λύσεων και βελτίωση της συντήρησης

Η ακριβής αξιολόγηση της κατάστασης του εξοπλισμού μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση DT καθώς η ευκολία του προγραμματισμού της συντήρησης βελτιώνεται εάν η τρέχουσα κατάσταση της υγείας κάθε επιμέρους εξαρτήματος του εξοπλισμού είναι άμεσα διαθέσιμη σε κάθε χρονική στιγμή. Μέσω της προσομοίωσης, το DT προσφέρει



μια βέλτιστη λύση ή στρατηγική συντήρησης που βελτιώνει την ευκολία της συντήρησης του προϊόντος/συστήματος.

Επιπλέον, ο διαρκής βρόχος ανατροφοδότησης μεταξύ του DT και του φυσικού προϊόντος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συνεχή επικύρωση και βελτιστοποίηση των διαδικασιών του συστήματος, (Aivaliotis κ.ά., 2019).

#### 5. Προσβασιμότητα και ασφάλεια

Το φυσικό προϊόν έχει τη δυνατότητα να ελέγχεται και να παρακολουθείται εξ αποστάσεως μέσω του εικονικού του αντίγραφου. Σε αντίθεση με τα φυσικά συστήματα, τα οποία περιορίζονται από τη συγκεκριμένη γεωγραφική τους θέση, τα εικονικά συστήματα όπως το DT έχουν τη δυνατότητα εκτεταμένης κοινής χρήσης και απομακρυσμένης πρόσβασης.

Η ζήτηση για απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο του εξοπλισμού και των συστημάτων προκύπτει σε καταστάσεις όπου η τοπική πρόσβαση είναι περιορισμένη, όπως κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, ή όταν τα φυσικά περιουσιακά στοιχεία βρίσκονται μακριά από τις εταιρείες διαχείρισης όπως, πλοία, πλατφόρμες εξόρυξης, ανεμογεννήτριες, διαστημικά οχήματα.

Μέσω της ενσωμάτωσης των αισθητήρων και συσκευών συλλογής δεδομένων στο φυσικό αντικείμενο ή σύστημα, είναι δυνατή η απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που αφορούν την τρέχουσα κατάσταση, την απόδοση και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα δεδομένα έπειτα μεταδίδονται στο DT, το οποίο προσομοιώνει το φυσικό αντικείμενο ή σύστημα. Η διαδικασία αυτή διευκολύνει τον εντοπισμό προβλημάτων, αποκλίσεων ή ανωμαλιών, επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση και την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων.

Επίσης όταν τίθενται θέματα ασφάλειας όπως στην περίπτωση των βιομηχανιών πετρελαίου, φυσικού αερίου, εξόρυξης ή της κατασκευής όπου χαρακτηρίζονται από απαιτητικά και επικίνδυνα εργασιακά περιβάλλοντα η χρήση του DT έχει τη δυνατότητα να μετριάσει την εμφάνιση ατυχημάτων και επικίνδυνων αστοχιών, (Singh κ.ά., 2021).



## 6. Εκπαίδευση

Το DT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία πιο αποτελεσματικών και παραστατικών προγραμμάτων εκπαίδευσης σε θέματα ασφάλειας, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους εκπαίδευσης.

Πριν από την εργασία σε μια τοποθεσία υψηλού κινδύνου ή σε μια επικίνδυνη συσκευή, οι χειριστές μπορούν να εκπαιδευτούν σε διάφορες διαδικασίες ή σενάρια χρησιμοποιώντας το DT ως πλατφόρμα ενός εικονικού περιβάλλοντος για να μειώσουν τους κινδύνους. Για παράδειγμα, η εξόρυξη είναι ένα περιβάλλον υψηλού κινδύνου, όπου η DT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση νέων υπαλλήλων σχετικά με τον τρόπο χειρισμού συσκευών αλλά και την αντιμετώπιση σεναρίων έκτακτης ανάγκης, (Singh κ.ά., 2021).

Επιπλέον, η χρήση του DT σε συνδυασμό με τεχνολογίες αιχμής όπως, AI, AR, VR, παρέχει τη δυνατότητα υποστήριξης των απαιτήσεων κατάρτισης και εκπαίδευσης των επαγγελματιών σε πολλούς τομείς. Για παράδειγμα, έχουν χρησιμοποιηθεί προσομοιώσεις ιατρικής ανατομίας και χειρουργικών επεμβάσεων ως μέσο για τη διευκόλυνση της διαδραστικής μάθησης και τη μείωση της εξάρτησης από πτώματα. Τέλος, οι λύσεις της τεχνολογίας DT μπορούν να χρησιμοποιηθούν από ιατρικά ιδρύματα με σκοπό τη διδασκαλία χειρουργικών τεχνικών μέσω της προσομοίωσης, (Attaran and Celik, 2023).

## 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ DT

Έπειτα από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας στο κεφάλαιο 2 των πολυάριθμων και διευρυμένων παραλλαγών ορισμού του DT, είναι σαφές πως δεν υπάρχει μια ενοποίηση της έννοιας και κάθε τομέας είτε προέρχεται από την βιομηχανία είτε από την ακαδημαϊκή κοινότητα, ανάλογα με την περίπτωση χρήσης και την φάση του κύκλου ζωής του DT, έχει αναπτύξει έναν ξεχωριστό ορισμό.

Παρατηρείται πως, αρκετοί μελετητές της συγκεκριμένης τεχνολογίας έχουν αποτυπώσει στις εργασίες τους διάφορες αρχιτεκτονικές για το DT, με σκοπό να στοιχειοθετήσουν τα χαρακτηριστικά του, δηλαδή να οριστούν τα στοιχεία από τα οποία θα αποτελείται ένα DT, ώστε να καταστεί εφικτή η υλοποίησή του. Οι ιδιότητες



και τα στοιχεία που αποτυπώνονται παρακάτω, είναι αποτέλεσμα της ύπαρξής τους στη βιβλιογραφία και της κατανόησης για την έννοια του DT.

Ο Grieves (2014), ήταν ο πρώτος που παρουσίασε μια καθολική και τυποποιημένη αρχιτεκτονική ψηφιακών δίδυμων, η οποία αποτελείται από 3 κύρια μέρη:

1. Το φυσικό προϊόν στον πραγματικό χώρο
2. Το εικονικό προϊόν στον εικονικό χώρο και
3. Τις συνδέσεις δεδομένων και πληροφοριών που συνδέουν τα εικονικό και το πραγματικό προϊόν μεταξύ τους.

Η αρχιτεκτονική αυτή, συνδυάζει τη φυσική οντότητα με την εικονική αντίστοιχη οντότητα υψηλής πιστότητας με τα δύο μέρη να συνεργάζονται μεταξύ τους κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής.

Αν και η πλειοψηφία των δημοσιεύσεων συμφωνεί για τον εικονικό χώρο, διαφοροποιεί τον φυσικό χώρο, βάσει και του σκοπού χρήσης. Ορισμένες, αναφέρονται σε μηχανές ή γενικότερα σε προϊόντα. Επιπλέον, για ορισμένους ερευνητές θεωρείται ως φυσικός χώρος τα περιουσιακά στοιχεία μιας επιχείρησης. Άλλοι επεκτείνουν την έννοια ακόμη περισσότερο, λαμβάνοντας υπόψη ολόκληρα συστήματα. Εκτός από τα φυσικά προϊόντα, ένα DT μπορεί επίσης να αντιπροσωπεύει άυλα "πράγματα", όπως υπηρεσίες ή διαδικασίες.

Επιπλέον, μέσα από την μελέτη της βιβλιογραφίας, μπορούμε να διακρίνουμε πως η απόδοση των βασικών στοιχείων ενός DT έχει γίνει σημαντικά πιο δύσκολη λόγω της ασυνεπής χρήσης του όρου. Αυτή η εννοιολογική ασάφεια κλιμακώνεται όταν τροφοδοτείται επιπλέον από μελέτες κατά τις οποίες χρησιμοποιούνται παρακείμενοι ορισμοί, όπως «άβαταρ προϊόντος» (Product Avatar), «ψηφιακό νήμα» (Digital Thread), «ψηφιακό μοντέλο» (Digital Model) και «ψηφιακή σκιά» (Digital Shadow), γεγονός που καθιστά δύσκολη την ακριβή χρήση του όρου «ψηφιακό δίδυμο».

Καθώς οι απαιτήσεις των εφαρμογών συνεχίζουν να αυξάνονται και να εξελίσσονται, η ανάπτυξη και οι εφαρμογές του DT παρέχουν νέες τάσεις και απαιτήσεις. Τα τελευταία χρόνια, για παράδειγμα, οι εφαρμογές του DT έχουν σταδιακά μετακινηθεί από τους στρατιωτικούς και αεροδιαστημικούς τομείς στους πολιτικούς τομείς.



Γιαυτό και άλλοι συγγραφείς προτείνουν πως ένα ολοκληρωμένο DT πρέπει να περιλαμβάνει περισσότερες από 3 διαστάσεις για να ενθαρρύνουν τις περαιτέρω χρήσεις του DT σε πρόσθετους κλάδους.

Οι Ταο κ.ά. (2017) και οι Qi κ.ά. (2021), παρουσιάζουν 5 διαστάσεις ως συστατικά στοιχεία ενός ολοκληρωμένου DT τα οποία είναι:

1. Φυσικό μέρος
2. Εικονικό μέρος
3. Δεδομένα
4. Υπηρεσίες για φυσικό και εικονικό μέρος
5. Σύνδεση μεταξύ φυσικού και εικονικού μέρους

Σε σχέση με το μοντέλο αρχιτεκτονικής 3 διαστάσεων του Grieves προστέθηκαν άλλες 2 διαστάσεις (Δεδομένα και Υπηρεσίες).

Επιπλέον, αναφορικά και χωρίς περαιτέρω ανάλυση στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, ερευνητές όπως οι Redelinghuys κ.ά. (2018), προτείνουν μία αρχιτεκτονική έξι επιπέδων ως την υποδομή που απαιτείται για ένα DT στο πλαίσιο του παραδείγματος των κυβερνοφυσικών συστημάτων παραγωγής (CPPS) ως εξής:

(1) Φυσικές συσκευές, (2) Τοπικοί ελεγκτές, (3) Τοπικά αποθετήρια δεδομένων, (4) Πύλη IoT, (5) Αποθετήρια δεδομένων με βάση το cloud, (6) Εξομοίωση και προσομοίωση.

Εδώ οι συγγραφείς εστιάζουν στα δεδομένα και στις πληροφορίες που ανταλλάσσονται με τη χρήση του IoT, μεταξύ του φυσικού συστήματος (επίπεδο 1) και μιας απομακρυσμένης εξομοίωσης ή προσομοίωσης (επίπεδο 6) όπου αποθηκεύονται σε ένα αποθετήριο πληροφοριών (cloud), (Redelinghuys κ.ά., 2019).

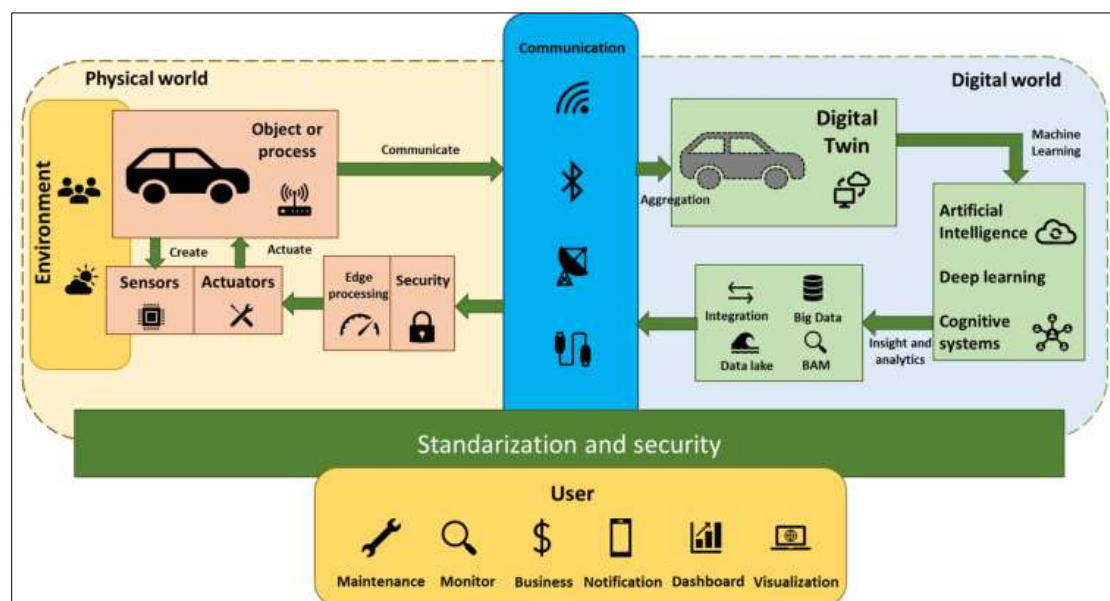
Εντούτοις, εντοπίζονται κοινά σημεία και ως εκ τούτου το γενικό πλαίσιο της αρχιτεκτονικής του DT καθορίζεται από τα τρία βασικά που προτάθηκαν από τον Grieves (2014), με κάθε μέρος να χαρακτηρίζεται και αυτό από επιμέρους στοιχεία που θα αναφερθούν παρακάτω και θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι Botín-Sanabria κ.ά. (2022), σε μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας με βάση τα DT αναφέρουν πως ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του τομέα που εφαρμόζεται, κάθε συστατικό του DT θα ενσωματώνει μια σειρά από στοιχεία.



Ωστόσο, το γενικό πλαίσιο αρχιτεκτονικής του DT εξακολουθεί να επικρατεί σε όλους τους τομείς.

Το Σχήμα 3.1, απεικονίζει αυτήν την αρχιτεκτονική η οποία περιλαμβάνει και στοιχεία που συνθέτουν το κάθε μέρος. Ο φυσικός κόσμος, αποτελείται από φυσικά αντικείμενα ή διαδικασίες, αισθητήρες, ενεργοποιητές και τις δυνατότητες επεξεργασίας. Το DT, οι βάσεις δεδομένων, η μηχανική μάθηση και τα εργαλεία επεξεργασίας δεδομένων αποτελούν τον ψηφιακό κόσμο (εικονικό μέρος). Τα δύο μέρη συνδέονται μέσω του στοιχείου επικοινωνίας, το οποίο προσφέρει μια ποικιλία πρωτοκόλλων και διεπαφών, όπως WiFi, Bluetooth και ενσύρματες συνδέσεις. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση και ορατότητα για τον χρήστη με την οπτικοποίηση των δεδομένων, η οποία αποτελεί κρίσιμο στοιχείο, (Botín-Sanabria κ.ά., 2022).



Σχήμα 3.1: Αρχιτεκτονική DT (Botín-Sanabria κ.ά., 2022)

### 3.1 ΦΥΣΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ DT

Το φυσικό μέρος αποτελεί την βάση για την δημιουργία ενός εικονικού αντίστοιχου μέρους, ανεξάρτητα αν προηγείται ή έπεται του ψηφιακού μέρους του (van der Valk κ.ά., 2020). Η φυσικά οντότητα ή το φυσικό μέρος μπορεί να είναι ένα φυσικό προϊόν, μια πλήρης παραγωγική διαδικασία, ένα σύστημα, ένα σύστημα συστημάτων ή ακόμη και ένα βασικό εξάρτημα μιας μηχανής.



Κατά την ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου, είναι απαραίτητες πληροφορίες σχετικές με τη γεωμετρία και την τοπολογία του αντικειμένου. Αντίστοιχα για μια βιομηχανική διαδικασία, είναι απολύτως απαραίτητο να υπάρχει πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με τον προγραμματισμό και ολόκληρη τη γραμμή παραγωγής. Προκειμένου να ψηφιοποιηθεί μια κατασκευαστική λειτουργία, είναι απαραίτητη η μέτρηση και η καταγραφή χαρακτηριστικών όπως δονήσεις, δύναμη, ροπή, ταχύτητα, θερμοκρασία της μηχανής, κλπ., (Andrade κ.ά., 2021).

Σύμφωνα με τους Semeraro κ.ά. (2021), το φυσικό μέρος χαρακτηρίζεται από κάποια βασικά συστατικά όπως το υλικό, τον τύπο δεδομένων και τις πηγές και το επίπεδο εφαρμογής.

### 1. Υλικό

Το υλικό αποτελείται από αισθητήρες, ενεργοποιητές και ενσωματωμένη επικοινωνία. Οι αισθητήρες κι οι ενεργοποιητές είναι απαραίτητοι για την αλληλεπίδραση με τον φυσικό κόσμο. Από τους αισθητήρες συλλέγονται δεδομένα σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση ανιχνεύοντας τις συνθήκες από τις φυσικές οντότητες και το περιβάλλον, δημιουργώντας έτσι μια βάση δεδομένων. Για παράδειγμα μπορούν να συγκεντρώσουν πληροφορίες από καταστάσεις όπως δύναμη, ταχύτητα, δονήσεις, αλλά και τις συνθήκες εργασίας όπως θερμοκρασία, πίεση, υγρασία, φορτία των φυσικών συστημάτων.

Λόγω του τεράστιου αριθμού απαραίτητων χαρακτηριστικών που πρέπει να συγκεντρώσουν και του μεγάλου αριθμού θέσεων για τη λήψη αυτών των παραμέτρων, χρησιμοποιούνται «έξυπνοι αισθητήρες» που μπορούν να μετρήσουν και να επικοινωνήσουν πολλές παραμέτρους ταυτόχρονα οι οποίοι διαθέτουν ασύρματες διεπαφές για την απλοποίηση του σχεδιασμού του προϊόντος και της συλλογής δεδομένων.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από ψηφιακές συσκευές επεξεργάζονται και ερμηνεύονται, παράγοντας ένα σύνολο ενεργειών προς εκτέλεση, εφόσον αυτές δικαιολογούνται. Οι ενεργοποιητές μεταδίδουν τις ενέργειες αυτές πίσω προς τον φυσικό κόσμο. Για την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση η ενσωμάτωση της υπολογιστικής ισχύος απευθείας στο προϊόν ή στον εξοπλισμό που διευκολύνει τη διαδικασία παραγωγής αλλά και συστήματα IoT που



πραγματοποιούν την διασύνδεση των έξυπνων συσκευών και την απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, (Zakharov and Derksen, 2020).

## 2. Ο τύπος και οι πηγές δεδομένων

Σύμφωνα με τους Semeraro κ.ά. (2021), ένα σύστημα DT λαμβάνει από τον φυσικό κόσμο και αξιοποιεί ετερογενή δεδομένα από πολλαπλές πηγές όπως:

- Δεδομένα προϊόντος από συστήματα υποβοηθούμενα από υπολογιστή CAD/CAM CAE.
- Δεδομένα διαχείρισης από πληροφοριακά συστήματα παραγωγής όπως MES, PDM, SCM, ERP, κ.λπ.
- Λειτουργικά δεδομένα από τον εξοπλισμό παραγωγής, όπως δεδομένα προϊόντος, δεδομένα ποιότητας, δεδομένα συντήρησης.
- Περιβαλλοντικά δεδομένα που επηρεάζουν τις λειτουργίες του φυσικού εξοπλισμού, όπως η περιβαλλοντική πίεση, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και το επίπεδο υγρασίας.
- Δεδομένα από το διαδίκτυο ή δεδομένα χρηστών από δεδομένα CRM, πλατφόρμες ηλεκτρονικού εμπορίου (π.χ. Amazon), πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης (π.χ. Twitter, Facebook, LinkedIn και YouTube), για την κατανόηση των προτιμήσεων και των συμπεριφορών των χρηστών.
- Δεδομένα γνώσης που παρέχονται από ειδικούς του τομέα ή εξάγεται από υπάρχοντα δεδομένα.

## 3. Το DT μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά επίπεδα

Σύμφωνα με τους Qi κ.ά. (2021), το φυσικό μέρος μπορεί να ταξινομηθεί σε τρία επίπεδα με βάση την λειτουργία και τη δομή:

- Επίπεδο μονάδας

Το επίπεδο μονάδας αναφέρεται στη μικρότερη μονάδα σε μια διαδικασία παραγωγής, όπως ένα μεμονωμένο κομμάτι εξοπλισμού (π.χ. μια εργαλειομηχανή ή ένας ρομποτικός βραχίονας), ένα υλικό (π.χ. μια πρώτη ύλη ή ένα εξάρτημα με RFID ή αισθητήρες) ή ακόμη και ένας περιβαλλοντικός παράγοντας. Περιέχει έναν βασικό κλειστό βρόγχο ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ του φυσικού και του εικονικού χώρου.



- Επίπεδο συστήματος

Σε αυτό το επίπεδο υπάρχει ενσωμάτωση πολλαπλών DT επιπέδου μονάδας, όπως μια γραμμή παραγωγής ή ακόμα κι ένα εργοστάσιο. Με βάση τον κλειστό βρόχο σε επίπεδο συστήματος μπορεί να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή των πόρων παραγωγής και να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα της συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων πόρων.

- Επίπεδο διεργασιών

Το DT δεν αφορά μόνο τα φυσικά περιουσιακά στοιχεία, αλλά και τις διαδικασίες. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργούνται πλήρη εικονικά μοντέλα των βημάτων παραγωγής. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να απαντηθούν κρίσιμα ερωτήματα και να ληφθούν σημαντικές αποφάσεις που αφορούν, τον χρόνο που θα χρειαστεί για την κατασκευή ενός συγκεκριμένου προϊόντος, το κόστος, τον εξοπλισμό που θα χρειαστεί για να εκτελεστούν οι εργασίες, τις διαδικασίες που μπορούν να αυτοματοποιηθούν και αν είναι εν τέλει εφικτή η δημιουργία ενός συγκεκριμένου προϊόντος. Επιπλέον, η οπτικοποίηση της πλήρους διαδικασίας παραγωγής μπορεί να καταστήσει πιο εύκολη την αποφυγή δαπανηρών διακοπών λειτουργίας, (AltexSoft, 2025).

- Επίπεδο συστήματος των συστημάτων (System of Systems – SoS)

Σε αυτό το επίπεδο υλοποιείται η διασύνδεση και η διαλειτουργικότητα πολλών συστημάτων, όπως συνεργασίες επιχειρήσεων ή και μια ολόκληρη πόλη. Με την χρήση του DT σε αυτό το επίπεδο μπορεί να επιτευχθεί η οριζόντια ολοκλήρωση, με την βοήθεια π.χ. μιας πλατφόρμας έξυπνων υπηρεσιών. Ένα DT επιπέδου SoS θα μπορούσε να είναι μια ολοκλήρωση των διαφόρων σταδίων του κύκλου ζωής γιατί θα πρέπει να συγκεντρώνει δεδομένα από όλα τα μέρη του κύκλου ζωής όλων των συστημάτων, τα οποία μπορεί να είναι χρήσιμα σε διάφορες φάσεις του τρέχοντος κύκλου ζωής και ακόμη και του επόμενου.

Ωστόσο, η επένδυση που απαιτείται για την κατασκευή αντιγράφου σε αυτό το επίπεδο μπορεί να μην αποφέρει την αναμενόμενη απόδοση. Ως εκ τούτου το DT συστημάτων είναι λιγότερο διαδεδομένη από άλλους τύπους DT, (Ταο κ.ά., 2019c).

## 3.2 ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ ΤΟΥ DT

Σε αυτήν τη διάσταση περιλαμβάνονται τα εικονικά μοντέλα τα οποία πρέπει να είναι πιστά αντίγραφα των φυσικών οντοτήτων. Η υψηλή πιστότητα, επιτρέπει την ανάπτυξη



ενός υπερρεαλιστικού ψηφιακού μοντέλου DT που μιμείται κάθε πτυχή-χαρακτηριστικό του φυσικού διδύμου. Αυτό το επίπεδο εξειδίκευσης παρέχει την δυνατότητα στα συστήματα προσομοίωσης και πρόβλεψης που βασίζονται στο DT να είναι πιο ακριβή όταν παρουσιάζεται μια ποικιλία πιθανών ενεργειών ή σεναρίων.

Το εικονικό μέρος υποστηρίζει την αναπαράσταση ολόκληρης της διαδικασίας του κύκλου ζωής ενός φυσικού προϊόντος, την προσομοίωση, την διάγνωση, τη λήψη αποφάσεων και τον έλεγχο της κατάστασης και της συμπεριφοράς της φυσικής οντότητας. Η δημιουργία και ο συνδυασμός μοντέλων DT με βάση την φυσική και με βάση τα δεδομένα αναπαράγουν την γεωμετρία, τις φυσικές ιδιότητες, τους κανόνες και τις συμπεριφορές του φυσικού κόσμου, όπως οι ιδιότητες των υλικών, η μηχανική ανάλυση, η παρακολούθηση της υγείας, (Ταο κ.ά.,2018b).

Τα παραπάνω μοντέλα είναι δύο από τους πιο συνηθισμένους τύπους μοντέλων. Το μοντέλο δεδομένων, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα δεδομένα μοντελοποίησης και το φυσικό μοντέλο βασίζεται σε φυσικούς μηχανισμούς και περιορισμούς. Το τελευταίο όταν είναι υπερβολικά απλό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αποκλίσεις από την πραγματικότητα, (Zhang κ.ά., 2022).

Οι Ταο κ.ά. (2022), προτείνουν για το εικονικό μοντέλο 4 υπο-μοντέλα τεσσάρων διαστάσεων: γεωμετρικό μοντέλο, φυσικό μοντέλο, μοντέλο συμπεριφοράς και μοντέλο κανόνων. Αυτά τα επιμέρους μοντέλα είναι εξοπλισμένα με τα δικά τους χαρακτηριστικά και λειτουργίες και με την συγχώνευση και των τεσσάρων είναι δυνατό να επιτευχθεί πλήρης λειτουργική, πολλαπλών χρήσεων και υψηλής πιστότητας μοντελοποίηση των DT.

### 1. Γεωμετρικό μοντέλο

Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου δείχνει το σχήμα, το μέγεθος, την εσωτερική δομή, τη θέση και τον προσανατολισμό στο χώρο και τις διεπαφές συναρμολόγησης των φυσικών αντικειμένων. Το γεωμετρικό μοντέλο δεν χρησιμοποιείται μόνο για τη διαμόρφωση, αλλά η δομική του ακεραιότητα και η ακρίβεια των δεδομένων του υποστηρίζουν επίσης την ανάλυση κίνησης, τον βέλτιστο σχεδιασμό και την εικονική αλληλεπίδραση, μεταξύ άλλων εφαρμογών. Κατά συνέπεια παίζει σημαντικό ρόλο η ακρίβεια του μοντέλου.



Επιπλέον, ζωτικής σημασίας είναι και η απλότητα του μοντέλου, δηλαδή να δημιουργήσουμε μια ελαφριά έκδοση του μοντέλου, καθώς με την απλοποίηση της γεωμετρίας ενός μοντέλου, είναι εφικτό να έχουμε μια αναπαράσταση υψηλής πιστότητας μιας φυσικής οντότητας με μικρά αρχεία μεταφοράς χρησιμοποιώντας όχι περιττά δεδομένα. Αυτό σημαίνει πως μπορεί να μειωθεί ο χρόνος φόρτωσης και μεταφοράς αυτών των αρχείων και γενικά η επεξεργασία τους. Επιπλέον, η απλότητα μπορεί να καταστήσει δυνατή την συμβατότητα του μοντέλου με πολλές διαφορετικές πλατφόρμες.

## 2. Φυσικό μοντέλο

Το μοντέλο φυσικής επιτρέπει την οπτικοποίηση πληροφοριών σχετικά με την οντότητα που αναπαριστά και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μίμηση φυσικών συνθηκών και την πρόβλεψη ορισμένων περιορισμών μιας συγκεκριμένης κατάστασης, (Qi κ.ά., 2021).

Πιο συγκεκριμένα φυσικές ιδιότητες όπως, π.χ. λειτουργία/ικανότητα, δύναμη κοπής, ροπή και φθορά και φορτία όπως, π.χ. τάση, αντίσταση και θερμοκρασία, δίνονται στα γεωμετρικά μοντέλα για να σχηματίσουν τα φυσικά μοντέλα, τα οποία αναλύουν τα φυσικά φαινόμενα, όπως η παραμόρφωση, η ρηγμάτωση και η διάβρωση, (Tao and Zhang, 2017).

## 3. Μοντέλο συμπεριφοράς

Το μοντέλο συμπεριφοράς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι οντότητες αντιδρούν στις αλλαγές του εξωτερικού περιβάλλοντος και στις συμπεριφορές τους όπως, μετάβαση κατάστασης, μείωση απόδοσης και διαχείριση κατάστασης, (Qi κ.ά., 2021).

Οι Tao κ.ά. (2022), επισημαίνουν την σημασία της ακριβούς διερεύνησης της γενεσιουργού αιτίας των ανωμαλιών στα δεδομένα και της συσχέτισής τους με άλλες μεταβλητές κατά την δημιουργία του μοντέλου συμπεριφοράς. Αυτό πηγάζει από το ότι οι φυσικές οντότητες εκτίθενται σε πολλούς άγνωστους παράγοντες κατά την διάρκεια της πραγματικής λειτουργίας, με αποτέλεσμα τα μοντέλα συμπεριφοράς να έχουν την τάση να είναι αποκλίνοντα. Όταν υπάρχουν μη φυσιολογικές τιμές στα δεδομένα, συνήθως καθιστούν το μοντέλο συμπεριφοράς λιγότερο ακριβές ή προκαλούν το μοντέλο του DT να είναι διαφορετικό από τη φυσική οντότητα.



#### 4. Μοντέλο κανόνων

Τα μοντέλα κανόνων προσδίδουν στο DT λογικές δεξιότητες, όπως η συλλογιστική, η κρίση, η αξιολόγηση και η λήψη αποφάσεων από μόνο του, ακολουθώντας κανόνες που προέρχονται από ιστορικά δεδομένα ή ειδικούς του τομέα, (Qi κ.ά., 2021).

Η κατασκευή του μοντέλου κανόνων δείχνει πώς οι φυσικές οντότητες έχουν αλλάξει και αναπτυχθεί με την πάροδο του χρόνου. Με βάση ολόκληρο τον κύκλο ζωής των φυσικών οντοτήτων, υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι για την κατασκευή μοντέλων κανόνων: η εξόρυξη και ανάλυση δεδομένων από ολόκληρο τον κύκλο ζωής και η καταγραφή της εμπειρίας και της γνώσης.

Ο όγκος των δεδομένων από ολόκληρο τον κύκλο ζωής καθορίζει τις μέγιστες δυνατότητες του μοντέλου και αποτελεί το θεωρητικό ανώτατο όριο της γνώσης του συστήματος. Για να επιτευχθεί η καλύτερη αντιστοίχιση των δεδομένων και του ψηφιακού μοντέλου απαιτείται προεπεξεργασία των δεδομένων, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν εσφαλμένες τιμές.

Έτσι μοντελοποιούνται κανόνες συσχετίσεων, περιορισμών και συμπερασμάτων για να περιγράψουν τη γνώση του τομέα και να καταστήσουν τα παραπάνω τρία είδη μοντέλων ικανά να αξιολογούν, να συλλογίζονται και να προβλέπουν, (Tao and Zhang, 2017). Οι Tao κ.ά. (2022) υποστηρίζουν πως όσον αφορά τις 4 διαστάσεις του μοντέλου, δεν υπάρχει μελέτη που να εξετάζει ταυτόχρονα τις 4 διαστάσεις ή και τη συγχώνευσή τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η υπάρχουσα αναπαράσταση του μοντέλου DT είναι μάλλον μονόπλευρη και αδυνατεί να ενσωματώσει και να αποτυπώσει όλες τις διαστάσεις του εικονικού μοντέλου, εμποδίζοντας την ακριβή απεικόνιση του φυσικού αντικειμένου.

### 3.3 ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ ΤΟΥ DT

Η 3η διάσταση αρχιτεκτονικής του DT περιλαμβάνει συνδέσεις και αλληλεπιδράσεις μεταξύ φυσικών στοιχείων και εικονικού χώρου. Η δημιουργία συνδέσμων μεταξύ πραγματικών οντοτήτων, εικονικών μοντέλων επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων.

Σύμφωνα με τον Grieves (2014), η σύνδεση μεταξύ φυσικού και εικονικού προϊόντος πρέπει να είναι αμφίδρομη και απρόσκοπτη για να έχει αξία το DT και να



διαφοροποιηθεί η τεχνολογία αυτή από τις κλασσικές μεθόδους μοντελοποίησης και προσομοίωσης, στις οποίες η ανάλυση πραγματοποιείται συνήθως «off-line». Με αυτόν τον τρόπο, ο ψηφιακός και ο φυσικός κόσμος μπορούν να εναρμονιστούν πραγματικά σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής.

Προκύπτουν λοιπόν, 2 διάλογοι επικοινωνίας μεταξύ φυσικής και εικονικής οντότητας. Ο 1<sup>ος</sup> έχει κατεύθυνση από την φυσική προς την εικονική οντότητα και ο 2<sup>ος</sup> από την εικονική προς την φυσική οντότητα.

#### 1. Φυσική προς εικονική σύνδεση

Οι συνδέσεις μεταξύ φυσικής και εικονικής οντότητας, είναι το μέσο με το οποίο η κατάσταση (δηλαδή οι μετρούμενες τιμές για κάθε μια από τις παραμέτρους), της φυσικής οντότητας μεταφέρεται και αντανακλάται στο εικονικό περιβάλλον, δηλαδή πραγματοποιείται η ενημέρωση των εικονικών παραμέτρων ώστε να αντανακλούν τις τιμές των φυσικών παραμέτρων. Η ίδια η σύνδεση αποτελείται από μια φάση μετρολογίας, κατά την οποία μετράται και καταγράφεται η κατάσταση της φυσικής οντότητας, και μια φάση υλοποίησης, κατά την οποία υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της φυσικής και της ψηφιακής οντότητας και ενημερώνεται ανάλογα η εικονική οντότητα. Έτσι καθώς το φυσικό σύστημα υφίσταται τροποποιήσεις, αυτές οι τροποποιήσεις ενσωματώνονται στο DT, ώστε να γνωρίζουμε την ακριβή διαμόρφωση κάθε φυσικού συστήματος που χρησιμοποιείται. Σε όλη την βιβλιογραφική ανασκόπηση για το DT, αυτός ο διάλογος επικοινωνίας περιλαμβάνεται και συνήθως αναλύεται από τους ερευνητές ως ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της αρχιτεκτονικής του DT, (Jones κ.ά., 2020).

#### 2. Εικονική προς φυσική σύνδεση

Η σύνδεση της εικονικής με τη φυσική κατάσταση ορίζεται ως η ροή πληροφοριών και διαδικασιών από την εικονική προς την φυσική οντότητα. Δηλαδή, ιδανικά το DT διαθέτει τη λειτουργικότητα για να πραγματοποιήσει μια αλλαγή στη φυσική κατάσταση. Η διαδικασία σύνδεσης από εικονική σε φυσική, μοιάζει με τη αντίστροφη διαδικασία σύνδεσης, καθώς και οι δύο περιλαμβάνουν φάσεις μετρολογίας και υλοποίησης.

Οι εικονικές διεργασίες και οι μέθοδοι μέτρησης καθορίζουν και μετρούν ένα σύνολο τιμών-παραμέτρων σε μια φυσική οντότητα ή περιβάλλον, ενώ οι μέθοδοι υλοποίησης



καθορίζουν την διαφορά μεταξύ αυτών των νέων τιμών και της τρέχουσας κατάστασης και προσαρμόζουν ανάλογα την κατάσταση της φυσικής οντότητας.

Σε αντίθεση με την σύνδεση φυσικού προς εικονικό, με βάση την βιβλιογραφική ανασκόπηση, η σύνδεση εικονικού προς φυσικό δεν περιλαμβάνεται πάντα στις περιγραφές των ψηφιακών διδύμων, παρόλο που περιλαμβάνεται στον αρχικό ορισμό του Grieves (2014). Επιπλέον, η συχνότητα της επικοινωνίας μεταξύ των 2 μερών δεν εξετάζεται εκτός κι αν σχετίζεται με συγκεκριμένη περίπτωση χρήσης, (Grieves, 2022). Εννοιολογικά, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένα DT μόνο με μια σύνδεση μεταξύ φυσικού και εικονικού. Η κατάσταση της εικονικής οντότητας θα αντικατοπτρίζει την κατάσταση της φυσικής οντότητας. Στην βιβλιογραφία πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν τον όρο «Ψηφιακή Σκιά» για να προσδιορίσουν την παραπάνω συνθήκη.

Ωστόσο, δεν μπορούμε να εκμεταλλευθούμε εις το έπακρον τα οφέλη του DT χωρίς και την αντίθετη ροή του διαύλου επικοινωνίας. Η αξία της ανατροφοδότησης, έγκειται στο γεγονός πως κλείνει τον κύκλο μεταξύ των υποθέσεων που πραγματοποιούνται στον εικονικό χώρο και των πραγματικών αποτελεσμάτων που παρατηρούνται στον φυσικό κόσμο. Πρακτικά, το DT με αμφίδρομη σύνδεση, μπορεί να κάνει υποθέσεις και στη συνέχεια να εκτελέσει, να δοκιμάσει και να προσαρμόσει τις υποθέσεις αυτές σε έναν συνεχή κύκλο προσαρμογής και βελτίωσης. Αυτός ο κύκλος καθιστά την τεχνολογία αυτή διαφορετική από τις πιο παραδοσιακές μεθόδους μοντελοποίησης, όπου ο έλεγχος των υποθέσεων είναι μια πολύ πιο περίπλοκη και χρονοβόρα εργασία, (Jones κ.ά., 2020).

Συνεπώς, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από το DT, μπορούμε να προβλέψουμε την αποτελεσματικότητα και τις αποτυχίες των φυσικών συστημάτων. Επιπλέον, το DT μπορεί να μεταδίδει συνεχώς προβλέψεις και οδηγίες για τη συντήρηση του συστήματος και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του στο φυσικό του δίδυμο, σε ειδικούς που εμπλέκονται και λαμβάνουν τις πληροφορίες και σε άλλα DT που πιθανόν να περιλαμβάνονται σε ένα δίκτυο, (Barricelli κ.ά., 2019).



### 3.4 ΤΥΠΟΙ DT – ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Παρά τις διαφορετικές ερμηνείες για τα χαρακτηριστικά ενός ψηφιακού δίδυμου, υπάρχουν και άλλοι όροι που χρησιμοποιούνται εν μέρει ως συνώνυμοι. Σε αυτήν την προσπάθεια περιλαμβάνονται όροι όπως «άβαταρ προϊόντος», «ψηφιακό μοντέλο», «ψηφιακό νήμα» και «ψηφιακή σκιά». Οι 2 τελευταίοι όροι μαζί με το ψηφιακό δίδυμο αποτελούν τους πλέον διαδεδομένους και σε χρήση όρους.

Οι Boschert και Rosen (2016), αναφέρουν πως η Πολεμική Αεροπορία των ΗΠΑ (United States Air Force – USAF), εκτός από την έννοια του DT εισήγαγε και την έννοια του ψηφιακού νήματος για την απόκτηση νέου υλικού με σκοπό την επιτάχυνση της εγκατάστασης, της ανάπτυξης, της χρήσης και της ενσωμάτωσης των εργαλείων ψηφιακού σχεδιασμού σε όλο τον κύκλο ζωής της απόκτησης.

Οι Kritzinger κ.ά. (2018), ταξινομούν τα DT σε τρεις υποκατηγορίες (ψηφιακό μοντέλο, ψηφιακή σκιά, ψηφιακό δίδυμο), ανάλογα με το επίπεδο ολοκλήρωσης των δεδομένων τους. Σε μια βιβλιογραφική ανασκόπηση, οι Riesener κ.ά. (2019), εντόπισαν 21 δημοσιεύσεις από το 2011 έως το 2019 που χρησιμοποιούσαν έναν ή περισσότερους από τους τρεις πιο διαδεδομένους όρους. Μόνο πέντε από αυτές εξέτασαν αποκλειστικά τον όρο Digital Twins, τέσσερις χρησιμοποίησαν τον όρο Digital Thread, πέντε τον όρο Digital Shadow. Οι υπόλοιπες επτά δημοσιεύσεις χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό τουλάχιστον δύο από τους όρους.

#### 3.4.1 *ΑΒΑΤΑΡ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ – PRODUCT AVATAR*

Το άβαταρ θεωρείται η αναπαράσταση ενός αντικειμένου στον εικονικό κόσμο. Οι Hribernik κ.ά. (2005), στην εργασία τους μετέφεραν την έννοια στην PLM και όρισαν το άβαταρ προϊόντος ως μια κατανεμημένη και αποκεντρωμένη προσέγγιση για τη διαχείριση των πληροφοριών προϊόντος κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Συνοπτικά πρόκειται για ένα εργαλείο διαχείρισης πληροφοριών του προϊόντος, όπου το προϊόν είναι ευφυής οντότητα.

Σύμφωνα με τους Barricelli κ.ά. (2019), στη βιβλιογραφία η έννοια του DT συγκρίνεται με εκείνη του άβαταρ προϊόντος, το οποίο είναι το ψηφιακό αντίγραφο ή το σύνολο των ψηφιακών αντιγράφων ενός ευφυούς ή έξυπνου προϊόντος, όπου τα ευφυή



προϊόντα είναι φυσικά αντικείμενα που μπορούν να μεταφερθούν, να υποστούν επεξεργασία ή να χρησιμοποιηθούν και έχουν τη δυνατότητα να ενεργούν με ευφυΐα. Έχουν κατασκευαστεί για να επιτρέπουν σε κάθε χρήστη ή ενδιαφερόμενο την πρόσβαση στα χαρακτηριστικά και τις υπηρεσίες του έξυπνου προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του.

Η διάκριση μεταξύ του DT και του άβαταρ προϊόντος έγκειται στο ότι παρήχθησαν από δύο διαφορετικές γραμμές έρευνας, έχουν διαφορετικές ικανότητες και ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς στόχους. Συγκεκριμένα, ενώ το DT έχει τη νοημοσύνη να δημιουργεί ενέργειες στο φυσικό του δίδυμο, η νοημοσύνη του άβαταρ προϊόντος περιορίζεται στη δημιουργία ενός ακριβούς εικονικού αντίγραφου του φυσικού του διδύμου (Rios κ.ά., 2015).

#### 3.4.2 ΨΗΦΙΑΚΟ ΝΗΜΑ – DIGITAL THREAD

Σύμφωνα με τους Riesener κ.ά. (2019), το ψηφιακό νήμα νοείται ως ένα μοντέλο που συλλέγει και ενσωματώνει πληροφορίες για ένα προϊόν καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του προϊόντος. Η ενίσχυση της ροής δεδομένων μεταξύ της μηχανικής, της παραγωγής, των επιχειρησιακών λειτουργιών και σε όλες τις αλυσίδες εφοδιασμού είναι ο κύριος στόχος του. Ένα τέτοιο ψηφιακό νήμα επιτρέπει τον σχεδιασμό σε πραγματικό χρόνο, τη συνεργατική ανάπτυξη ροών διεργασιών και την πλήρη ιχνηλασιμότητα διεργασιών σε μια απρόσκοπτη συνεργατική ανάπτυξη σε πραγματικό χρόνο.

Σύμφωνα με τους Boschert and Rosen (2016), το ψηφιακό νήμα είναι η δημιουργία ενός ψηφιακού υποκατάστατου και θεωρείται μια τεχνική περιγραφή του συστήματος που βασίζεται στη φυσική και παράγεται, διαχειρίζεται και εφαρμόζεται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, χρησιμοποιώντας πραγματικού χρόνου και ιστορικά δεδομένα. Το ψηφιακό δίδυμο και το ψηφιακό νήμα είναι παρόμοια, καθώς και τα δυο βασίζονται στην ίδια ιδέα της χρήσης μοντέλων προσομοίωσης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πραγματικού συστήματος και διαφοροποιούνται μόνο όσον αφορά στην θέση του κύκλου ζωής.

Οι κύριες διαφορές μεταξύ του ψηφιακού νήματος και του ψηφιακού διδύμου είναι η ικανότητα του διδύμου να επεξεργάζεται τα δεδομένα αντί να τα συλλέγει απλώς και η ανατροφοδότηση δεδομένων, με σκοπό την βελτίωση της φυσικής οντότητας, ενώ η



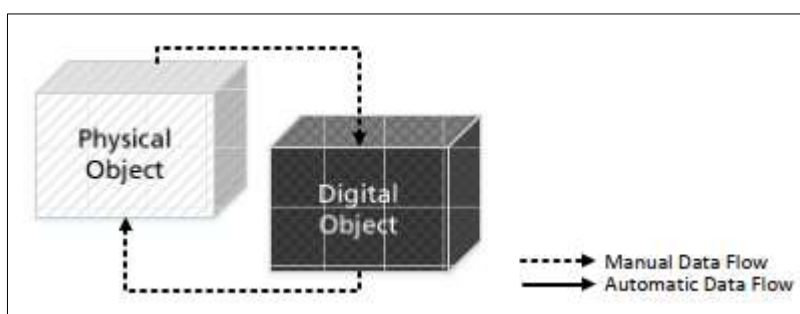
ανατροφοδότηση δεν είναι υποχρεωτική για ένα ψηφιακό νήμα, (van der Valk κ.ά., 2022).

### 3.4.3 ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ – DIGITAL MODEL

Το ψηφιακό μοντέλο (Σχήμα 3.2), θεωρείται απλώς μια εικονική απεικόνιση ενός φυσικού αντικειμένου, χωρίς διασύνδεση μεταξύ του πραγματικού και του εικονικού χώρου. Η ψηφιακή απεικόνιση του φυσικού αντικειμένου μπορεί να περιλαμβάνει μια όχι και τόσο υψηλής πιστότητας περιγραφή του φυσικού αντικειμένου.

Τα μοντέλα αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν μοντέλα προσομοίωσης σχεδιαζόμενων εργοστασίων, μαθηματικά μοντέλα νέων προϊόντων ή οποιαδήποτε άλλα μοντέλα ενός φυσικού αντικειμένου τα οποία δεν περιλαμβάνουν κανενός είδους αυτόματη ενοποίηση δεδομένων με την ανταλλαγή δεδομένων να πραγματοποιείται χειροκίνητα. Επιπλέον, ένα ψηφιακό μοντέλο δεν έχει τη δυνατότητα να χειρίζεται και να επεξεργάζεται κάθε είδους δεδομένα. Μια αλλαγή στην κατάσταση του φυσικού αντικειμένου δεν επηρεάζει άμεσα την ψηφιακή οντότητα και το αντίστροφο.

Συνεπώς το ψηφιακό μοντέλο θεωρείται ως μέρος ενός ψηφιακού δίδυμου με την έννοια ότι παρέχει την εικονική απεικόνιση του φυσικού αντικειμένου καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του, (Kritzinger κ.ά., 2018; van der Valk κ.ά., 2022).



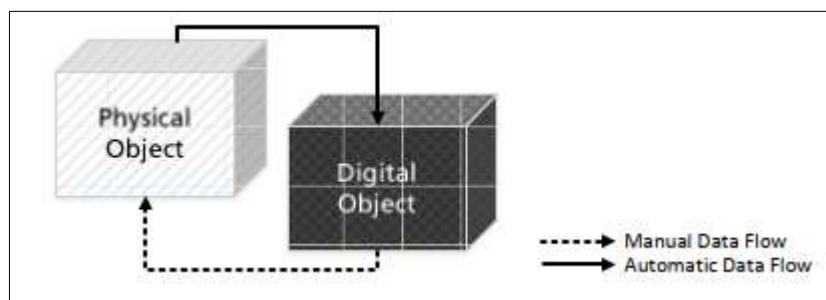
**Σχήμα 3.2:** Ροή δεδομένων σε ένα Ψηφιακό μοντέλο (Kritzinger κ.ά., 2018)

### 3.4.4 ΨΗΦΙΑΚΗ ΣΚΙΑ – DIGITAL SHADOW

Ο όρος ψηφιακή σκιά (Σχήμα 3.3), προβάλλει τον πραγματικό χώρο στον εικονικό χώρο, ώστε να δημιουργηθεί μια όσο το δυνατόν ακριβέστερη αναπαράσταση του φυσικού αντικειμένου, (Trauer κ.ά., 2020).



Σύμφωνα με τους Kritzinger κ.ά. (2018), στην έννοια της ψηφιακής σκιάς υπάρχει επιπλέον, από την έννοια του ψηφιακού μοντέλου, μια αυτοματοποιημένη μονόδρομη ροή δεδομένων μεταξύ της κατάστασης ενός υπάρχοντος φυσικού αντικειμένου και ενός ψηφιακού αντικειμένου. Μια αλλαγή στην κατάσταση του φυσικού αντικειμένου οδηγεί σε αλλαγή κατάστασης στο ψηφιακό αντικείμενο, αλλά όχι το αντίστροφο. Επιπλέον, μια εσωτερική επεξεργασία δεδομένων δεν θεωρείται απαραίτητη για μια ψηφιακή σκιά (van der Valk κ.ά., 2022). Συνεπώς, η ψηφιακή σκιά αντιπροσωπεύει μια ψηφιακή έκδοση ενός ψηφιακού διδύμου, αλλά όχι ένα ισοδύναμο αντίστοιχο.



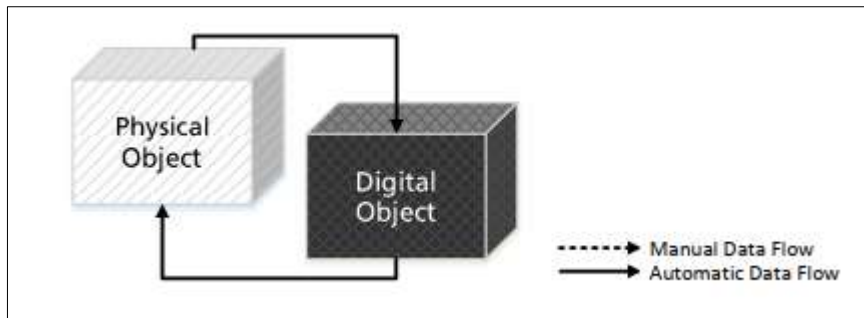
**Σχήμα 3.3:** Ροή δεδομένων σε μία Ψηφιακή σκιά (Kritzinger κ.ά., 2018)

#### 3.4.5 ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ – DIGITAL TWIN

Η έννοια του ψηφιακού διδύμου (Σχήμα 3.4), προβάλλει την ακριβέστερη πιστότητα αναπαράστασης του φυσικού αντικειμένου και βρίσκεται στο μέγιστο επίπεδο ολοκλήρωσης καθώς οι ροές δεδομένων μεταξύ του φυσικού αντικειμένου και ενός ψηφιακού αντικειμένου είναι πλήρως ενοποιημένες και προς τις δύο κατευθύνσεις. Συνεπώς, κάθε αλλαγή στην κατάσταση του φυσικού αντικειμένου, όπως αυτή καταγράφεται από τους αισθητήρες του, αντικατοπτρίζεται στο ψηφιακό αντικείμενο. Επιπλέον, το ψηφιακό αντικείμενο είναι σε θέση να μεταβάλει την κατάσταση του φυσικού αντικειμένου μέσω των ενεργοποιητών, (Kritzinger κ.ά., 2018; Trauer κ.ά., 2020). Όταν επιτευχθεί το μέγιστο επίπεδο ολοκλήρωσης, μόνο τότε το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές του. Η χρησιμότητά του περιορίζεται εάν οι καταστάσεις των εικονικών και φυσικών οντοτήτων δεν συγχρονίζονται αμφίδρομα, (Andrade κ.ά., 2021)



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”



**Σχήμα 3.4:** Ροή δεδομένων σε ένα Ψηφιακό δίδυμο (Kritzinger κ.ά., 2018)

### 3.5 ΣΤΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η ανάπτυξη ενός DT, υπερβαίνει την δημιουργία ενός 3D μοντέλου. Συνιστά την κατασκευή ενός δυναμικού, ζωντανού συστήματος που σκοπός της ανάπτυξής του είναι η παραγωγή αξίας. Στην βιβλιογραφία, το DT αντιμετωπίζεται ως ένα οικοσύστημα όπου οι φυσικοί νόμοι, οι ροές δεδομένων και οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης συγκλίνουν για να εξαλείψουν την αβεβαιότητα στη λήψη αποφάσεων.

Όπως προαναφέρθηκε, ενώ το αρχικό μοντέλο του Grieves (2014), περιέγραφε 3 συστατικά στοιχεία, πολλές από τις έρευνες, (Wu κ.ά., 2020, Hassan κ.ά., 2024; Mao κ.ά., 2025), συγκλίνουν στο Μοντέλο των 5 Διαστάσεων (Εξίσωση 1), που αναπτύχθηκε από τους Ταο κ.ά. (2019b), το οποίο προσφέρει ένα πληρέστερο πλαίσιο καθοδήγησης για τη διαδικασία της μοντελοποίησης.

Στο αρχικό μοντέλο 3 διαστάσεων τα δεδομένα θεωρούνταν συστατικό της σύνδεσης, αποτελούμενο αποκλειστικά από ρευστές πληροφορίες. Ωστόσο, η έλευση του IoT, των Big Data, των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless sensor networks – WSNs), των συστημάτων αναγνώρισης RFID, των ενσωματωμένων συστημάτων, έχουν καταστήσει τον όγκο και την ποικιλομορφία των δεδομένων ουσιαστικούς παράγοντες, οι οποίοι δεν μπορούν πλέον να αντιμετωπίζονται ως απλά μέσα μεταφοράς. Πλέον, τα δεδομένα δεν προέρχονται αποκλειστικά από αισθητήρες. Προέρχονται από ετερογενείς πηγές, όπως ιστορικά αρχεία, προσομοιώσεις, εμπειρική γνώση, επιχειρησιακά δεδομένα καθώς και εξωτερικά περιβαλλοντικά δεδομένα (π.χ. μετεωρολογικά).

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (1)$$

όπου, PE: Φυσική Οντότητα (Physical Entity),



VE: Εικονική Οντότητα (Virtual Entity),

Ss: Υπηρεσίες (Service system),

DD: Δεδομένα Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin Data),

CN: Συνδέσεις (Connections)

Στο μοντέλο 5 διαστάσεων τα δεδομένα και οι υπηρεσίες αντιμετωπίζονται ως ισοδύναμες οντότητες. Η νέα διάσταση των δεδομένων περιλαμβάνει τη συγχώνευση, η οποία αφορά στον αλγοριθμικό καθαρισμό, την ενοποίηση και την προεπεξεργασία δεδομένων από διάφορες πηγές, διαδικασίες οι οποίες συντελούν και στην εκπαίδευση των μοντέλων ML.

Επιπροσθέτως, η έμφαση στις υπηρεσίες είναι απολύτως συνεπής με τις απαιτήσεις της Βιομηχανίας 4.0, αναγνωρίζοντας πως η αξία του DT δεν προκύπτει απλώς από την ακρίβεια του μοντέλου, αλλά και από την ικανότητά του να χειρίζεται τεράστιο όγκο πληροφοριών και να προσφέρει πρακτικά οφέλη (προσομοίωση, βελτιστοποίηση και πρόγνωση ως τυποποιημένες λειτουργίες) στον χρήστη, (Yao κ.ά., 2023).

Ακολουθεί ο ρόλος και η εμπειρική στάθμιση της συμβολής των 5 βασικών πυλώνων, βασισμένη στο πενταδιάστατο μοντέλο του Ταο, (Ταο κ.ά., 2019).

#### 1. Φυσική οντότητα (PE)

**Ρόλος:** Καθορίζει τι αναπαρίσταται και ποιες μεταβλητές έχουν σημασία. Παράγει πρωτογενή δεδομένα μέσω αισθητήρων, που χρησιμεύουν ως σημείο αναφοράς για την πραγματικότητα.

**Στάθμιση:** Στην φάση λειτουργίας η φυσική οντότητα παίζει σημαντικό ρόλο αφού απαιτείται η παρατηρησιμότητα μέσω των αισθητήρων (sensing), ενώ σε κάποιες περιπτώσεις απαιτούνται και ενέργειες ελέγχου/ενεργοποίησης (actuating).

Στην φάση του σχεδιασμού το φυσικό αντικείμενο μπορεί να μην έχει κατασκευαστεί ακόμα. Συνεπώς, το βάρος μετατοπίζεται στην εικονική οντότητα και στην αποτελεσματικότητα των μοντέλων και των προσομοιώσεων να προβλέπουν την συμπεριφορά της φυσικής οντότητας όταν κατασκευαστεί.

#### 2. Εικονική οντότητα (VE)

**Ρόλος:** Αποτελεί τον μηχανισμό πρόβλεψης. Ενσωματώνει γεωμετρικά, φυσικά, συμπεριφορικά και μοντέλα κανόνων για να προσομοιώνει τη φυσική συμπεριφορά.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**Στάθμιση:** Σημαντικό ζήτημα αποτελεί η χρονική στιγμή κατά την οποία δημιουργείται η εικονική οντότητα καθώς αυτή μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία της, (Voas κ.ά., 2025).

Στην περίπτωση που η εικονική οντότητα δημιουργείται πριν από την φυσική οντότητα κατά την φάση του σχεδιασμού, επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός πιστότητας (fidelity).

Ενώ, στην περίπτωση κατά την οποία η εικονική οντότητα δημιουργείται μετά το φυσικό αντικείμενο μπορεί να μειωθεί η πιστότητα του DT, καθώς μπορεί να υπάρχουν εσωτερικοί άγνωστοι παράγοντες (π.χ. φθορές που δεν φαίνονται, τροποποιήσεις σε κυκλώματα κ.ά.), που δεν μπορούν να ληφθούν υπόψιν για την δημιουργία των μοντέλων.

### 3. Υπηρεσίες (Ss)

**Ρόλος:** Οι υπηρεσίες είναι το πλαίσιο όπου τα δεδομένα που έχουν συλλεγεί και αξιοποιηθεί κατάλληλα μετατρέπονται σε απτό αποτέλεσμα.

Λειτουργούν ως η διεπαφή μεταξύ του DT και του τελικού χρήστη. Προσφέρουν πληροφορίες όπως προληπτική συντήρηση, παρακολούθηση της κατάστασης, διάγνωση βλαβών.

**Στάθμιση:** Έχει λειτουργική χρησιμότητα: Καθορίζει την εμπειρία χρήστη και την απόδοση επένδυσης (ROI) (Qi κ.ά., 2021). Μέσω των υπηρεσιών τα δεδομένα μετατρέπονται σε εργαλεία λήψης αποφάσεων.

**Κρισιμότητα:** Ένα DT όσο ακριβές κι αν είναι, αλλά στερείται καλά καθορισμένων υπηρεσιών, καταλήγει να είναι εμπορικά και λειτουργικά αναποτελεσματικό.

### 4. Δεδομένα (DD)

**Ρόλος:** Ενσωματώνει τη συγχώνευση δεδομένων από αισθητήρες, προσομοιώσεις και ιστορικά αρχεία και μπορεί να παρέχει πιο ακριβείς και ολοκληρωμένες πληροφορίες μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων.

**Στάθμιση:** Ενεργοποιητής νοημοσύνης: Λειτουργεί οριζόντια σε ολόκληρο το σύστημα (Tao, 2019b). Η αξία τους αυξάνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, καθώς μέσω της ML τα μοντέλα εκπαιδεύονται και τα δεδομένα αναδεικνύονται τελικά



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

ως το κύριο στοιχείο βελτιστοποίησης, συχνά επισκιάζοντας τα αρχικά φυσικά μοντέλα.

#### 5. Συνδέσεις (CN)

**Ρόλος:** Είναι ο δίαυλος για την επικοινωνία και για μετάδοση οδηγιών κατάστασης και ελέγχου μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Η ποιότητα καθορίζεται από την καθυστέρηση (latency), το εύρος ζώνης δεδομένων (bandwidth) και την σταθερότητα και ασφάλεια της επικοινωνίας (reliability).

**Στάθμιση:** Οι συνδέσεις είναι καθοριστικές για τον συνεχή συγχρονισμό μεταξύ φυσικής και ψηφιακής οντότητας (real-time synchroniaztion) και για την αμφίδρομη επικοινωνία.

Οι Jones κ.ά., (2020) υποστηρίζουν ότι οι συνδέσεις διακρίνουν το «ψηφιακό δίδυμο» από την «ψηφιακή σκιά».

**Κρισιμότητα:** Σε εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, οι καθυστερήσεις ή οι αστάθειες της σύνδεσης ενδέχεται να υπονομεύσουν την αποτελεσματικότητα του συστήματος και να μειώσουν την αξιοπιστία των προβλέψεων και των αποφάσεων.

Η αξία ενός DT παραμένει υψηλή από την ισορροπία και την αλληλεπίδραση μεταξύ των διαστάσεων της αρχιτεκτονικής του και όχι όταν υπάρχει υπεροχή ενός μόνο στοιχείου.

### 4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ

Η υλοποίηση ενός DT προϋποθέτει μια ποικιλία τεχνολογιών για την υποστήριξη των διαφόρων συστατικών στοιχείων του DT. Τεχνολογίες, όπως το IoT, το υπολογιστικό νέφος (clouding computing), η Big Data ανάλυση, η VR/AR, η AI και η ML, αποτελούν κίνητρο για την ανάπτυξη και την επιτυχία της ιδέας του DT.

Η εξέλιξη του IoT τις τελευταίες δύο δεκαετίες, έχει επιφέρει μετασχηματισμό στον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται και ανταλλάσσονται τα δεδομένα μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων και ενεργοποιητών που διασυνδέονται διαδικτυακά. Η συνεχής ροή δεδομένων χαρακτηρίζεται από τα «4V» των μεγάλων δεδομένων: όγκο (Volume), ποικιλία (Variety), ταχύτητα (Velocity) και αξία (Value), (Barricelli κ.ά., 2019). Η αποτελεσματική αξιοποίησή τους είναι καθοριστική για την επίτευξη ενός



DT, καθώς επιτρέπει την ανάλυση και την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών, (Banica and Stefan, 2019).

Η ενσωμάτωση των τεχνολογιών γνώσης, ανίχνευσης και μέτρησης διευκολύνει την απεικόνιση φυσικών οντοτήτων και διαδικασιών στον εικονικό χώρο, ενισχύοντας έτσι την ακρίβεια και την εγγύτητα των μοντέλων στην πραγματικότητα. Η αξιοποίηση ποικίλων τεχνολογιών μοντελοποίησης είναι επιβεβλημένη για το εικονικό μοντέλο. Η εκμετάλλευση τεχνολογιών οπτικοποίησης είναι ζωτικής σημασίας για τον σκοπό της παρακολούθησης φυσικών περιουσιακών στοιχείων και διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια των ψηφιακών αναπαραστάσεων έχει άμεσο αντίκτυπο στην αποτελεσματικότητα του DT. Σύμφωνα με τους Qi κ.ά. (2021), η αξιοπιστία του μοντέλου εξαρτάται από διαδικασίες επαλήθευσης, επικύρωσης και διαπίστευσης (Verification Validation and Accreditation – VV&A) καθώς και διαδικασίες βελτιστοποίησης με την χρήση αλγορίθμων.

Ένα DT κατά τη λειτουργία του παράγει τεράστιο όγκο δεδομένων. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η χρήση προηγμένων τεχνολογιών ανάλυσης δεδομένων και συγχώνευσης για την εξαγωγή πολύτιμων πληροφοριών από τα ακατέργαστα δεδομένα. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συλλογή, τη μετάδοση, την αποθήκευση, την επεξεργασία, τη συγχώνευση και την οπτικοποίηση των δεδομένων.

Η φυσική οντότητα και το εικονικό μοντέλο του DT συνδέονται τελικά μεταξύ τους για να διευκολύνουν τις αλληλεπιδράσεις και την ανταλλαγή πληροφοριών. Στη σύνδεση εμπλέκονται τεχνολογίες διαδικτύου, τεχνολογίες αλληλεπίδρασης, τεχνολογίες κυβερνοασφάλειας, τεχνολογίες διασύνδεσης, πρωτόκολλα επικοινωνίας κ.λπ.

Οι παρακάτω ενότητες παρουσιάζουν μια ανάλυση των τεχνολογιών και των μοντέλων που υποστηρίζουν την δημιουργία ενός DT.

#### 4.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΦΥΣΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Τα στοιχεία υλικού θα αποτελούνται από αισθητήρες, μετρητές, ενεργοποιητές και ενσωματωμένη επικοινωνία, ενώ για τον συγχρονισμό του εικονικού μοντέλου με το αντίστοιχο μοντέλο του πραγματικού κόσμου, πρέπει να συλλέγονται δεδομένα πραγματικού χρόνου. Το IoT διευκολύνει την απόκτηση δεδομένων σε πραγματικό



χρόνο. Σύμφωνα με τους Semeraro κ.ά. (2021), οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται συνήθως για την απόκτηση δεδομένων στο πλαίσιο ενός DT περιλαμβάνουν:

- Ταυτοποίηση ραδιοσυχνοτήτων (RFID): Το RFID είναι μια τεχνολογία που διευκολύνει τη διαδικασία αυτόματης ταυτοποίησης και συλλογής δεδομένων μέσω της χρήσης ραδιοκυμάτων, μιας ετικέτας (πομποδέκτη) και ενός αναγνώστη (αισθητήρα), ο οποίος ανακτά τα δεδομένα από την ετικέτα RFID. Οι αναγνώστες RFID έχουν ενσωματωμένα μια κεραία και μια μονάδα ελέγχου.
- Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN): Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από αυτοδιαχειριζόμενες συσκευές εξοπλισμένες με αισθητήρες που κατανέμονται στο χώρο για την παρακολούθηση περιβαλλοντικών ή φυσικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία, ο ήχος, η δόνηση, η πίεση, η υγρασία, η κίνηση ή οι ρύποι.
- Δίκτυα αισθητήρων RFID: Αποτελούνται από τεράστιο αριθμό κόμβων που χρησιμοποιούνται με σκοπό την παρακολούθηση και την καταγραφή των φυσικών συνθηκών του περιβάλλοντος, (Mihai κ.ά., 2022).
- Αισθητήρες IoT: Αισθητήρες που έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν ένα ευρύ φάσμα τύπων δεδομένων, όπως κείμενο, ήχο, εικόνες RGB, υπερφασματικές & υπέρυθρες εικόνες και βίντεο, LIDARs. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να εγκατασταθούν σε κινούμενα οχήματα, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, μικρούς δορυφόρους, υποβρύχια οχήματα, αυτόνομα οχήματα και σκάφη, (Rasheed κ.ά., 2020; Botín-Sanabria κ.ά., 2022).

Κάθε προβλεπόμενη λειτουργία που πραγματοποιείται από τις φυσικές οντότητες, επιτηρείται από ένα σύστημα ελέγχου το οποίο οδηγεί τους ενεργοποιητές τους ώστε να ολοκληρώσουν με ακρίβεια τις καθορισμένες ενέργειες. Η διαδικασία περιλαμβάνει ένα φάσμα τεχνολογιών ισχύος (π.χ. υδραυλική ισχύς, ηλεκτρική ισχύς, ισχύς καυσίμου), διάφορα συστήματα κίνησης (π.χ. μετάδοση χωρίς άξονα, μετάδοση με έδρανα, μετάδοση με γρανάζια, μετάδοση με ιμάντα, μετάδοση με αλυσίδα και τεχνολογίες σερβοκινητήρων), καθώς και τεχνολογίες ελέγχου (π.χ. ηλεκτρικός έλεγχος, υδραυλικός έλεγχος, έλεγχος δικτύου).



## 4.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Η εικονική μοντελοποίηση και η προσομοίωση είναι οι βασικές πτυχές ενός DT, καθώς επιτρέπει την ακριβή απεικόνιση της φυσικής οντότητας. Ως εκ τούτου το DT μπορεί να υπηρετήσει τον σκοπό για τον οποίο δημιουργείται.

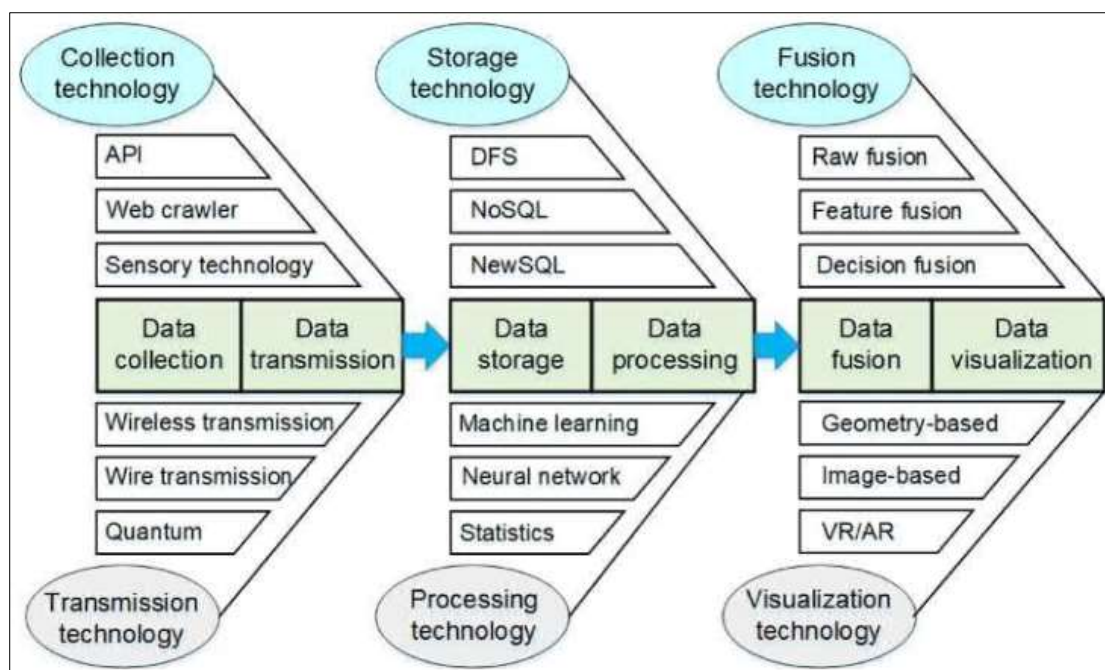
Το εικονικό μέρος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο διασυνδεδεμένων στρωμάτων, που περιλαμβάνει μοντέλα και αναλύσεις βασισμένα σε δεδομένα και μοντέλα βασισμένα στη φυσική, (Semerano κ.ά., 2021).

Ο τομέας της μοντελοποίησης και προσομοίωσης περιλαμβάνει την αναπαράσταση φυσικών οντοτήτων και των αντίστοιχων συμπεριφορών τους μέσα σε ένα ψηφιακό ή εικονικό περιβάλλον. Τα ψηφιακά παράγωγα που προκύπτουν μπορούν να διαχειριστούν να αναλυθούν και να υποστούν επεξεργασία μέσω των υπολογιστών, (Qi κ.ά., 2021). Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, ένα μοντέλο αναφέρεται σε μια σταθερή απεικόνιση του απτού αντικειμένου. Οι σημερινές τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν στο μοντέλο να είναι μια τρισδιάστατη αναπαράσταση που παρουσιάζει ακρίβεια ως προς τη διαστασιολόγηση. Η συμπεριφορά του φυσικού προϊόντος μοντελοποιείται μαθηματικά με την περιγραφή των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό, καθώς και των δυνάμεων που παράγει και εφαρμόζει στο περιβάλλον.

Η διαδικασία της προσομοίωσης χαρακτηρίζεται από δυναμική συμπεριφορά καθώς ενσωματώνει την συνιστώσα του χρόνου και περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο η φυσική οντότητα μεταβάλλεται υπό την επίδραση εξωτερικών δυνάμεων, καθώς και την αμοιβαία επίδραση της φυσικής οντότητας στο περιβάλλον της. Το μαθηματικό μοντέλο συμπεριφοράς των δυνάμεων παρατηρείται ότι μετασχηματίζει το υλικό, όπως αποδεικνύεται από τις αλλαγές στη γεωμετρία που καταδεικνύονται μέσω της προσομοίωσης, (Grieves, 2022).

### 4.1.1 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Το σημαντικό σε αυτήν την φάση είναι η άντληση πληροφοριών από τα δεδομένα. Μια τέτοια ενέργεια απαιτεί την επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων και μάλιστα ετερογενών. Οι βασικές πτυχές που εμπλέκονται στην μοντελοποίηση με βάση τα δεδομένα είναι η συλλογή, η μετάδοση, η αποθήκευση, η επεξεργασία, η συγχώνευση και η οπτικοποίησή τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1:** Τεχνολογίες που επιτρέπουν τη διαχείριση των δεδομένων του ψηφιακού δίδυμου, (Qi κ.ά., 2021)

- Τεχνολογίες συλλογής δεδομένων

Η συλλογή βασίζεται σε πηγές δεδομένων που περιλαμβάνουν διάφορα στοιχεία, όπως υλικό, λογισμικό και υποδομή δικτύου. Τα δεδομένα υλικού περιλαμβάνουν τόσο στατικά δεδομένα χαρακτηριστικών όσο και δυναμικά δεδομένα κατάστασης.

Οι γραμμωτοί κώδικες, οι κωδικοί QR, οι συσκευές RFID, οι κάμερες, οι αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες IoT χρησιμοποιούνται εκτενώς για τον προσδιορισμό πληροφοριών και την αντίληψη σε πραγματικό χρόνο.

Τα δεδομένα λογισμικού μπορούν να αποκτηθούν με τη χρήση διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών λογισμικού (API) καθώς και ανοικτών διεπαφών βάσεων δεδομένων. Τα δεδομένα δικτύου μπορούν να αποκτηθούν από το Διαδίκτυο μέσω ανιχνευτών Ιστού (web crawlers), μηχανών αναζήτησης και δημόσιων διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (API).

- Τεχνολογίες μετάδοσης δεδομένων

Η μετάδοση επιτυγχάνεται τόσο με ενσύρματες όσο και με ασύρματες μεθόδους μετάδοσης. Τεχνολογίες ενσύρματης μετάδοσης, αποτελούν η μετάδοση με συνεστραμμένα καλώδια, η συμμετρική μετάδοση με καλώδια, η μετάδοση με



ομοαξονικά καλώδια και η μετάδοση με οπτικές ίνες, μεταξύ άλλων. Η ασύρματη μετάδοση περιλαμβάνει τεχνολογίες μικρής και μεγάλης εμβέλειας.

Οι ασύρματες τεχνολογίες μικρής εμβέλειας που χρησιμοποιούνται συνήθως, περιλαμβάνουν τις τεχνολογίες Zigbee, Bluetooth, Wi-Fi, UWB (Ultra-Wideband) και NFC (Near Field Communication).

Οι ασύρματες τεχνολογίες μεγάλων αποστάσεων περιλαμβάνουν διάφορες μεθόδους, όπως την ραδιοφωνική μετάδοση, τα μικροκύματα διασποράς φάσματος (Spread Spectrum Microwave), την ασύρματη γέφυρα (Wireless Bridge), την τεχνολογία LoRaWAN και την δορυφορική επικοινωνία, μεταξύ άλλων.

Εργαλεία όπως το Aspera της IBM, αναγνωρίζεται για την ικανότητά του να μεταδίδει αποτελεσματικά αρχεία σημαντικού μεγέθους, ακόμη και σε εκτεταμένες αποστάσεις και υπό κακές συνθήκες δικτύου.

Κατά την διαδικασία προετοιμασίας τα δεδομένα επιλέγονται, φιλτράρονται, μοντελοποιούνται, ενσωματώνονται (π.χ. σε διαδικασίες) και μετασχηματίζονται (σε μορφές που μπορούν να επεξεργαστούν από τον χρήστη).

- Τεχνολογίες αποθήκευσης δεδομένων

Τα δεδομένα αποθηκεύονται με σκοπό την επεξεργασία, ανάλυση και διαχείριση. Οι τεχνολογίες βάσεων δεδομένων είναι συνδεδεμένες με την αποθήκευση δεδομένων, αλλά λόγω της αυξανόμενης ποσότητας και ετερογένειας των δεδομένων πολλαπλών πηγών, έχουν καταστεί μη πρακτικές.

Το ενδιαφέρον πλέον, στρέφεται προς τις διάφορες τεχνολογίες αποθήκευσης μεγάλων δεδομένων, όπως η κατανεμημένη αποθήκευση αρχείων (DFS), οι βάσεις δεδομένων NoSQL, οι βάσεις δεδομένων NewSQL και η αποθήκευση στο νέφος.

Το DFS επιτρέπει σε πολλούς κεντρικούς υπολογιστές να έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση σε κοινόχρηστα αρχεία και καταλόγους μέσω του δικτύου.

Οι βάσεις δεδομένων NoSQL διακρίνονται από την ικανότητά τους να κλιμακώνονται οριζόντια προκειμένου να αντιμετωπίζουν μεγάλους όγκους δεδομένων.

Η NewSQL αναφέρεται σε μια κατηγορία βάσεων δεδομένων που έχουν σχεδιαστεί για να είναι τόσο κλιμακούμενες όσο και υψηλής απόδοσης. Αυτές οι βάσεις δεδομένων διαθέτουν τη δυνατότητα αποθήκευσης και διαχείρισης μεγάλου όγκου



δεδομένων, ενώ παράλληλα παρέχουν υποστήριξη των ιδιοτήτων ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) και της λειτουργικότητας SQL (Structured Query Language) που συνήθως συναντώνται στις παραδοσιακές βάσεις δεδομένων. Η NewSQL χρησιμοποιεί πλεονάζουσες μηχανές για την υλοποίηση μηχανισμών αντιγραφής και αποτυχίας, (Qi κ.ά, 2021).

- Τεχνολογίες επεξεργασίας δεδομένων

Η επεξεργασία πραγματοποιείται σε δεδομένα που λαμβάνουμε από ετερογενείς πηγές και χαρακτηρίζονται από μεγάλο όγκο και είναι αδόμητα, ασαφή και θορυβώδη. Σκοπός της επεξεργασίας είναι να εξαχθεί η γνώση και να ληφθούν οι κατάλληλες αποφάσεις για να αναπτυχθούν οι βέλτιστες στρατηγικές. Κατά συνέπεια, πρέπει να υποβληθούν σε προεπεξεργασία για την απομάκρυνση των περιττών, άσχετων, παραπλανητικών, διπλών και ασυνεπών δεδομένων.

Οι τεχνολογίες περιλαμβάνουν τον καθαρισμό δεδομένων, τη συμπίεση δεδομένων, την εξομάλυνση δεδομένων, τη μείωση δεδομένων, το μετασχηματισμό δεδομένων κ.λπ. Στη συνέχεια, τα προεπεξεργασμένα δεδομένα αναλύονται είτε μέσω στατιστικών μεθόδων, είτε μέσω μεθόδων νευρωνικών δικτύων (ANN), είτε μέσω μοντέλων που περιλαμβάνουν την ML και την βαθιά μάθηση (DL).

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN) και η DL είναι υπολογιστικά μοντέλα που αντλούν έμπνευση από την λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η DL προσφέρει εξελιγμένη τεχνολογία ανάλυσης για την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων μεγάλης κλίμακας. Οι κύριοι τομείς εφαρμογής των ANN και της DL στο πλαίσιο του DT είναι η αξιολόγηση της υγείας, η πρόβλεψη της απόδοσης και η διάγνωση βλαβών. Στο Σχήμα 4.2 απεικονίζονται πλειάδα εργαλείων επεξεργασίας δεδομένων.

- Τεχνολογίες συγχώνευσης δεδομένων

Η συγχώνευση δεδομένων είναι μια τεχνική που διαχειρίζεται αποτελεσματικά την ενσωμάτωση πολλαπλών πηγών δεδομένων χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως η σύνθεση, το φιλτράρισμα, η συσχέτιση και η ολοκλήρωση. Περιλαμβάνει τρία επίπεδα ολοκλήρωσης: συγχώνευση σε επίπεδο ακατέργαστων δεδομένων, συγχώνευση σε επίπεδο χαρακτηριστικών και συγχώνευση σε επίπεδο αποφάσεων.

Οι μέθοδοι σύντηξης δεδομένων περιλαμβάνουν διάφορες τεχνικές, όπως τυχαίες μεθόδους και προσεγγίσεις τεχνητής νοημοσύνης. Διάφορες μέθοδοι, όπως η κλασική



συλλογιστική, η μέθοδος σταθμισμένου μέσου όρου, το φιλτράρισμα Kalman, η εκτίμηση κατά Bayes και η συλλογιστική αποδείξεων Dempster-Shafer, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συγχώνευση δεδομένων και στα τρία επίπεδα. Διάφορες τεχνικές AI, όπως η θεωρία ασαφών συνόλων, η θεωρία αδρών συνόλων, τα νευρωνικά δίκτυα, η θεωρία κυματιδίων και οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη συγχώνευση δεδομένων τόσο στο επίπεδο χαρακτηριστικών όσο και στο επίπεδο αποφάσεων.

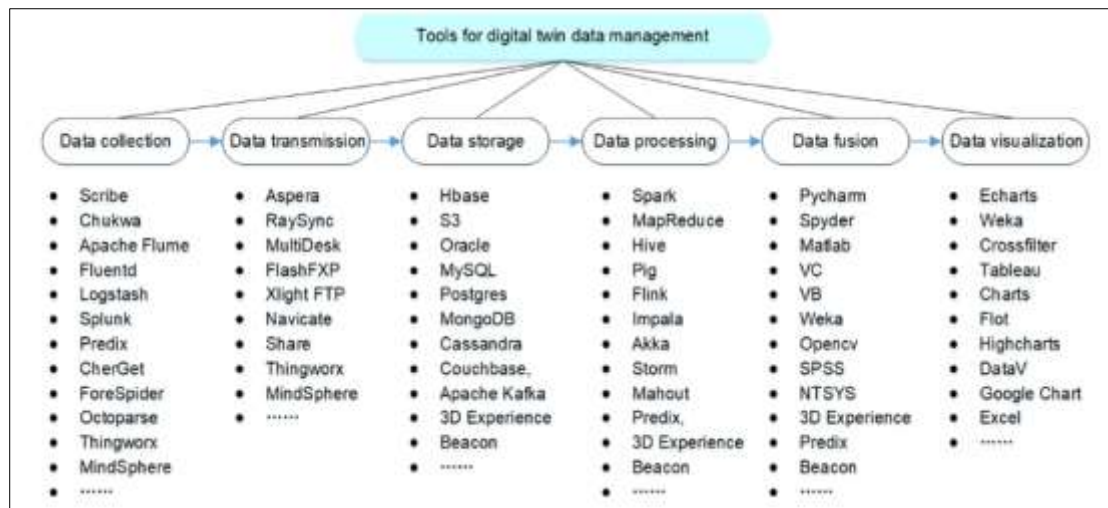
- Τεχνολογίες οπτικοποίησης δεδομένων

Σκοπός της οπτικοποίησης των δεδομένων είναι η αποτελεσματική παρουσίαση των ευρημάτων της ανάλυσής τους με σαφή και διαδραστικό τρόπο, ούτως ώστε τα συμπεράσματα και οι αποφάσεις να παράγονται ταχύτερα και με μικρότερο βαθμό ρίσκου και να είναι σαφώς πιο κατανοητά για τον χρήστη.

Η οπτικοποίηση των δεδομένων εκφράζεται μέσω μιας σειράς μορφών, συμπεριλαμβανομένων, μεταξύ άλλων, ιστογραμμάτων, γραφημάτων πίτας, γραμμικών διαγραμμάτων, χαρτών, γραφημάτων φυσαλίδας, δενδροδιαγραμμάτων, πινάκων οργάνων κ.ά. Βάσει της αρχής οπτικοποίησης, οι μέθοδοι αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορους τύπους, όπως τεχνολογίες που βασίζονται στη γεωμετρία, τεχνολογίες που βασίζονται σε pixels, τεχνολογίες που βασίζονται σε εικονίδια, τεχνολογίες που βασίζονται σε στρώματα, τεχνολογίες που βασίζονται σε εικόνες κ.ά., (Qi and Tao, 2018; Qi κ.ά., 2021).

Τα πιο διαδεδομένα εργαλεία που χρησιμοποιούνται με βάση παράγοντες όπως η ευκολία χρήσης, η αποτελεσματικότητα, το κόστος, η προσαρμογή, η ασφάλεια δεδομένων και η δυνατότητα κοινής χρήσης δεδομένων είναι τα Tableau, Qlik Sense, Looker, Klipfolio, Google Charts, Microsoft Power BI, Excel, κ.ά., (Haan, 2024).

Με τη συνεχή αύξηση του όγκου των δεδομένων, είναι αναπόφευκτο να σημειωθούν εξελίξεις στις υπάρχουσες τεχνολογίες δεδομένων, ενώ είναι επιτακτική ανάγκη να δοθεί μεγάλη έμφαση στις τεχνολογίες απόκτησης και μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.



**Σχήμα 4.2:** Εργαλεία για τη διαχείριση δεδομένων DT, (Qi κ.ά., 2021)

#### 4.1.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΦΥΣΙΚΗ

Στον εικονικό χώρο το μοντέλο DT με βάση τη φυσική, μπορεί να αναπαρασταθεί σε τέσσερις διακριτές διαστάσεις όπως, γεωμετρία, φυσική, συμπεριφορά και κανόνας, με βάση τα χαρακτηριστικά της αντίστοιχης φυσικής οντότητας.

- Γεωμετρικό μοντέλο – Τεχνολογία

Το γεωμετρικό μοντέλο αφορά την περιγραφή του γεωμετρικού σχήματος της φυσικής οντότητας και τυπολογικές πληροφορίες. Υποστηρίζεται από 3 τύπους τρισδιάστατης μοντελοποίησης (3D): μοντελοποίηση wireframe, μοντελοποίηση επιφανείας (surface) και μοντελοποίηση στερεού σώματος (solid). Με βάση την βιβλιογραφία, οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες γεωμετρικής μοντελοποίησης, είναι το νέφος σημείων, η μοντελοποίηση κτιριακών πληροφοριών BIM, η μοντελοποίηση γεωγραφικών δεδομένων GIS, (Ταο κ.ά., 2022).

Για την κατασκευή των μοντέλων των φυσικών οντοτήτων χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα λογισμικά 3D μοντελοποίησης όπως, τα Pro/E, CATIA, SolidWorks, Autodesk REVIT Surfer κ.ά., όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.3. Επιπλέον, η εισαγωγή των μοντέλων που κατασκευάζονται με τα προαναφερθέντα λογισμικά και εργαλεία σε διάφορες πλατφόρμες όπως οι Flexsim, Abaqus, Demo 3D, Unity3D και Siemens NX, επιτρέπει τη δημιουργία πιο σύνθετων γεωμετρικών δομών και παραγωγή κινούμενων σχεδίων, (Qi κ.ά., 2021; Ταο κ.ά., 2022).



- Φυσικό μοντέλο – Τεχνολογία

Το φυσικό μοντέλο είναι μια αναπαράσταση που αντικατοπτρίζει τα φυσικά χαρακτηριστικά, τις ιδιότητες και τους περιορισμούς του απτού αντικειμένου. Ενσωματώνει σχετικές λεπτομέρειες, συμπεριλαμβανομένων πληροφοριών ακριβείας (π.χ. ανοχές διαστάσεων, σχήματος, θέσης και τραχύτητα επιφάνειας), προδιαγραφές υλικού (π.χ. τύπος υλικού, επιδόσεις, απαίτηση θερμικής επεξεργασίας, σκληρότητα κ.λπ.) και στοιχεία συναρμολόγησης (π.χ. σχέση αντιστοίχισης και σειρά συναρμολόγησης).

Η βασική τεχνολογία μοντελοποίησης για το φυσικό μοντέλο περιλαμβάνει, την τεχνολογία ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η οποία χρησιμοποιεί μαθηματικές προσεγγίσεις για την ανάπτυξη μοντέλων υλικών, φορτίων, περιορισμών και μηχανικών ιδιοτήτων της φυσικής οντότητας. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται επιπλέον τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη φυσική μοντελοποίηση, όπως η σημειογραφία Denavit-Hartenberg (D-H notation), η αντικειμενοστραφής μέθοδος μοντελοποίησης, η επαύξηση δεδομένων και η μοντελοποίηση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD), κ.ά.

Το Ansys και το Abaqus είναι λογισμικά ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, το Simulink μπορεί να περιγράψει τις φυσικές έννοιες πίσω από τις φυσικές οντότητες και τις φυσικές συνδέσεις μεταξύ των μεταβλητών. Το OpenModelica, μια αντικειμενοστραφής και πολυτομεακή γλώσσα μοντελοποίησης, κατασκευάζει γενικά φυσικά μοντέλα μηχανικών, υδραυλικών, θερμικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Το PreComp είναι ένας κώδικας που ειδικεύεται στη δημιουργία δομικών ιδιοτήτων σύνθετων πτερυγίων, όπως η σταυροειδής δυσκαμψία. Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται επίσης και άλλα εργαλεία φυσικής μοντελοποίησης, όπως το MWorks, το λογισμικό Simcenter Amesim, το Flexsim, το Demo 3D και το Mechatronic Concept Designer.

- Μοντέλο συμπεριφοράς – Τεχνολογία

Το μοντέλο συμπεριφοράς, απεικονίζει τη δυναμική συμπεριφορά μιας φυσικής οντότητας τόσο σε εσωτερικούς όσο και σε εξωτερικούς μηχανισμούς. Περιγράφει τις διάφορες συμπεριφορές που επιδεικνύει μια φυσική οντότητα προκειμένου να εκπληρώσει λειτουργίες, να ανταποκριθεί σε αλλαγές, να αλληλοεπιδράσει, να τροποποιήσει εσωτερικές λειτουργίες, την διατήρηση της υγείας κ.λπ., (Qi κ.ά., 2021).



Οι τεχνολογίες μοντελοποίησης συμπεριφοράς ενισχύουν τις δυναμικές λειτουργικές συμπεριφορές των γεωμετρικών και φυσικών μοντέλων. Οι διαφορικές εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή της συμπεριφοράς μιας φυσικής οντότητας αναλύοντας την εξέλιξη της κίνησής της στο χώρο και στο χρόνο μέσω κινηματικής και δυναμικής ανάλυσης.

Η κατασκευή του μοντέλου συμπεριφοράς ενός ρομπότ μπορεί να προκύψει με την χρήση της σημειογραφίας Denavit-Hartenberg (D-H notation), για τη δημιουργία των κινηματικών εξισώσεων. Σε καταστάσεις μεγαλύτερης πολυπλοκότητας, οι δυναμικές εξισώσεις που διέπουν τις συμπεριφορές μιας φυσικής οντότητας μπορούν να προκύψουν χρησιμοποιώντας τις αρχές της μηχανικής Lagrange. Η στοχαστική μοντελοποίηση μέσω τυχαίων μεταβλητών και κατανομών πιθανοτήτων, χρησιμοποιείται για να ερμηνεύσουμε τυχαίες διαταραχές, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν την εξέλιξη της κίνησης ενός μηχανικού συστήματος.

Η AutomationML είναι μια γλώσσα μοντελοποίησης δεδομένων που βασίζεται στις αρχές του αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μοντέλων συμπεριφοράς που διευκολύνουν τη διαλειτουργικότητα διακριτών αντικειμένων. Η Unity3D είναι μια πλατφόρμα λογισμικού που έχει σχεδιαστεί για τη δημιουργία διαδραστικού περιεχομένου στο πεδίο των 3D γραφικών σε πραγματικό χρόνο. Το λογισμικό αυτό διευκολύνει την αποτελεσματική δημιουργία μοντέλων συμπεριφοράς με την προσάρτηση σεναρίων βασισμένων σε C#, σε τρισδιάστατα αντικείμενα εντός εικονικών περιβαλλόντων. Επιπλέον, οι εναλλακτικές πλατφόρμες για την υλοποίηση μοντέλων συμπεριφοράς, όπως απεικονίζεται στην Σχήμα 4.3, περιλαμβάνουν το λογισμικό Simcenter Amesim, το Ansys, το Flexsim, το CarSim, το Demo 3D και το Mechatronic Concept Designer, (Tao κ.ά., 2022).

- Μοντέλο κανόνων – Τεχνολογία

Το μοντέλο κανόνων αξιοποιώντας τη σιωπηρή γνώση (γνώση που δεν μπορεί εύκολα να εκφραστεί με λέξεις, όπως οι γνωστικές δεξιότητες, οι πεποιθήσεις, τα νοητικά μοντέλα και η τεχνική τεχνογνωσία) και ενσωματώνοντας ιστορικά δεδομένα και τη γνώση των εμπειρογνομόνων μπορεί να ενισχύσει την ευφυΐα του DT. Οι κανόνες προσδίδουν στο εικονικό μοντέλο την ικανότητα να συλλογίζεται, να κρίνει, να αξιολογεί, να βελτιστοποιεί και να προβλέπει, (Qi κ.ά., 2021).



Βασική τεχνολογία για την επίτευξη των προαναφερόμενων δυνατοτήτων, είναι η ML, η οποία όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.3, παρουσιάζεται σε ποικίλες μορφές, καθεμία με δικά της χαρακτηριστικά.

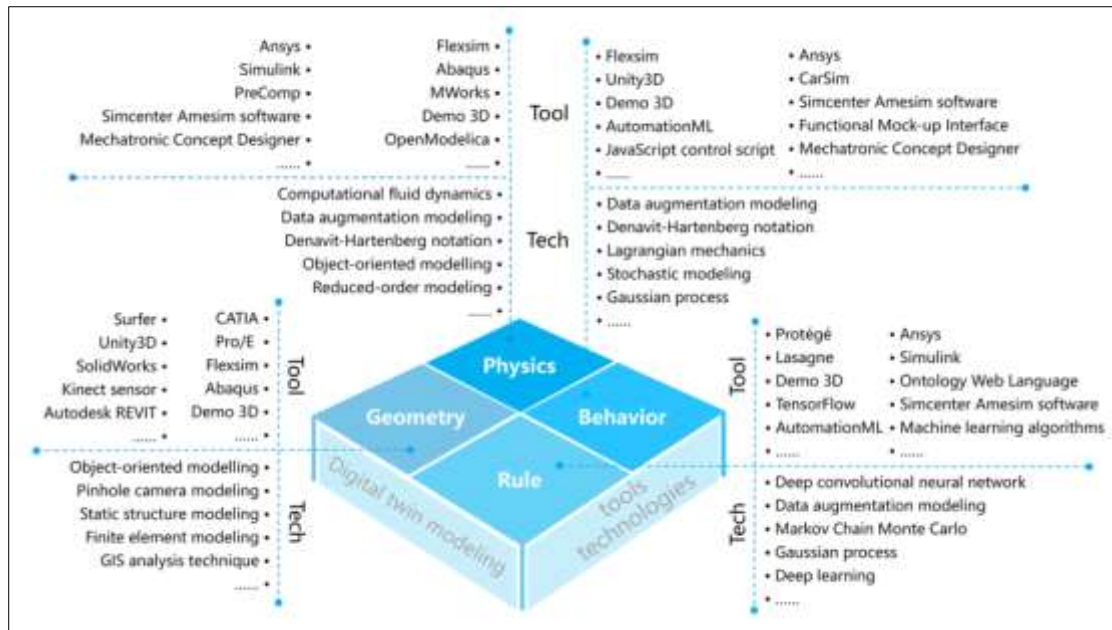
Ένα παράδειγμα για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την ολοκλήρωση υψηλών διαστάσεων είναι η χρήση της μεθόδου Markov Chain Monte Carlo (MCMC), η οποία συνδυάζει τις αρχές των μεθόδων Monte Carlo και των αλυσίδων Markov. Η διαδικασία Gauss είναι εφαρμόσιμη στην παλινδρόμηση, την ταξινόμηση, την εξαγωγή χαρακτηριστικών και άλλες εργασίες μηχανικής μάθησης λόγω της υψηλής ευελιξίας μοντελοποίησής της. Το βαθύ συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο (DCNN) είναι ανώτερο από το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) στην προσομοίωση του εγκεφάλου, ελαχιστοποιώντας παράλληλα την υπερπροσαρμογή. Όταν χρησιμοποιείται η ML για τη μοντελοποίηση κανόνων, η αξιοπιστία του μοντέλου κανόνα μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά με την αύξησή του με πρόσθετα δεδομένα. Η DL, ως υποσύνολο της ML, είναι μια ενδεδειγμένη τεχνολογία μοντελοποίησης κανόνων με βελτιωμένη ικανότητα μάθησης και ευρύτερο πεδίο εφαρμογής, (Semerano κ.ά., 2021).

Τα εργαλεία μοντελοποίησης κανόνων εφοδιάζουν το μοντέλο του DT με ευφρείς δυνατότητες και βελτιώνουν την ποιότητα των υπηρεσιών με βάση τη λογική, τους νόμους και τους κανόνες. Για τη σημασιολογική περιγραφή των οντολογιών χρησιμοποιείται η γλώσσα οντολογικού ιστού (Ontology Web Language - OWL). Είναι μια γλώσσα που βασίζεται στην έρευνα στον τομέα της AI σχετικά με την αναπαράσταση γνώσης, ιδίως τη λογική περιγραφή, για να παρέχει βαθύτερη εκφραστικότητα για τα μοντέλα κανόνων του μοντέλου των DT. Το Tensorflow συνίσταται ως εργαλείο μοντελοποίησης κανόνων σε διάφορους τομείς της έρευνας για το DT και μπορεί να αναπτυχθεί σε διάφορους διακομιστές, τερματικά H/Y και ιστοσελίδες.

Στο Σχήμα 4.3 απεικονίζονται κι άλλα εργαλεία μοντελοποίησης κανόνων, όπως το Ansys, το λογισμικό Simcenter Amesim, το Demo 3D, το Protégé και το Simulink, (Ταο κ.ά., 2022).



“Ιωάννα Δελή”,  
 “ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
 Εφαρμογές και Προοπτικές ”



Σχήμα 4.3: Πλαίσιο τεχνολογιών και εργαλείων για την κατασκευή μοντέλων, (Ταο κ.ά., 2022)

#### 4.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΦΥΣΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΙΚΟΥ ΜΕΡΟΥΣ

Σύμφωνα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση οι βασικές τεχνολογίες που συνθέτουν αυτό το επίπεδο για την διευκόλυνση και την διαχείριση της ανταλλαγής πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο είναι το ενδιάμεσο λογισμικό (Middleware), η ανάλυση πρωτοκόλλων επικοινωνίας, η μετατροπή πρωτοκόλλων/ διεπαφών επικοινωνίας, η ασύρματη επικοινωνία, και οι διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (API), (Lim κ.ά., 2020; Semerano, 2020).

- Ενδιάμεσο λογισμικό (Middleware)

Αποτελεί έναν τύπο λογισμικού που χρησιμεύει ως διαμεσολαβητής μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών ή συστημάτων, επιτρέποντάς τους να αλληλεπιδρούν και να μοιράζονται πληροφορίες με απρόσκοπτο τρόπο. Το Middleware διευκολύνει τη μετατροπή δεδομένων από μια μορφή ή πρωτόκολλο σε άλλη, επιτρέποντας έτσι την ομαλή και αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων εφαρμογών.

Στην βιομηχανία επικρατούν ιδιόκτητες λύσεις λογισμικού "όλα-σε-ένα" που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για το DT και το IoT. Οι λύσεις αυτές περιλαμβάνουν το Predix της



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

GE, το MindSphere της Siemens, το ThingWorx της PTC, την πλατφόρμα Watson IoT της IBM, την 3DEXPERIENCE (3DX) της Dassault, το Microsoft Azure IoT και το Ansys Twin Builder της ANSYS. Οι λύσεις αυτές κυριαρχούν στην ανάπτυξη και την εφαρμογή του DT και του IoT. Στους ακαδημαϊκούς κύκλους, υπάρχει προτίμηση στη χρήση λογισμικού ανάλυσης και προσομοίωσης που προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και γενίκευση, όπως το Matlab και το Unity, (Qi κ.ά., 2021; Fuller κ.ά., 2020).

- Πρωτόκολλα επικοινωνίας

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας επιτρέπει σε δύο ή περισσότερες οντότητες στο DT να μεταδίδουν πληροφορίες μεταξύ τους αλλά και να διατηρείται μια ροή στην συνδεσιμότητα τους. Έτσι η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων αισθητήρων, της αποθήκευσης δεδομένων και του ψηφιακού μοντέλου υποστηρίζεται με τη χρήση αυτών των πρωτοκόλλων. Τα OPC Unified Architecture (OPC UA) και MTConnect είναι τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται περισσότερο σε εφαρμογές DT για την πρόσβαση σε δεδομένα και τη μετάδοση τους σε πραγματικό χρόνο, (Semerano κ.ά., 2021; Liu κ.ά., 2022).

**OPC UA:** Είναι ένα πρότυπο IEC62541 για την ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών μεταξύ συσκευών, μηχανών και υπηρεσιών σε εφαρμογές νέφους. Στον τομέα της παραγωγής και του αυτοματισμού, επιδιώκετε να γίνει το διεθνές πρότυπο για οριζόντια και κάθετη επικοινωνία, για τα συνδεδεμένα συστήματα. Ως εκ τούτου, το πρωτόκολλο αυτό παρέχει τη βάση για τη συνδεσιμότητα για το IoT και το Industrie 4.0, χρησιμεύοντας ως σύνδεσμος μεταξύ του επιπέδου διαχείρισης ενός οργανισμού και των ενσωματωμένων εξαρτημάτων αυτοματισμού ή αισθητήρων.

**MTConnect:** Βασίζεται στην τεχνολογία XML(Extensible Markup Language) και την τεχνολογία HTTP (Hypertext Transfer Protocol) του διαδικτύου για την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ εξοπλισμού παραγωγής, όπως εργαλειομηχανές, και υπολογιστικών συστημάτων, (Redelinghuys κ.ά., 2018).

- Μοντελοποίηση δεδομένων

Για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων παραγωγής είναι ανάγκη η μοντελοποίηση και ενσωμάτωση ετερογενών δεδομένων και γνώσεων που προέρχονται από τις διεργασίες στο χώρο της παραγωγής. Η μετατροπή πρωτοκόλλου/διεπαφής επικοινωνίας ενοποιεί διαφορετικά πρωτόκολλα/διεπαφές



επικοινωνίας. Στο πλαίσιο της μηχανικής των συστημάτων παραγωγής, η AutomationML είναι μια γλώσσα μοντελοποίησης δεδομένων βασισμένη σε XML που επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών. Είναι ένα πρωτόκολλο για την επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του DT και άλλων συστημάτων, (Lim κ.ά., 2020; Semeraro, 2020).

- Ασύρματη επικοινωνία

Η ασύρματη επικοινωνία διευκολύνει την ασύρματη συνδεσιμότητα μεταξύ οντοτήτων του DT, ενισχύοντας έτσι την ευελιξία της μετάδοσης δεδομένων.

**Δίκτυο 5G:** Η εφαρμογή της τεχνολογίας 5G με διευρυμένο εύρος συχνοτήτων έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει σημαντικά μεγαλύτερο αριθμό συσκευών. Ωστόσο, αυτό απαιτεί επικοινωνία σε σημαντικά υψηλότερες συχνότητες που κυμαίνονται από 30-300GHz, γεγονός που αποτελεί αξιοσημείωτη απόκλιση από τις συχνότητες που χρησιμοποιούνται σήμερα από τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Η αξιοποίηση της τεχνολογίας 5G είναι έτοιμη να χρησιμεύσει ως η θεμελιώδης υποδομή για κάθε DT, λόγω της εξαιρετικής ταχύτητας και της ελάχιστης καθυστέρησης, (ultra-low latency).

**Δίκτυο LoRaWAN:** Η τεχνολογία LoRaWAN έχει συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον για εφαρμογές IoT λόγω της ικανότητάς της να μεταδίδει σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η χρήση συνεργασιών μη επανδρωμένων εναέριων συστημάτων (Unmanned Aerial Systems - UAS) έχει συγκεντρώσει σημαντικό ενδιαφέρον τον τελευταίο καιρό, ιδίως για την υποβοήθηση επίγειων σταθμών βάσης σε περιπτώσεις που απαιτούνται πρόσθετες ανάγκες για πόρους δικτύων, (Rasheed κ.ά., 2020).

- Διεπαφές προγραμματισμού

**API:** Οι διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (API), διευκολύνουν την επικοινωνία μεταξύ διαφόρων συστημάτων λογισμικού και μοντέλων εντός του εικονικού χώρου. Τα δεδομένα λογισμικού μπορούν να συλλεχθούν μέσω των APIs και ανοικτών διεπαφών βάσεων δεδομένων.

Ομοίως με τους ορισμούς και την αρχιτεκτονική του DT, οι προσεγγίσεις μοντελοποίησης διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό στη βιβλιογραφία, οδηγώντας ορισμένους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι παρόλο που η μοντελοποίηση των DT έχει λάβει μεγάλη προσοχή, οι τρέχουσες εργασίες για τη μοντελοποίηση βρίσκονται ακόμη



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

στα σπάργανα της ταχείας ανάπτυξης. Και εδώ, η δυσκολία έγκειται στον διεπιστημονικό και ειδικό για κάθε περίπτωση χρήσης χαρακτήρα του DT, (Ταο κ.ά., 2019a; Mihaï κ.ά., 2022).

Καθώς η τεχνολογική πρόοδος συνεχίζει να εξελίσσεται στο πλαίσιο της καινοτομίας και της βιωσιμότητας, η αξιοποίηση τεχνολογιών και εργαλείων για την επεξεργασία και την ανάλυση δεδομένων θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διευκόλυνση των εξελίξεων στους ψηφιακούς μετασχηματισμούς. Η κατανόηση της ολιστικής προοπτικής των DT σε πολλούς συναφείς τομείς θα επιτρέψει την ακριβέστερη αξιολόγηση της τρέχουσας αλλά και της μελλοντικής κατάστασης της τεχνολογίας.

Για παράδειγμα, η χρήση τεχνικών προσομοίωσης και μοντελοποίησης για τον μετριασμό της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, η καθολική εφαρμογή της επικοινωνίας 5G, η επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων IoT μέσω της εφαρμογής των Big Data, της ML και της AI, η βελτίωση της διαλειτουργικότητας και της ολοκλήρωσης μεταξύ λογισμικού προσομοίωσης, μοντελοποίησης, ανάλυσης και οπτικοποίησης και η ενσωμάτωση των δυνατοτήτων των Edge και Cloud Computing σε προηγμένους μικροεπεξεργαστές, θα συνδράμει στην αντιμετώπιση των προκλήσεων που αντιμετωπίζει η εφαρμογή και η χρήση του DT και θα επιτρέψει να ενισχυθεί το δυναμικό του, (Botín-Sanabria κ.ά., 2022).

## **ΜΕΡΟΣ II – DT ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ**

### **5. ΟΛΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ**

#### **5.1 ΑΝΑΓΚΑΙΟΤΗΤΑ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ**

Οι θαλάσσιες μεταφορές, αποτελούν ένα κρίσιμο μέσο του διεθνούς εμπορίου, οδεύοντας προς την ψηφιοποίηση και τον ψηφιακό μετασχηματισμό με διαφορετικούς ρυθμούς σε διάφορους τομείς. Η ναυτιλία, ως μέρος της εφοδιαστικής αλυσίδας, είναι μια ευμετάβλητη βιομηχανία που βρίσκεται σε αναταραχή λόγω των διακυμάνσεων των τιμών της ενέργειας, της τεχνικής ανωριμότητας και των επικείμενων αυξήσεων των κανονιστικών ρυθμίσεων.

Οι οργανισμοί οδηγούνται αναπόφευκτα στην ενσωμάτωση του ψηφιακού μετασχηματισμού για να παραμείνουν ανταγωνιστικοί, καθώς αυξάνονται οι



απαιτήσεις των πελατών για αξιόπιστες, ευέλικτες και οικονομικά αποδοτικές μεταφορές. Οι ναυτιλιακές επιχειρήσεις πρέπει να προσαρμοστούν στις απαιτήσεις των πελατών και να παρέχουν κατάλληλες υπηρεσίες μεταφοράς για να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα και τη μακροζωία των πλοίων τους, (Tijan κ.ά., 2021).

Επιπλέον, ο τομέας των θαλάσσιων μεταφορών αντιμετωπίζει αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί από τον IMO (IMO, 2020), συμπεριλαμβανομένης της Σύμβασης και του Πρωτοκόλλου του Λονδίνου LC/LP, (IMO), της Σύμβασης του Χονγκ Κονγκ για την ανακύκλωση πλοίων που τέθηκε σε ισχύ Ιούνιο 2025 και του Παραρτήματος VI της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL), που τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005, (IMO). Η συμμόρφωση με τους κανονισμούς απαιτεί αφενός επενδύσεις σε τεχνολογίες που επιτρέπουν την ακριβή παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της απόδοσης των πλοίων και αφετέρου ετοιμότητα από όλους τους φορείς, (IMO, 2020).

Η τεχνολογία DT γίνεται το θεμελιώδες συστατικό αυτής της στρατηγικής. Σύμφωνα με τους Lv κ.ά., (2023) το DT παρέχει μια ολοκληρωμένη λύση για την επίβλεψη του κύκλου ζωής των πλοίων, που περιλαμβάνει το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση. Η μετάβαση από τις παραδοσιακές μεθόδους παρακολούθησης σε πλήρως λειτουργικά DT απαιτεί μια σαφή στρατηγική κατεύθυνση και την ευθυγράμμιση των συμφερόντων των ενδιαφερόμενων μερών, συμπεριλαμβανομένων των πλοιοκτητών, των ναυπηγείων και των προγραμματιστών λογισμικού.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δείχνει σαφώς ότι η τεχνολογία DT είναι πολύ υποσχόμενη σε πολλούς τομείς του ναυτιλιακού τομέα και παρά το αρχικό στάδιο ανάπτυξης της, οι παγκόσμιες πρωτοβουλίες έρευνας και ανάπτυξης προχωρούν ενεργά. Προς το παρόν, χρησιμοποιείται κυρίως για την παρακολούθηση και την προσομοίωση. Ωστόσο, η εφαρμογή της αναμένεται να επεκταθεί σε επιπλέον τομείς, όπως η προληπτική συντήρηση, η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, η λήψη αποφάσεων και η εκπαίδευση πληρωμάτων.

Σύμφωνα με κατευθυντήριες γραμμές νηογνωμόνων (DNV, Class NK, Lloyd's), η απουσία σαφούς πλαισίου οδηγεί σε τεχνολογικά αδιέξοδα και αδυναμία κλιμάκωσης. Όπως επισημαίνει ο DNV, η αποτελεσματική διαχείριση των αλλαγών έχει ως



αποτέλεσμα η επιχείρηση να καλλιεργεί και να διατηρεί το ψηφιακό δίδυμο καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, (DNV, 2026).

Από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας προκύπτει πως οι υπάρχουσες μελέτες δεν αντιμετωπίζουν επαρκώς την ανάπτυξη ενός πλαισίου ή μεθόδου που θα δίνει την δυνατότητα στους επαγγελματίες να δημιουργήσουν έναν στρατηγικό χάρτη πορείας για την εφαρμογή του DT. Από τη μια επικρατεί το μοντέλο της ανάγκης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη αν η τεχνολογία μπορεί να προσφέρει την αξία που αναμένεται και από την άλλη επικρατεί το μοντέλο τεχνολογικής ώθησης όπου υπάρχει διαθέσιμη τεχνολογία αλλά δεν αξιολογείται σωστά η επιχειρηματική αξία, (Agrawal κ.ά, 2022)

Ο οδικός χάρτης που θα αναλυθεί παρακάτω, μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο πλοήγησης, προσφέροντας:

Συγκεκριμένα στάδια υλοποίησης, από την έναρξη έως την λειτουργία.

Κατεύθυνση σε τεχνολογικό και οργανωτικό επίπεδο.

Ένα πλαίσιο που οριοθετεί τους ρόλους για την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ κατασκευαστών, πλοιοκτητών, ναυπηγείων, νηογνώμωνων, προγραμματιστών λογισμικού και ερευνητικών φορέων.

## 5.2 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΑΣΕΙΣ

Η ανάπτυξη ενός DT ακολουθεί μια συστηματική μέθοδο, η οποία αποτελείται από πέντε φάσεις. Αυτή η μεθοδολογία τεκμηριώνεται μέσω ερευνητικής βιβλιογραφίας κατευθυντήριων οδηγιών από κορυφαίους νηογνώμονες (DNV, ABS, Lloyd's Register, ClassNK) και διεθνείς οργανισμούς (IACS, IMO, ISO).

### 5.2.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΑΓΚΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΩΝ

- Σκοπός του DT

Το αρχικό βήμα περιλαμβάνει τον καθορισμό του σκοπού ανάπτυξης. Η επιχείρηση θα πρέπει να καθορίσει το σχέδιο για την επένδυση στην αναφερόμενη τεχνολογία, με βάση τις επιχειρηματικές ανάγκες (π.χ. βελτιστοποίηση περιουσιακών στοιχείων, παρακολούθηση κατάστασης, προληπτική συντήρηση, ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας, κλπ.). Ο DNV υποστηρίζει την προτεραιότητα στις «επιχειρηματικές ανάγκες» οι οποίες πρέπει να καθορίζουν την τεχνολογία και όχι το



αντίστροφο, προκειμένου να αποφευχθεί η πιθανότητα εσφαλμένων προδιαγραφών και χαμηλή απόδοση της επένδυσης, (DNV, 2026).

- «Αντικείμενο» Μοντελοποίησης

Η βιβλιογραφία υποστηρίζει την ανάγκη για ακριβή καθορισμό του αντικειμένου μοντελοποίησης. Η μοντελοποίηση θα περιλαμβάνει διαδικασία, περιουσιακό στοιχείο, σύστημα ή μια ολιστική προσέγγιση; (Psarommatis & May, 2023a)

- Καταγραφή παραμέτρων

Επιπλέον, είναι αναγκαίο να γίνει καταγραφή υφιστάμενων δεδομένων, λειτουργικών απαιτήσεων, συστημάτων και αισθητήρων. Παράλληλα, πρέπει να καθοριστούν βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) για την αποτίμηση του DT, καθώς η ακρίβεια, η ταχύτητα απόκρισης, η αξιοπιστία του μοντέλου είναι προαπαιτούμενα για την λήψη αποφάσεων. Οι Psarommatis & May, (2023b) υποστηρίζουν μια τυποποιημένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση της απόδοσης και της προσαρμοστικότητας του DT, παρουσιάζοντας KPIs που αξιολογούν την ακρίβεια, την ταχύτητα απόκρισης και την ικανότητα του μοντέλου να προσαρμόζεται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Η ABS (2018), επισημαίνει πως οι απαιτήσεις αναπτύσσονται με βάση την εμπειρία, την αξιολόγηση της νομοθεσίας και /ή τη συστηματική διερεύνηση των σχετικών κινδύνων, (ABS 2018).

### 5.2.2 ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Αυτή η φάση επικεντρώνεται στη μετάβαση από τον εννοιολογικό σχεδιασμό στην τεχνική υλοποίηση. Η αποτελεσματικότητα του DT εξαρτάται από την ανθεκτικότητα της αρχιτεκτονικής, την ορθή διαχείριση δεδομένων και την αξιοποίηση της τεχνολογίας.

- Αρχιτεκτονική 5 διαστάσεων

Σύμφωνα με την προσέγγιση των Tao κ.ά. (2019), ο σχεδιασμός πρέπει να καλύπτει πέντε διαστάσεις: το Φυσικό Αντικείμενο, το Εικονικό Μοντέλο, τις Υπηρεσίες, τα Δεδομένα και τις Συνδέσεις μεταξύ αυτών. Αν δεν πληρείται η αμφίδρομη σύνδεση (bi-directional flow), τότε μιλάμε για «Digital Shadow» και όχι για «Twin» (Kritzinger κ.ά., 2018).



- Ποιότητα και διαχείριση δεδομένων

Ο DNV, (2019) μέσω της προτεινόμενης πρακτικής (DNV-RP-A203) υπογραμμίζει ότι η εμπιστοσύνη στα DT εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων. Πρέπει να καθοριστεί το πλαίσιο για να διασφαλιστεί ότι τα δεδομένα είναι αξιόπιστα, ακριβή και κατάλληλα για χρήση. Ο σχεδιασμός πρέπει να περιλαμβάνει διαδικασίες καθαρισμού, ενσωμάτωσης και προστασίας των δεδομένων των αισθητήρων.

Οι Autiosalo κ.ά., (2020) προτείνουν να προηγείται προεπεξεργασία ή και συμπίεση δεδομένων για τον έλεγχο του bandwidth, στο σημείο παραγωγής δεδομένων, δηλαδή επί του πλοίου και στην συνέχεια να αποστέλλονται και να διαχειρίζονται κεντρικά, προκειμένου να ελαχιστοποιούνται οι επαναλήψεις και να διευκολύνεται η γρήγορη και εύκολη πρόσβαση σε όλες τις διασυνδεδεμένες λειτουργίες του DT.

Οι Berre & Rødseth, (2018) εισήγαγαν το MDS ως ένα εννοιολογικό πλαίσιο βασισμένο στο χερσαίο πρότυπο IDS. Το MDS έχει τρία επίπεδα λειτουργικότητας: αξιόπιστη παροχή υπηρεσιών, ασφαλής και αποτελεσματική επικοινωνία, καθώς και διαχείριση και διακυβέρνηση δεδομένων.

Από τις έρευνες, προκύπτει η σημασία της ποιότητας των δεδομένων σε αυτό το στάδιο, προειδοποιώντας ότι η ανεπαρκής διαχείριση μπορεί να οδηγήσει σε συστημικές βλάβες, (Sharma κ.ά., 2022).

- Επιλογή Αισθητήρων και IoT

Η υποδομή αισθητήρων στο πλοίο ή και στο λιμάνι είναι απαραίτητη για την παραγωγή δεδομένων. Όλα τα νέα πλοία και ένας αυξανόμενος αριθμός υφιστάμενων πλοίων εφαρμόζουν πλατφόρμες IoT που συλλέγουν και αναλύουν εκτεταμένα δεδομένα από πολυάριθμους αισθητήρες επί του σκάφους, ανά δευτερόλεπτα ή λεπτά (συνήθως 15 δευτερόλεπτα βάσει του προτύπου ISO 19030) (Alexiou κ.ά., 2022).

Οι αισθητήρες αποτελούν την ραχοκοκαλιά του DT. Η σειρά αισθητήρων περιλαμβάνει αισθητήρες κίνησης και έξυπνες κάμερες που μετρούν την απόδοση του κινητήρα, την πλοήγηση του πλοίου, την ταχύτητα του σκάφους, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τη δομική ακεραιότητα.

Ο ABS, (2018) ορίζει ότι η επιλογή των αισθητήρων πρέπει να λαμβάνει υπόψη την ανθεκτικότητα στο περιβάλλον λειτουργίας και την ακρίβεια των μετρήσεων, ενώ πρέπει να προβλέπεται πλεονασμός για τα κρίσιμα συστήματα.



Μέσα από την έρευνά των Jedermann κ.ά., (2023), για το πως μπορεί μια εφαρμογή παρακολούθησης να μετατραπεί σε πραγματικό DT, αναδεικνύεται η σημασία κατά τον σχεδιασμό της στρατηγικής ενσωμάτωσης αισθητήρων σε ένα DT. Σύμφωνα με την ανάλυση, πρέπει να προσδιοριστούν οι καταστάσεις που είναι άμεσα μετρήσιμες, κρυφές ή μη παρατηρήσιμες, που σημαίνει ότι δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα από τους αισθητήρες.

Η πρόβλεψη των ιδιοτήτων των αντικειμένων, αποτελεί σημαντικό ζήτημα που αντιμετωπίζουν τα DT που βασίζονται σε αισθητήρες. Μεθοδολογίες μηχανικής μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των μη μετρήσιμων ιδιοτήτων. Αυτό αποτελεί ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό που διακρίνει τα DT από προηγούμενες λύσεις IoT και εκτός σύνδεσης μοντελοποίηση.

Συνεπώς, απαιτείται η χρήση εξειδικευμένων αισθητήρων ώστε να τροφοδοτούν τα μοντέλα του DT με ακριβή δεδομένα.

- Μοντέλα – πλατφόρμες προσομοίωσης

Η ανάπτυξη ενός εικονικού αντιγράφου απαιτεί την επιλογή μιας κατάλληλης μεθόδου μοντελοποίησης. Η σύγχρονη έρευνα και πρακτική περιγράφουν τρεις βασικές μεθόδους, καθεμία με ξεχωριστά πλεονεκτήματα και τομείς εφαρμογής.

1. Μοντέλα βασισμένα στη φυσική (Physics-Based / White Box)

**Υπολογιστική ρευστοδυναμική (CFD):** Χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της ροής του νερού γύρω από το κύτος, την αξιολόγηση της αντίστασης, της πρόωσης και της δυναμικής των κυμάτων, (Stachowski & Kjeilen, 2017).

**Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM):** Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του σκάφους, (Anyfantis, 2021).

Τα φυσικά μοντέλα παρέχουν ανώτερη ακρίβεια και σαφήνεια στην ερμηνεία. Είναι τα μόνα που μπορούν να προβλέψουν τη συμπεριφορά του πλοίου σε ακραία σενάρια, όπως σπάνιες καταιγίδες ή συγκρούσεις. Ωστόσο, απαιτούν εξαιρετικά υψηλή υπολογιστική ισχύ. Μια ολοκληρωμένη προσομοίωση CFD μπορεί να απαιτήσει ώρες ή ημέρες σε υπολογιστικά συστήματα υψηλής απόδοσης, καθιστώντας την μη πρακτική για τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο εν πλω, (Troupiotis-Kapeliaris κ.ά., 2022).



## 2. Μοντέλα βασισμένα σε δεδομένα (Data-Driven / Black Box)

Η μέθοδος αυτή, χρησιμοποιεί μόνο προηγούμενα δεδομένα λειτουργίας και δεν λαμβάνει υπόψη φυσικές αρχές, για να εκπαιδεύσει αλγόριθμους ML.

**Τεχνικές:** Χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), δέντρα αποφάσεων (Regression Trees, Random Forests, Extreme Gradient Boosting Trees, κτλ.) και μέθοδοι Gradient Boosting (XGBoost).

**Εφαρμογές:** Πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου, υπολογισμός ταχύτητας, ανίχνευση ανωμαλιών κινητήρα.

Τα μοντέλα δεδομένων παρέχουν γρήγορες ταχύτητες εκτέλεσης (καθυστέρηση χιλιοστών του δευτερολέπτου), καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Μπορούν να διακρίνουν περίπλοκες, μη γραμμικές σχέσεις που τα μοντέλα φυσικής θα μπορούσαν να παραβλέψουν. Ωστόσο, υπάρχει έλλειψη ερμηνευσιμότητας, δηλαδή η λογική πίσω από τις προβλέψεις του μοντέλου παραμένει ασαφής και εξαρτώνται εξ ολοκλήρου από την ποιότητα των δεδομένων εκπαίδευσης. Δεν έχουν την ικανότητα να γενικεύουν αξιόπιστα πέρα από το πεδίο των δεδομένων που έχουν δει (περιορισμένες δυνατότητες εξάπλωσης), (Alexiou κ.ά., 2022).

## 3. Υβριδικά μοντέλα (Hybrid / Grey Box)

Η υβριδική μοντελοποίηση είναι μια πιο σύγχρονη προσέγγιση για την κατασκευή μοντέλων DT. Συνδυάζει την ταχύτητα των δεδομένων (Data-driven) με την αξιοπιστία της φυσικής (Physics-based).

Σε αυτή την μέθοδο περιλαμβάνονται:

**Μοντέλα μειωμένης τάξης (ROM):** Αυτή η μέθοδος καθιστά δυνατή τη δημιουργία «ελαφριών» εκδόσεων σύνθετων φυσικών μοντέλων. Οι μηχανικοί μπορούν να εκτελούν φυσικές προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο κάτι που είναι σημαντικό για τη λήψη αποφάσεων. Τα ROM, επιτρέπουν να πραγματοποιηθεί αλλαγή στην πιστότητα του μοντέλου με βάση την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ και το χρόνο που απαιτείται για τη λήψη μιας απόφασης, (Karpeyn κ.ά., 2020).

**Νευρωνικά δίκτυα με φυσική πληροφόρηση (PINNs):** Πρόκειται για νευρωνικά δίκτυα που ενσωματώνουν φυσικούς κανόνες απευθείας σε μοντέλα που βασίζονται σε δεδομένα, εξασφαλίζοντας ότι οι προσομοιώσεις συμμορφώνονται με θεμελιώδεις



αρχές, δηλαδή την τήρηση των φυσικών κανόνων (για παράδειγμα, διατήρηση μάζας ή ενέργειας), ενώ παράλληλα ενσωματώνουν δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο. Έτσι, το μοντέλο μαθαίνει από την είσοδο χωρίς να παραβιάζει τους φυσικούς νόμους, γεγονός που το καθιστά καλύτερο στη γενίκευση σε άγνωστες συνθήκες, (Nyangon, 2025).

#### 4. Βαθμονόμηση μοντέλου

Η βαθμονόμηση των μοντέλων προσομοίωσης βελτιώνει την ακρίβεια και είναι απαραίτητη για το DT. Η βαθμονόμηση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το αν το φυσικό περιουσιακό στοιχείο είναι μεμονωμένο ή αποτελεί μέρος σειράς παραγωγής, όπως εξηγείται παρακάτω.

**Βαθμονόμηση 1:1:** Η βαθμονόμηση ένα προς ένα απαιτεί την κατασκευή, τη θέση σε λειτουργία και τη δοκιμή ενός μεμονωμένου κατασκευαστικού στοιχείου. Ανάλογα με την κατηγορία του μοντέλου, ενδέχεται να απαιτούνται επιπλέον αισθητήρες για τις δοκιμές, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της βαθμονόμησης. Η βαθμονόμηση ένα προς ένα καταγράφει όλα τα χαρακτηριστικά του φυσικού περιουσιακού στοιχείου, συμπεριλαμβανομένων των λεπτομερειών κατασκευής και των ρυθμίσεων του ελεγκτή.

**Βαθμονόμηση βάσει πληθυσμού:** Η βαθμονόμηση βάσει πληθυσμού είναι μια επιλογή για φυσικά περιουσιακά στοιχεία που παράγονται σε σειρά. Επομένως, τα δεδομένα λειτουργίας πεδίου πρέπει να χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση/βαθμονόμηση μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα. Ωστόσο, εάν ένα περιουσιακό στοιχείο δεν καλύπτει ολόκληρο το εύρος βιώσιμης λειτουργίας κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, το μοντέλο ενδέχεται να έχει πρόβλημα στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών του μηχανήματος αργότερα. Μπορεί κανείς να επωφεληθεί από έναν πληθυσμό πανομοιότυπων μηχανημάτων χρησιμοποιώντας διάφορα σύνολα δεδομένων για την εκπαίδευση του μοντέλου. (CIMAC WG20, 2025).

#### 5. Πλατφόρμες προσομοίωσης

Ένα σημαντικό εμπόδιο στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων DT είναι η αδυναμία επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών μοντέλων. Ένα σκάφος αποτελείται από πολλά υποσυστήματα από διάφορους κατασκευαστές πρωτότυπου εξοπλισμού (OEM). Το



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

μοντέλο κινητήρα του κατασκευαστή A συχνά δεν μπορεί να επικοινωνήσει με το μοντέλο έλικα του κατασκευαστή B ή το σύστημα πλοήγησης του κατασκευαστή Γ.

Τα DT αποτελούνται από πολλά μοντέλα και εξαρτήματα που λειτουργούν από κοινού. Οι ενδιαφερόμενοι πρέπει να είναι σε θέση να διεξάγουν συν-προσομοιώσεις και να μοιράζονται μοντέλα προσομοίωσης με αποτελεσματικό και ασφαλή τρόπο. Είναι σαφές πως, η ενσωμάτωση λογισμικού και συστημάτων είναι επιτακτική για την επίλυση προκλήσεων στον σχεδιασμό, την κατασκευή και την λειτουργία των υφιστάμενων και μελλοντικών πλοίων.

Πλατφόρμες εξειδικευμένες όπως οι K-Sim της Kongsberg, (Voith, 2025) η R&D simulator της Wärtsilä, (Wärtsilä, 2026), ή ανοιχτού προτύπου όπως η OSP αναπτύσσονται για να αντιμετωπιστεί η ετερογένεια των συστημάτων, (Hatledal κ.ά., 2020).

#### 6. Καθορισμός διαδικασιών κυβερνοασφάλειας

Η κυβερνοασφάλεια αποτελεί πλέον ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για τη διατήρηση της ασφάλειας των πλοίων και την προστασία του περιβάλλοντος, καθώς τα πλοία γίνονται όλο και πιο συνδεδεμένα και εξαρτώνται από την ψηφιακή τεχνολογία.

Τα DT καθίστανται ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις εξαιτίας της αλληλεπίδρασης τους με ευαίσθητα δεδομένα και συσκευές IoT. Η πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής τους, με πολλά επίπεδα και στοιχεία, αυξάνει αυτούς τους κινδύνους, καθώς κάθε επίπεδο έχει διάφορες ευπάθειες που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

#### 7. Κλάσεις και Πιστοποιήσεις

Οι κορυφαίοι νηογνώμονες παρέχουν πιστοποιήσεις κλάσης που βεβαιώνουν τη συμμόρφωση με τα πρότυπα κυβερνοασφάλειας. Για νέα πλοία από το 2024 οι κανονισμοί είναι σύμφωνα με τις υποχρεωτικές Ενιαίες Απαιτήσεις (UR E26/E27) της IACS. Οι πιστοποιήσεις παρέχουν κάλυψη για τα συστήματα OT, όπως η πλοήγηση και η πρόωση, επιπροσθέτως στα IT συστήματα, απαιτώντας από τους ναυπηγούς και τους ιδιοκτήτες/διαχειριστές να αντιμετωπίζουν τον κυβερνοκίνδυνο σε όλα τα συστήματα.

**IACS UR E26 & E27:** Από την 1η Ιουλίου 2024, όλα τα νέα πλοία πρέπει να διαθέτουν ισχυρά μέτρα κυβερνοασφάλειας, σύμφωνα με τις νέες ενιαίες απαιτήσεις (UR) E26 και E27 της IACS. Αυτά τα πρότυπα είναι ζωτικής σημασίας για τους ναυπηγούς και



τους προμηθευτές συστημάτων, καθώς διασφαλίζουν ότι η κυβερνοασφάλεια ενσωματώνεται από την αρχή στο σχεδιασμό και την κατασκευή των πλοίων.

Η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις IACS UR E26 και E27 καθίσταται υποχρεωτική ακόμα και κατά την αναβάθμιση legacy συστημάτων στα πλοία αφού η σύνδεση των παλαιών συστημάτων σε δίκτυα IP εισάγει κινδύνους, καθώς τα πρωτόκολλα (Modbus, NMEA) δεν σχεδιάστηκαν με γνώμονα την ασφάλεια.

**E26 Κυβερνοανθεκτικότητα του Πλοίου:** Η απαίτηση E26 αφορά ολόκληρο το πλοίο συμπεριλαμβανομένων των λειτουργικών συστημάτων και των δικτύων.

Στόχος είναι η εφαρμογή ενός πλαισίου διαχείρισης κυβερνοκινδύνων ειδικά για πλοία και καλύπτει τον πλήρη κύκλο ζωής τους, από το σχεδιασμό και την κατασκευή έως τη λειτουργία. Εστιάζει στην διασφάλιση ότι το πλοίο μπορεί να αναγνωρίζει, να προστατεύεται, να ανιχνεύει, να αντιδρά και να ανακάμπτει από κυβερνοεπιθέσεις.

**E27 Κυβερνοανθεκτικότητα Συστημάτων Εξοπλισμού:** Η απαίτηση E27, αφορά στα επιμέρους Computer-Based Systems (CBS) συστήματα και τον εξοπλισμό του πλοίου. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού (OEMs) υποχρεούνται να ενσωματώνουν δυνατότητες κυβερνοασφάλειας στα προϊόντα τους. Το E27 απαιτεί διαδικασίες για την επαλήθευση της ακεραιότητας του λογισμικού και των δεδομένων, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι πληροφορίες δεν έχουν παραποιηθεί. Τα διασυνδεδεμένα συστήματα πρέπει να περιλαμβάνουν αυστηρά μέτρα ελέγχου ταυτότητας χρήστη και ελέγχου πρόσβασης, προκειμένου να αποτρέπονται παράνομες παρεμβάσεις, (ClassNK, 2024; Inmarsat, 2024)

**DNV:** Παρέχει την πιστοποίηση Cyber Secure, η οποία περιλαμβάνει πολλαπλά επίπεδα (Basic, Essential, Advanced) με βάση την πολυπλοκότητα του συστήματος και το επίπεδο κινδύνου, (DNV, 2026).

**ABS:** Παρέχει τις πιστοποιήσεις CS-System (για OEMs), CS-Ready (για SBI) και CS-1 (για πλοιοκτήτες/διαχειριστές) και CS-2 (για πλοιοκτήτες/διαχειριστές), επιβεβαιώνοντας ότι το σκάφος διαθέτει ένα ισχυρό σύστημα διαχείρισης κυβερνοκινδύνων, (ABS, 2023).

**ClassNK:** Παρέχει οδηγίες και πιστοποιήσεις με βάση την προσέγγισή της, εφαρμόζοντας τις Ενιαίες Απαιτήσεις IACS UR κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού/κατασκευής, (ClassNK, 2024).



#### 8. Ολιστική εφαρμογή αντιμέτρων

Οι οργανισμοί οφείλουν προκειμένου να περιορίσουν το ρίσκο, αλλά και ακόμα και αν συμβεί μια κακόβουλη επίθεση να είναι σε θέση να την αντιμετωπίσουν, χωρίς επιβλαβείς συνέπειες για τα περιουσιακά στοιχεία και να εφαρμόζουν ισχυρά αντιμέτρα τόσο στην ξηρά όσο και επί του πλοίου.

Μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τον μετριασμό αυτών των τρωτών σημείων, είναι η ενσωμάτωση ισχυρών μέτρων ασφάλειας στα τέσσερα βασικά λειτουργικά επίπεδα των DT: απόκτηση δεδομένων, συγχρονισμός δεδομένων, μοντελοποίηση δεδομένων και οπτικοποίηση δεδομένων.

Με την εφαρμογή αυτών των αντιμέτρων, οι επιχειρήσεις μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των οικοσυστημάτων ψηφιακών διδύμων, εξασφαλίζοντας την ασφαλή και αξιόπιστη ψηφιακή υλοποίηση των φυσικών περιουσιακών στοιχείων, (Falidouri, 2025).

#### 5.2.3 ΔΙΑΣΦΑΛΙΣΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Πριν από την πλήρη λειτουργική ενσωμάτωση, το DT πρέπει να περάσει μια αυστηρή διαδικασία αξιολόγησης του βαθμού στον οποίο συμμορφώνεται με τις ανάγκες και τις προδιαγραφές του, όπως περιγράφονται στα εννοιολογικά μοντέλα, τα μαθηματικά μοντέλα ή άλλα πλαίσια και αξιολόγησης του βαθμού στον οποίο το DT αντικατοπτρίζει με ακρίβεια την πραγματικότητα, λαμβάνοντας υπόψη την προβλεπόμενη εφαρμογή του.

- Επαλήθευση και Επικύρωση Μοντέλου (Model Verification & Validation)

Ο ABS, έχει εκδώσει οδηγίες για την αξιολόγηση και την τεκμηρίωση της αξιοπιστίας ψηφιακών λύσεων, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια στη λήψη αποφάσεων στη ναυτιλία και τις offshore κατασκευές.

Στόχος είναι η δημιουργία ενός πλαισίου επαλήθευσης και επικύρωσης (Verification & Validation V&V), μια διαδικασία που βασίζεται στη λογική "Claim-Evidence-Reasoning" (Ισχυρισμός-Απόδειξη-Συλλογιστική), όπου κάθε απόφαση για την αποδοχή του μοντέλου πρέπει να στηρίζεται σε τεκμηριωμένα στοιχεία. Λόγω της απουσίας ιστορικού υπηρεσιών για πολλές ψηφιακές λύσεις, συμπεριλαμβανομένων



των DT, απαιτείται μια διαδικασία για την καθιέρωση της αξιοπιστίας τους για συγκεκριμένες εφαρμογές, (ABS, 2024).

Οι Wright & Davidson, (2020) υπογραμμίζουν ότι το μοντέλο πρέπει να ελεγχθεί ως προς τη φυσική του πιστότητα (physics-based modelling). Πρέπει να αποδειχθεί ότι το ψηφιακό αντίγραφο συμπεριφέρεται όπως το φυσικό αντικείμενο υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης.

- Πιστοποίηση Λειτουργικότητας (Assurance)

Ο Lloyd’s Register, (2021) μέσω του πλαισίου "Digital Twin Ready", προτείνει μια διαδικασία διασφάλισης (assurance) όπου ελέγχεται αν ο κατασκευαστής του DT πληροί τις προδιαγραφές ασφαλείας και κυβερνοασφάλειας (cybersecurity) πριν από την πλήρη ανάπτυξη και συνεχίζεται μέσω διαρκούς επικύρωσης κατά την πραγματική λειτουργία.

- Σύνδεση

**Βελτιστοποίηση AI:** Η σχεδόν σε πραγματικό χρόνο σύνδεση και αλληλεπίδραση μεταξύ του εικονικού και του φυσικού κόσμου ενός DT βελτιώνει τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης (AI) και τα πλαίσια έξυπνης κατασκευής, παρέχοντας πιο ολοκληρωμένες και ρεαλιστικές μετρήσεις που βελτιώνουν την ακρίβεια των προβλέψεων, (Psarommatis κ.ά., 2023).

**Λήψη αποφάσεων:** Ένα DT που τροφοδοτείται από δεδομένα αισθητήρων επιτρέπει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να αντιδρούν, αν όχι σε πραγματικό χρόνο, τουλάχιστον εντός ενός χρονικού διαστήματος που επιτρέπει την ανάληψη σημαντικών δράσεων που εξακολουθούν να έχουν αξία, (Smogeli, Ø., 2017).

**Συγχρονισμός:** Η ακρίβεια του DT εξαρτάται όχι μόνο από την ποιότητα και το ρυθμό δειγματοληψίας των δεδομένων αλλά και από και τον συγχρονισμό τους. Ένα μη συγχρονισμένο σύνολο δεδομένων (π.χ. εάν η ταχύτητα μετράται με χρονική απόκλιση από την κατανάλωση κατά την επιτάχυνση), μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα μοντέλα πρόβλεψης.

Συνεπώς το DT πρέπει να ενημερώνεται σε χρόνο που είναι χρήσιμος για τη λήψη αποφάσεων (είτε real-time είτε near real-time).



- Πιλοτική εφαρμογή

Μετά την εργαστηριακή επικύρωση, το σύστημα εγκαθίσταται στο πλοίο για πιλοτική λειτουργία. Σύμφωνα με την οδηγία *Recommended Practice DNV-RP-A204* του DNV στην αρχική φάση, το DT λειτουργεί ταυτόχρονα με τα παραδοσιακά συστήματα παρακολούθησης χωρίς να διαταράσσει τις λειτουργίες του πλοίου. Στόχος είναι να αντιπαραβληθούν οι προβλέψεις του DT με τις πραγματικές ενδείξεις των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, εάν το DT προβλέψει βλάβη στην αντλία, το πλήρωμα αξιολογεί την κατάσταση, αλλά δεν βασίζεται αποκλειστικά σε αυτό για τη συντήρηση σε αυτό το στάδιο.

Σύμφωνα με την οδηγία ABS (2025), η πιστοποίηση της λειτουργικότητας δεν είναι απλή διαδικασία ελέγχου, αλλά ακολουθεί ένα Πλαίσιο Βασισμένο σε Στόχους (Goal-Based Framework), εστιάζοντας στην λειτουργικότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων με τελικό στόχο την απόδοση κλάσης “Smart”, η οποία είναι μια πιστοποίηση ότι το πλοίο διαθέτει την κατάλληλη υποδομή και τις διαδικασίες για την συλλογή, την επεξεργασία και την αξιοποίηση των δεδομένων στην λήψη αποφάσεων. Για να θεωρηθεί το DT ασφαλές και λειτουργικό, εφαρμόζεται η διαδικασία New Technology Qualification (NTQ), η οποία αφορά καινοτόμες τεχνολογίες και όπου οι κανόνες δεν υπάρχουν ή δεν επαρκούν. Ορίζονται διαδικασίες επαλήθευσης, επικύρωσης και διασφάλισης ότι η νέα τεχνολογία αλληλοεπιδρά με ασφάλεια με τα υπόλοιπα συστήματα του πλοίου εκδίδοντας και τα αντίστοιχες “Δηλώσεις Ωριμότητας” (Statement of Maturity).

Αυτή η σταδιακή εξέταση επιτρέπει στις εταιρείες τεχνολογίας να επιδείξουν την πρόοδο και την ασφάλεια των προϊόντων τους στους επενδυτές και τις ρυθμιστικές αρχές. Στην συνέχεια, ακολουθεί η επιβεβαίωση της αξιοπιστίας και της απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας για εκτεταμένο χρονικό διάστημα. Έτσι τα έξυπνα συστήματα συμπεριλαμβανομένων και των DT που έχουν εγκατασταθεί στο πλοίο για την συλλογή, την μετάδοση, την διαχείριση και την ανάλυση δεδομένων λαμβάνουν πιστοποίηση τεχνικής αξιολόγησης PDA (Product Design Assessment), πράγμα που σημαίνει ότι η τεχνολογία έχει «ωριμάσει» και οι κίνδυνοι είναι πιο κατανοητοί, επιτρέποντας την ευρύτερη υιοθέτησή της.



#### 5.2.4 ΚΛΙΜΑΚΩΣΗ ΚΑΙ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ

Η 4η φάση του οδικού χάρτη είναι ουσιαστικής σημασίας για τη μετάβαση από μεμονωμένες πιλοτικές εφαρμογές σε ευρεία υιοθέτηση του DT σε επίπεδο στόλου.

Ο στόλος αποτελείται από πλοία διαφορετικής ηλικίας, εξοπλισμένα με ετερογενή συστήματα που λειτουργούν σε απομονωμένα αποθετήρια δεδομένων, χρησιμοποιώντας παρωχημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως NMEA 0183 και Modbus.

Η βελτιωμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών αισθητήρων, μορφών δεδομένων και πλατφορμών είναι απαραίτητη, ιδίως όσον αφορά την ικανότητα των συστημάτων να κατανοούν τη σημασιολογία αυτών των δεδομένων και να συνεργάζονται για την επίτευξη κοινών στόχων.

Η αποτελεσματική κλιμάκωση απαιτεί την αντιμετώπιση ζητημάτων διαλειτουργικότητας, συμπεριλαμβανομένων των παλαιών συστημάτων (Legacy systems), και την υιοθέτηση τυποποιημένων πρωτοκόλλων ανταλλαγής δεδομένων, καθώς εξασφαλίζεται συνέπεια και συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων.

- Πρότυπα ISO

Τα πρότυπα μπορούν να διευκολύνουν την ουδετερότητα των προμηθευτών, υποδηλώνοντας ότι δεν εξαρτώνται από ιδιόκτητες τεχνολογίες.

Χρησιμοποιώντας μια τυποποιημένη μεθοδολογία, οι οργανισμοί μπορούν να αποφεύγουν τις εξατομικευμένες λύσεις ενσωμάτωσης, μειώνοντας έτσι τα έξοδα ανάπτυξης και συντήρησης. Καθώς τα ψηφιακά δίδυμα βρίσκονται ακόμη σε φάση ανάπτυξης, υπάρχουν λιγότερα πρότυπα που αφορούν συγκεκριμένα αυτά. Ωστόσο, τα πρότυπα συλλογής δεδομένων, ασφάλειας δεδομένων, μοντελοποίησης πληροφοριών, προσομοίωσης, οπτικοποίησης και δικτύωσης μπορούν να διευκολύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών ψηφιακών διδύμων.

**ISO 23247:** - Το Digital Twin Manufacturing Framework, είναι ένα σχετικά νέο πρότυπο ISO για τα DT και παρέχει ένα γενικό πλαίσιο ανάπτυξης για την εφαρμογή ψηφιακών διδύμων στην κατασκευή σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, (David κ.ά., 2024).



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Για τον κλάδο, τα πρότυπα ISO 19847 και ISO 19848 παίζουν κεντρικό ρόλο στην τυποποίηση της συλλογής και ανταλλαγής δεδομένων και συνδέονται άρρηκτα μεταξύ τους.

**ISO 19847:** Καθορίζει τα κριτήρια για τους διακομιστές θαλάσσιων δεδομένων, διασφαλίζοντας αξιόπιστη αποθήκευση και προσβασιμότητα των δεδομένων.

**ISO 19848:** Καθορίζει το πλαίσιο και την ορολογία για τα δεδομένα που αφορούν τα θαλάσσια μηχανήματα και τον εξοπλισμό. Η χρήση μιας τυποποιημένης «γλώσσας» για την περιγραφή των δεδομένων (π.χ. ιεραρχική ονοματολογία αισθητήρων) διευκολύνει την αυτόματη αναγνώριση και επεξεργασία από το DT, εξαλείφοντας την ανάγκη για χειροκίνητη χαρτογράφηση, (VERASITY by DNV, 2023).

**OPC UA:** Αποτελεί ένα πρότυπο για τη βιομηχανική αυτοματοποίηση και τη μεταφορά δεδομένων που διευκολύνει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών, λογισμικού και συστημάτων από διάφορους προμηθευτές. Προσφέρει ένα τυποποιημένο πλαίσιο για ασφαλή, αξιόπιστη και ανεξάρτητη από πλατφόρμα επικοινωνία, διευκολύνοντας την ενσωμάτωση των DT με διάφορα συστήματα και εξαρτήματα καθιστώντας το κατάλληλο για θαλάσσια συστήματα, αυτοματοποιημένα περιβάλλοντα και εποπτεία επιπέδου SCADA 8612.

Μέσω τυποποιημένων Μοντέλων Πληροφορίας (Information Models), το OPC διασφαλίζει την ομοιόμορφη ερμηνεία των δεδομένων, οριοθετώντας τη δομή, την ονοματολογία και την επεξεργασία αυτών. Κατά συνέπεια, συστήματα από διαφορετικούς κατασκευαστές μπορούν να επικοινωνούν χωρίς να απαιτούνται εξομοιωμένες διεπαφές ή χειροκίνητος προγραμματισμός. Μια μονάδα ελέγχου θα κατανοήσει με ακρίβεια τις τιμές που μεταδίδονται από έναν αισθητήρα, (A1 Digital, 2025).

Ο Ketola, (2023) αναπτύσσει ένα μοντέλο OPC UA για την τυποποίηση της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ του συστήματος ελέγχου UNIC των κινητήρων Wärtsilä και των εξωτερικών συστημάτων, ενσωματώνοντας πληροφορίες βάση ISO 19848 μέσα στο OPC UA, ώστε να διασφαλίζεται ότι τα σήματα του κινητήρα είναι καθολικά αναγνωρίσιμα χωρίς γνώση κατασκευαστή.

Το αποτέλεσμα είναι ότι το μοντέλο OPC UA επιτυγχάνει τόσο δομική τυποποίηση όσο και σημασιολογική συμβατότητα με τα πρότυπα ναυτιλιακών δεδομένων,



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

επιτρέποντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφόρων κατασκευαστών και πλατφορμών.

**MQTT:** Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), ένα πρότυπο ISO/IEC 20922. Είναι πρωτόκολλο χαμηλού εύρους ζώνης που χρησιμοποιείται για την επικοινωνία πλοίου-ακτής λόγω της ελαφριάς αρχιτεκτονικής του. Διευκολύνει την αποτελεσματική μετάδοση δεδομένων μέσω δορυφόρου. Αν και το OPC UA είναι κατάλληλο για το τοπικό δίκτυο του πλοίου, συχνά είναι πολύ δυσκίνητο για τη μετάδοση μέσω δορυφόρου. Το MQTT γίνεται όλο και πιο δημοφιλές στις εφαρμογές IoT λόγω της σχετικά χαμηλής πολυπλοκότητας και της ελαφριάς υλοποίησής του, (Rødseth, 2024; Al-Fuqaha κ.ά., 2015; Huang κ.ά., 2019).

Οι συχνές διακοπές στην κάλυψη του δορυφόρου απαιτούν τη λειτουργία «Store and Forward» των μεσιτών MQTT, η οποία επιτρέπει την τοπική αποθήκευση των δεδομένων και την άμεση μετάδοσή τους κατά την επανασύνδεση, διατηρώντας έτσι την ακεραιότητα των δεδομένων.

- Ενσωμάτωση Παλαιότερων Συστημάτων (Legacy Systems)

Η ενσωμάτωση αυτών των παλαιών τεχνολογιών στο σύγχρονο πλαίσιο του DT αποτελεί το σημαντικότερο τεχνικό και οικονομικό εμπόδιο της Φάσης 4. Η πλήρης αντικατάσταση του εξοπλισμού είναι οικονομικά ανέφικτη. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητες έξυπνες τακτικές ψηφιακής αναβάθμισης (retrofitting), (A3, 2025).

Τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται τις τελευταίες δύο έως τρεις δεκαετίες αναπτύχθηκαν για τοπικό έλεγχο και οθόνη προβολής (HMI), και όχι για συλλογή δεδομένων (Big Data) και ανάλυση στο Cloud.

Τα πρότυπα NMEA 0183, NMEA 2000 και το Modbus, είναι παρωχημένα και ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα για εξοπλισμό πλοήγησης, συμπεριλαμβανομένων GPS, γυροσκοπίων, ανεμόμετρων, βυθομέτρων και συστημάτων αυτοματισμού (αισθητήρες, κινητήρες, PLCs) αντίστοιχα.

**Προβλήματα παλαιών πρωτοκόλλων:** (NMEA 0183)-Χαμηλή ταχύτητα μετάδοσης, περιορισμός του όγκου δεδομένων, αδόμητα δεδομένα τα οποία απαιτούν πολύπλοκη ανάλυση για την εξαγωγή της πληροφορία, απουσία ασφάλειας ή κρυπτογράφηση.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

(NMEA 2000)-Δυναδική κωδικοποίηση μηνυμάτων η οποία είναι δυσνόητη για τα IT συστήματα, αποκωδικοποίηση μηνυμάτων που απαιτεί βιβλιοθήκες και ακριβή γνώση των προδιαγραφών του κατασκευαστή.

(Modbus)-Το κύριο πρόβλημα του Modbus στην ψηφιακή μετάβαση της ναυτιλίας είναι η παντελής έλλειψη πλαισίου. Διαχειρίζεται μόνο διευθύνσεις μνήμης (registers) και τιμές, π.χ. μια τιμή “40001: 1250” δεν σημαίνει κάτι από μόνη της. Δεν αντιλαμβάνεται κάποιος αν αντιστοιχεί σε πίεση, θερμοκρασία ή κωδικός σφάλματος, ούτε την μονάδα μέτρησης, ούτε την ώρα λήψης. Η σημασία ή αντιστοιχία των δεδομένων υπάρχει μόνο σε χειρόγραφο “Modbus Maps” και η απειλή από κυβερνοεπιθέσεις είναι μεγάλη αν συνδεθεί στο δίκτυο καθώς δεν διαθέτει ενσωματωμένη ασφάλεια, (Kriile κ.ά., 2013; EMQ, 2023).

Η ενσωμάτωση των legacy συστημάτων (π.χ. NMEA, Modbus) σε σύγχρονα πλαίσια DT απαιτεί μια συστηματική σύνδεση μεταξύ της OT και IT τεχνολογίας, μέσω βιομηχανικών IoT gateways και edge υποδομής. Τα gateways λειτουργούν ως μεταφραστές πρωτοκόλλων και κόμβοι ελέγχου ροής δεδομένων στο άκρο του δικτύου (edge), επιτρέποντας στα δεδομένα των πλοίων να τροφοδοτούν με συνέπεια το DT χωρίς να απαιτείται πλήρης αντικατάσταση του τρέχοντος εξοπλισμού.

**Χρήση Βιομηχανικών Πυλών IoT (Industrial IoT Gateways):** Ακολουθεί μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική ενσωμάτωσης τεσσάρων σταδίων.

1. Φυσική Διασύνδεση και Απόκτηση Δεδομένων (Physical Interfacing & Acquisition)

Η πύλη συνδέεται φυσικά με τα δίκτυα του πλοίου (NMEA 0183, Modbus RTU/TCP)

2. Ανάλυση και Κανονικοποίηση (Parsing & Normalization)

Το λογισμικό της πύλης αναλαμβάνει την αποκωδικοποίηση των ακατέργαστων δεδομένων.

3. Σημασιολογική Χαρτογράφηση (Semantic Mapping)

Η πύλη όχι μόνο προωθεί τους αριθμούς, αλλά και τους βελτιώνει με μεταδεδομένα και τους ευθυγραμμίζει με το κοινό μοντέλο δεδομένων του DT (π.χ. σύμφωνα με το πρότυπο ISO 19848).



#### 4. Μετατροπή Πρωτοκόλλου και Μετάδοση (Protocol Conversion & Transmission)

Τα εμπλουτισμένα, δομημένα δεδομένα μετατρέπονται σε σύγχρονα πρωτόκολλα IoT για μετάδοση με τις δύο κυρίαρχες επιλογές να είναι τα πρωτόκολλα MQTT και OPC UA, (Gautam κ.ά., 2025; Patera κ.ά., 2022; Coelho κ.ά., 2022; Waqas, 2025).

**Ευφυΐα στο Άκρο:** Gateway Edge Computing για βελτιστοποίηση Legacy Δεδομένων  
Η μαζική μεταφορά δεδομένων από παραδοσιακά συστήματα στο cloud είναι συχνά αναποτελεσματική και δαπανηρή. Η ενσωμάτωση των legacy συστημάτων απαιτεί προσαρμογή έξυπνων συσκευών (Gateway με edge computing). Το gateway λειτουργεί όχι μόνο ως παθητικός μετατροπέας, αλλά και ως υπολογιστικός κόμβος που εκτελεί εργασίες προεπεξεργασίας μόλις λάβει τα δεδομένα από την πηγή τους (edge), (Liao, 2025; Corso Systems, n.d).

#### 5.2.5 ΣΥΝΕΧΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Στην 5η φάση, το DT εξελίσσεται από ένα εργαλείο παρακολούθησης σε ένα σύστημα πρόβλεψης.

Η αδιάλειπτη βελτιστοποίηση είναι ένα χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα σύγχρονα DT από τα βασικά συστήματα ψηφιακής παρακολούθησης. Σε αυτό το σημείο, το DT δεν λειτουργεί αποκλειστικά ως ψηφιακό αντίγραφο, αλλά μεταβάλλεται βάσει δεδομένων σε πραγματικό χρόνο που συλλέγονται από αισθητήρες, υποσυστήματα και τα λειτουργικά συστήματα του σκάφους. Η συνεχής ροή πληροφοριών επιτρέπει στο ψηφιακό μοντέλο να εντοπίζει αποκλίσεις από την αναμενόμενη συμπεριφορά, να προσαρμόζει τις προβλέψεις του και να προτείνει βελτιώσεις στις λειτουργικές διαδικασίες που μπορούν να εφαρμοστούν. Για παράδειγμα, μέσω της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και της ανάλυσης δεδομένων, ένα DT μπορεί να εντοπίσει μοτίβα στα κρίσιμα συστήματα κινητήρων και πρόωσης προτείνοντας λειτουργικές τροποποιήσεις που ελαχιστοποιούν τις δαπάνες στα καύσιμα ή την πιθανότητα βλάβης, (Lv κ.ά., 2023).

Η απόδοση ενός πλοίου επηρεάζεται από διάφορους μεταβλητούς παράγοντες, όπως οι περιβαλλοντικές διαταραχές (άνεμος, κύματα, ρεύματα), η κατάσταση της γάστρας, οι διακυμάνσεις του φορτίου και η βελτιστοποίηση διαδρομής. Η χρήση τεχνικών ML σε



συνδυασμό με ιστορικά δεδομένα ταξιδιού και πληροφορίες που σχετίζονται με την δομή και την φόρτωση του πλοίου, επιτρέπει στο μοντέλο να εκπαιδεύεται με την πάροδο του χρόνου.

Ένα DT που ασχολείται με τη συνεχή βελτιστοποίηση μπορεί να ενσωματώσει αυτά τα δεδομένα για να προσδιορίσει εναλλακτικές λύσεις διαδρομής μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου και κατ' επέκταση τις εκπομπές, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στο τρέχον κανονιστικό πλαίσιο της ναυτιλίας (Troupiotis-Kapeliaris κ.ά., 2022).

Οι Assani κ.ά., (2022) επιβεβαιώνουν πως ένα SDT μπορεί να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά για τον προγραμματισμό της συντήρησης, την προληπτική συντήρηση, την πρόβλεψη βλαβών, την ανίχνευση βλαβών σε πραγματικό χρόνο, τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών επί του πλοίου, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων, της μείωσης της ρύπανσης, της παρακολούθησης της κατάστασης του κύτους και της συνολικής μείωσης του κόστους.

Συμπερασματικά, η Φάση 5 είναι η φάση κατά την οποία το DT αρχίζει να δημιουργεί αξία, λειτουργώντας ως μηχανισμός συνεχούς μάθησης μέσα από την επιχειρησιακή του εμπειρία χρησιμοποιώντας αυτές τις γνώσεις για να βελτιώσει τον τρόπο λειτουργίας του.

### 5.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: STENA LINE (STENA FUEL PILOT)

**Πλοίο:** Stena Scandinavica (Επιβατηγό/Οχηματαγωγό πλοίο).

**Τεχνολογία:** Ψηφιακό Δίδυμο (Digital Twin) βασισμένο σε AI για βελτιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου.

#### 1. Στόχος

Η Stena Line είχε ως στόχο τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 2,5% ετησίως. Σε συνεργασία με την Hitachi Europe, αναπτύχθηκε ένα AI μοντέλο που λειτουργεί ως DT για βελτιστοποίηση. Σχεδιάστηκε έτσι ώστε οι καπετάνιοι και οι πιλότοι να λαμβάνουν άμεσες αποφάσεις σχετικά με την ταχύτητα και την πλοήγηση, λαμβάνοντας υπόψη τις καιρικές συνθήκες, τα ρεύματα και το φορτίο, πράγμα που ήταν δύσκολο να γίνει με ακρίβεια βασιζόμενοι μόνο στην εμπειρία, (SAFETY4SEA, 2018).



## 2. Υλοποίηση

**Βήμα 1:** Συλλογή δεδομένων (ενσωμάτωση & άκρη-Integration & Edge): Εγκατάσταση αισθητήρων και ενσωμάτωση με τα υπάρχοντα συστήματα του πλοίου, συμπεριλαμβανομένων της ταχύτητας, των στροφών του κινητήρα, του βυθίσματος και της θέσης GPS, χρησιμοποιώντας τεχνολογία πύλης (Gateway) για τη λήψη δεδομένων από τα παλαιά συστήματα του πλοίου.

**Βήμα 2:** Κατασκευή του μοντέλου με ανάπτυξη μιας υπολογιστικής αναπαράστασης του πλοίου που περιλάμβανε τα φυσικά χαρακτηριστικά του (π.χ. υδροδυναμικές

**Βήμα 3:** Εμπλουτισμός με εξωτερικά δεδομένα όπως, μετεωρολογικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (άνεμος, ύψος κυμάτων) και τρέχουσες πληροφορίες.

**Βήμα 4:** Εκπαίδευση τεχνητής νοημοσύνης (μηχανική μάθηση). Το σύστημα απέκτησε γνώσεις σχετικά με τις αντιδράσεις του πλοίου υπό διάφορες συνθήκες. Εκτέλεσε χιλιάδες προσομοιώσεις στο Cloud για να προσδιορίσει τον πιο οικονομικό συνδυασμό ταχύτητας και διαδρομής.

Μετά την πιλοτική εφαρμογή στο πλοίο Stena Scandinavica, η εταιρεία εξέδωσε μια επιπλέον ανακοίνωση στην οποία επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητα του προγράμματος και την επέκτασή του (Stena Fuel Pilot) και θα εφαρμοστεί σε πέντε ακόμη πλοία της Stena Line. Ο στόχος είναι η εφαρμογή του σε ολόκληρο τον στόλο, σε όλα τα 37 πλοία στην Ευρώπη, κατά τη διάρκεια του 2020.

## 3. Οφέλη

Τα αποτελέσματα ήταν μετρήσιμα:

**Μείωση της κατανάλωσης:** Επιτεύχθηκε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 2-3% ανά ταξίδι.

**Περιβαλλοντικό αποτύπωμα:** Σημαντική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, βοηθώντας τον οργανισμό να επιτύχει τους στόχους βιωσιμότητας.

**Βοήθεια για το πλήρωμα:** Με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης, ένας καπετάνιος ή αξιωματικός μπορεί να βελτιώσει την εξοικονόμηση καυσίμων πιο γρήγορα, συμβάλλοντας έτσι σε ένα πιο βιώσιμο ταξίδι.



## 6. ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ DT ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

Ως ένα βαθμό οι ναυτιλιακές έχουν υιοθετήσει τον ψηφιακό μετασχηματισμό τόσο στα περιουσιακά τους στοιχεία, όσο και στις υποστηρικτικές τους δομές στην ξηρά. Ο κλάδος μεταβαίνει ήδη σε ένα νέο παράδειγμα λειτουργίας, εφαρμόζοντας τεχνολογίες που συνδέονται με την Βιομηχανία 4.0 (I4.0) όπως, η AI, το DT, το Cloud Computing, το IoT, η Big Data ανάλυση, οι AR/ VR κ.λπ., (Ichimura κ.ά., 2022).

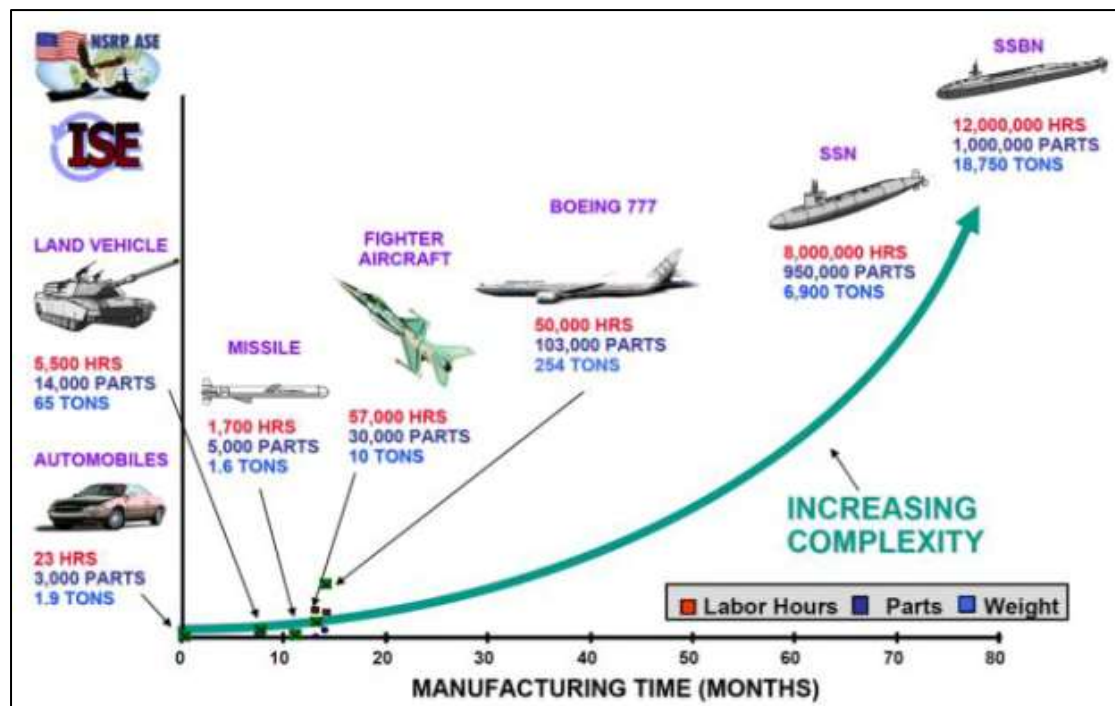
Η ώθηση για αυτόν τον ψηφιακό μετασχηματισμό απορρέει από την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους, ενίσχυσης της ασφάλειας, αύξηση της επιχειρησιακής απόδοσης, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες κανονιστικές απαιτήσεις στον τομέα της ναυτιλίας και τον σημαντικό όγκο δεδομένων που διαχειρίζεται, (Giering and Dyck, 2021). Ωστόσο για να είναι εφικτή η μετάβαση και η ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας DT πρέπει να ξεπεραστούν τεχνολογικές, επιχειρησιακές και κανονιστικές προκλήσεις.

### 6.1 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

#### 6.1.1 *ΟΛΟΚΛΗΡΩΣΗ*

Η ολοκλήρωση είναι ένα από τα κύρια ζητήματα που πρέπει να διαχειρίζεται κάθε περίπλοκο σύστημα. Η ναυτιλιακή βιομηχανία ενσωματώνει εξαρτήματα, συστήματα, τεχνολογίες και δεδομένα. Πολλές μέθοδοι σχεδιασμού και ανάπτυξης της βιομηχανίας βασίζονται στην εμπειρία και σε μοναδικές τακτικές που δεν είναι συμβατές με άλλες τεχνολογίες ή επιχειρήσεις.

Σύμφωνα με τους Morais κ.ά., (2018), η πολυπλοκότητα της ναυπηγικής βιομηχανίας ξεπερνά την πολυπλοκότητα σχεδόν όλων των άλλων βιομηχανιών. Για παράδειγμα, αν ληφθεί υπόψη η ποσότητα των απαιτούμενων εξαρτημάτων, η κατασκευή ενός πλοίου είναι πολύ πιο περίπλοκη από εκείνη ενός αυτοκινήτου ή ακόμη και ενός αεροπλάνου, (Σχήμα 6.1).



**Σχήμα 6.1:** Απεικόνιση της πολυπλοκότητας των ναυπηγείων: Αριθμός εξαρτημάτων και ωρών, (Morais κ.ά., 2018)

Εκτός από την παρουσία πολυάριθμων εξαρτημάτων, η ύπαρξη πολλαπλών σιλό πληροφοριών σε κάθε τμήμα των ναυπηγείων και ο αριθμός των συνδέσεων μεταξύ τους, συμβάλλει στην αυξημένη πολυπλοκότητα. Σύμφωνα με τους Lv κ.ά. (2023), η φάση του σχεδιασμού αποτελεί τη φάση με τη μεγαλύτερη ένταση δεδομένων στη διαδικασία ναυπήγησης πλοίων.

Στη ναυπηγική βιομηχανία, σε αντίθεση με σχεδόν κάθε άλλη βιομηχανία, οι ναυπηγοί σχεδιάζουν, κατασκευάζουν και προμηθεύονται ταυτόχρονα. Η ενσωμάτωση των πληροφοριών από όλες αυτές τις βάσεις δεδομένων που καλύπτουν όλες αυτές τις λειτουργίες σε ένα μοναδικό DT αποτελεί πρόκληση, (Fonseca κ.ά., 2022).

Ένα επιπλέον ζήτημα, είναι η έλλειψη διαφάνειας σε ολόκληρη τη βιομηχανία που εμποδίζει την ανταγωνιστικότητα και προκαλεί ετερογένεια δεδομένων.

Σύμφωνα με τον Van Os (2018), ο ιδιοκτήτης ενός πλοίου επιβαρύνεται με έξοδα για τη δημιουργία ενός τρισδιάστατου μοντέλου που δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας που επιβάλλει το ναυπηγείο. Ενώ τα ναυπηγεία είναι υποχρεωμένα να διαφυλάξουν τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

τους, ωστόσο, πρέπει επίσης να συνεργαστούν με τον πλοιοκτήτη για να του παράσχουν ένα ψηφιακό δίδυμο (τρισεδιάστατο μοντέλο 3D), το οποίο θα του επιτρέπει να λειτουργεί και να συντηρεί αποτελεσματικά το πλοίο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του.

Ομοίως, το ίδιο φαινόμενο επικρατεί και στην σχέση νηογνώμονα πλοιοκτήτη, κατά την οποία παρατηρείται πως ο ιδιοκτήτης του πλοίου δεν έχει εξουσία επί του συνόλου των πληροφοριών που μπορεί να σχετίζονται λόγω χάρη με την διαχείριση των πιστοποιήσεων και των δεδομένων επιθεώρησης του νηογνώμονα. Από την άλλη πλευρά, οι πλοιοκτήτες σε αντάλλαγμα θα μπορούσαν να παρέχουν επιχειρησιακά δεδομένα προς τα ναυπηγεία και τους νηογνώμονες. Οι σχεδιαστές θα μπορούν να τα αξιολογήσουν και να τα χρησιμοποιήσουν για τη βελτίωση των σχεδίων της επόμενης γενιάς σκαφών, και οι νηογνώμονες για την βελτίωση των υπηρεσιών τους προς τους πλοιοκτήτες.

Οι απαιτήσεις ολοκλήρωσης θα επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των πλοίων καθ' όλη την διάρκεια της ζωής τους. Η συνδεσιμότητα και η συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μπορούν να καταστήσουν δυνατή την εφαρμογή και την χρησιμότητα του DT.

Εντούτοις, οι τρέχουσες συνθήκες επιχειρηματικότητας και ανταγωνισμού, απαιτούν και συνεργατικές προσπάθειες στο πλαίσιο της ναυτιλιακής βιομηχανίας για την εξεύρεση μιας λύσης. Ένας τρόπος σύμφωνα με τους Sullivan κ.ά. (2020), θα ήταν τα είδη και οι πηγές δεδομένων να αντιμετωπιστούν νωρίς, εμπλέκοντας και συνδέοντας όλους τους φορείς, από τον σχεδιασμό του περιουσιακού στοιχείου μέχρι και την απόσυρση.

Κατά αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να διασφαλιστεί ότι όλοι οι ενδιαφερόμενοι στην αλυσίδα μπορούν να επωφεληθούν από την εφαρμογή της τεχνολογίας DT και να προσθέσουν αξία στις επιχειρήσεις τους, ενώ παράλληλα θα προκύψουν ασφαλέστερα, αποδοτικότερα, ανθεκτικότερα και υποκείμενα σε απρόσκοπτη διασύνδεση, πλοία.



### *6.1.2 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ*

Η ταχεία πρόοδος και η ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας ενέχει τον κίνδυνο, οι χειριστές να αντιμετωπίσουν δυσκολίες στην αποτελεσματική αφομοίωση στο νέο τους περιβάλλον και στην επιτυχή εκτέλεση των καθημερινών τους δραστηριοτήτων.

Καθώς η ζήτηση για δεδομένα και αναλυτικές ικανότητες αυξάνεται, καθίσταται όλο και πιο ζωτικής σημασίας η διδασκαλία αυτών των δεξιοτήτων στους σημερινούς εργαζόμενους και πρωτίστως των εργαζομένων σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπως το περιβάλλον της ναυτιλίας. Αυτό έχει αντιμετωπιστεί σε διάφορους κλάδους μέσω πρωτοβουλιών για την ανάπτυξη δεξιοτήτων, εκπαιδεύσεων και συνεχούς επαγγελματικής κατάρτισης, (Sullivan κ.ά., 2020).

Υπό το πρίσμα της αύξησης των αυτόνομων συστημάτων και της ζήτησης για αυτόνομα πλοία, θα αποτελέσει πρόκληση για τις επόμενες δεκαετίες να συμβαδίσει κανείς με τα συνεχώς μεταβαλλόμενα και μερικές φορές ανταγωνιστικά τεχνολογικά πρότυπα και βέλτιστες πρακτικές. Είναι ζωτικής σημασίας να αναγνωρίσουμε ότι ο πρωταρχικός στόχος της εφαρμογής της αυτοματοποίησης είναι η αύξηση της παραγωγικότητας και της ασφάλειας με την απαλλαγή των ανθρώπων από την ενασχόληση με θεωρούμενα επικίνδυνα καθήκοντα, (Sharma A. κ.ά., 2021).

Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή και λειτουργία των τεχνολογιών αυτοματισμού στη ναυτιλιακή βιομηχανία εξαρτάται και από την καταλληλότητα των προγραμμάτων εκπαίδευσης και κατάρτισης που έχουν σχεδιαστεί για να εξοπλίσουν τους υποψήφιους χειριστές πλοίων.

Η βιβλιογραφία (Baum-Talmor and Kitada, 2022; Theotokas κ.ά., 2024) αποκάλυψε ότι οι αντιλήψεις των ναυτικών για το επάγγελμά τους εξακολουθούν να δίνουν προτεραιότητα στις φυσική εργασία, παρά την παρουσία της ψηφιοποίησης και της αυτοματοποίησης.

Η ανάπτυξη της αναβάθμισης των δεξιοτήτων των ναυτικών βασίζεται κυρίως στους ίδιους καθώς η παροχή κατάρτισης από πλευράς των ναυτιλιακών εταιρειών δεν είναι δεδομένη. Έτσι μεγάλη πλειονότητα των ναυτικών πρέπει να επενδύσει στην επικαιροποίηση των εξειδικευμένων πιστοποιητικών της προκειμένου να εισέλθει ή να παραμείνει στη αγορά εργασίας.



Η ενσωμάτωση ψηφιακά προσανατολισμένων διαδικασιών στα πλοία μπορεί να αποτελέσει πρόκληση για τις παραδοσιακές αξίες των ναυτικών, οι οποίες δίνουν έμφαση στη σκληρότητα και τη δύναμη.

Κατά συνέπεια, προκειμένου να προσαρμοστούν στην τεχνολογία, θα χρειαστεί μια αλλαγή προοπτικής στο ναυτικό επάγγελμα. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το ανθρώπινο δυναμικό είτε στην ξηρά είτε επί του πλοίου είναι εφοδιασμένο με δεξιότητες για να εργάζεται στο σύγχρονο περιβάλλον που υπόκειται στο πλαίσιο της "Ναυτιλίας 4.0", οι ναυτιλιακές εταιρείες πρέπει να αναλάβουν μεγαλύτερη ευθύνη επενδύοντας περισσότερο στην εκπαίδευση σε τεχνικές που σχετίζονται με την ψηφιοποίηση, (Theotokas κ.ά., 2024).

Οι Madusanka κ.ά. (2023), αναφέρουν την αξία της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας DT στην εκπαίδευση και την κατάρτιση των ναυτικών, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω της αξιοποίησης διαφόρων πλατφορμών προσομοίωσης, όπως:

- Προσομοιωτές πλήρους αποστολής (Full Mission Simulators)
- Προσομοιωτές μερικών εργασιών (Part Task Simulators)
- Συστήματα εκπαίδευσης μέσω υπολογιστή

Στους προσομοιωτές μερικών εργασιών, οι πραγματικές εγκαταστάσεις λειτουργούν σε συνδυασμό με μια εικονική πλατφόρμα. Αυτές οι πλατφόρμες έχουν τη δυνατότητα να εγγυώνται την ασφάλεια των εργαζομένων, συμπεριλαμβανομένων των εκπαιδευτών και των εκπαιδευομένων, ενώ παράλληλα διευκολύνουν την εκτέλεση κρίσιμων δραστηριοτήτων χωρίς να θέτουν σε κίνδυνο τις ακριβείς πραγματικές πλατφόρμες.

Ως εκ τούτου, αποτελεί πρόκληση η αποκατάσταση του μέλλοντος της ναυτικής εκπαίδευσης και κατάρτισης (Maritime Education and Training – MET), ώστε να προσεγγιστεί ως μια συνεργατική προσπάθεια στην οποία θα συμμετέχουν όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη του ναυτιλιακού τομέα. Η ενίσχυση των σχέσεων βιομηχανίας-MET και η προώθηση της συνεργασίας θα είναι επιτακτική ανάγκη για την προώθηση της τεχνικής προόδου και την επίτευξη των επιθυμητών στόχων. Η πιθανή εφαρμογή του DT αναγνωρίζεται ευρέως, αλλά ο αντίκτυπος στο προσωπικό των πλοίων απαιτεί πρόσθετη διερεύνηση.



### 6.1.3 ΚΟΣΤΟΣ

Όσον αφορά την υιοθέτηση και την εφαρμογή νέων τεχνολογιών, πρέπει να ληφθούν υπόψη τα άμεσα και τα έμμεσα κόστη που προκύπτουν. Παρά το γεγονός ότι αρκετές τεχνολογίες έχουν γίνει πιο προσιτές τα τελευταία χρόνια (IoT, Big Data, Cloud, CAD, CAE, VR, AR, AI, AM), εξακολουθούν να υπάρχουν όρια στο τι μπορούν να δαπανήσουν οι οργανισμοί. Οι εταιρείες που μπόρεσαν να επενδύσουν σε λύσεις ψηφιακής τεχνολογίας έχουν αποδείξει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα και ευελιξία στην αντιμετώπιση των μεταβαλλόμενων βιομηχανικών αναγκών, (Sullivan κ.ά., 2020).

Η ψηφιακή τεχνολογία μπορεί να αποτελέσει μοχλό ανάπτυξης που θα υποστηρίξει την επόμενη γενιά πλοίων, ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μέσο για την υλοποίηση των δυνατοτήτων και όχι ως σκοπός.

Παρά τα δυνητικά οφέλη ή τις δυνατότητες της τεχνολογίας, οι εταιρείες σπάνια είναι σε θέση να επικεντρωθούν αποκλειστικά στο κόστος της απόκτησης. Επιπλέον, το κόστος των υλικών, το λειτουργικό κόστος, η αλλαγές στον υπάρχοντα εξοπλισμό, η συντήρηση και η εκπαίδευση του προσωπικού για τη διαχείριση των νέων τεχνολογιών αποτελούν προκλήσεις για την επιτυχή απόκτηση και χρήση καινοτόμων λύσεων.

Για να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές του το DT, ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια που πρέπει να ξεπεραστεί για την εφαρμογή του, είναι το σημαντικό κόστος που συνδέεται με την ανάπτυξή του. Η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων εξαιρετικά υψηλής πιστότητας και η προσομοίωση των διαδικασιών για την παραγωγή ενός DT είναι μια χρονοβόρα και εντάσεως εργασίας προσπάθεια που απαιτεί μεγάλο όγκο επεξεργαστικών πόρων για να εκτελεστεί, καθιστώντας το DT μια δαπανηρή επένδυση.

Οι S. Mihaί κ.ά. (2022), τονίζουν την σημασία, κατά το σχεδιασμό ενός DT, του να λαμβάνεται υπόψη το πρόσθετο κόστος που προκύπτει από τις απαιτήσεις της συνεχούς συντήρησης, συμπεριλαμβανομένων των αναβαθμίσεων λογισμικού και των τροποποιήσεων στο φυσικό περιουσιακό στοιχείο. Οι τροποποιήσεις αντιστοιχούν στην ενσωμάτωση αισθητήρων για τη συλλογή δεδομένων στο υπάρχον σύστημα και δημιουργία IT υποδομής υψηλής απόδοσης, η οποία περιλαμβάνει υλικό και λογισμικό για την αποθήκευση και την επεξεργασία αυτών των δεδομένων.

Ο Stamoulis (2022), στην έρευνά του με φορείς του χώρου της ναυτιλιακής βιομηχανίας στην Ελλάδα, αναδεικνύει την ανησυχία σχετικά με την ικανότητά τους



να αποδείξουν την αποδοτικότητα κόστους μιας τόσο ακριβής λύσης. Η ανησυχία αυτή απορρέει από την πεποίθηση της πλειοψηφίας των ερωτηθέντων ότι η εγκατάσταση, η ανάπτυξη και η λειτουργία ενός DT συνεπάγονται σημαντικά έξοδα.

Ένα DT χαμηλής πιστότητας έχει ευνοϊκή αναλογία κόστους-οφέλους, καθώς συμβάλλει στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών και της χρήσης του στόλου. Αυτή η μορφή DT χρησιμοποιείται ήδη από κατασκευαστές κινητήρων πολιτικής αεροπορίας.

Ένα DT υψηλής πιστότητας μπορεί να ενσωματώσει γνώσεις σχετικά με τη γεωμετρία των εξαρτημάτων, τα μηχανικά συγκροτήματα και τις λεπτομέρειες βαθμονόμησης του συστήματος και να τις ενημερώνει μέσω της συλλογής δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του περιουσιακού στοιχείου. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τη διάρκεια ζωής λόγω κόπωσης των εξαρτημάτων, αλλά με την τρέχουσα κατάσταση της τεχνολογίας και του κόστους, απαιτεί τεράστιο όγκο δεδομένων και, ιδίως, σημαντικά έξοδα επένδυσης και συντήρησης, (Ibrion κ.ά., 2019).

## 6.2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Η κατάσταση της τεχνολογίας των ψηφιακών δίδυμων, παρόλο που έχει μεγάλες δυνατότητες, βρίσκεται ακόμα σε νηπιακό στάδιο και η ανάπτυξη ενός DT ανεξαρτήτως του τομέα στον οποίο εφαρμόζεται, ενέχει προκλήσεις που εξαρτώνται από την κλίμακα και την πολυπλοκότητά του, (Singh κ.ά., 2021). Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα εμπόδια σχετικά με την τεχνολογία που είναι κοινά για όλους τους τομείς.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, η κυβερνοασφάλεια, θέματα σχετικά με τα δεδομένα και η τεχνολογική ωριμότητα είναι από τα πιο κοινά προβλήματα για την ανάπτυξη και την εφαρμογή ενός DT και θα αναλυθούν παρακάτω.

### 6.2.1 *ΚΥΒΕΡΝΟΑΣΦΑΛΕΙΑ*

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας πληροφοριών και επικοινωνιών (ICT) στον τομέα της ναυτιλίας, επιδεινώνει τις υπάρχουσες απειλές και εισάγει νέους κινδύνους. Η υιοθέτηση από τον τομέα συνεπάγεται ολοένα και πιο αυτοματοποιημένες και ψηφιοποιημένες λύσεις, τόσο στα πλοία όσο και στους οργανισμούς, συνοδευόμενη αναμφίβολα από μια έξαρση των κινδύνων στον κυβερνοχώρο.



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Στο πλαίσιο αυτό, η ανάπτυξη των DT παρουσιάζει νέες προκλήσεις και ευκαιρίες για την αντιμετώπιση των κυβερνοαπειλών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, έχει καταγραφεί αύξηση 900% στα περιστατικά παραβίασης της ασφάλειας των πλοίων σε σχέση με τα παλαιότερης τεχνολογίας, τα οποία λειτουργούσαν με περιορισμένη ή καθόλου σύνδεση στο διαδίκτυο, (Akran κ.ά., 2022).

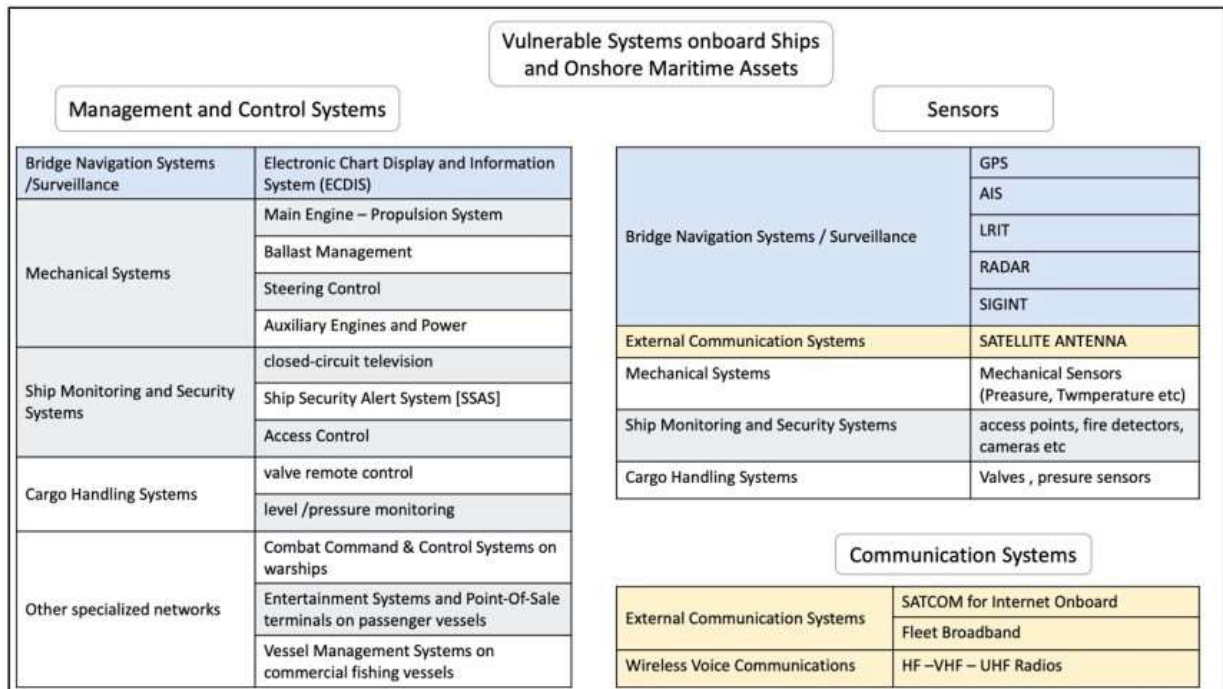
Ποικίλες κατηγορίες κακόβουλων ενεργειών, όπως malware, spoofing, ransomware, επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας (DoS), παραβιάσεις δεδομένων, παρεμβολές στα συστήματα πλοήγησης, είναι δυνατό να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια του πληρώματος, να διαταράξουν την ομαλή λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας, να προκαλέσουν ζημιές στο φορτίο, αλλά και να οδηγήσουν και σε περιβαλλοντική ζημία, π.χ. διαρροές καυσίμων.

Τα συστήματα πλοήγησης, επιτήρησης και επικοινωνιών, καθώς και διοργανωτικές διαδικασίες τόσο επί του πλοίου όσο και στην ξηρά, συμπεριλαμβανομένων του πηδαλίου, της πρόωσης, του ελέγχου φορτίου, του ECDIS, του VSAT, των ICS του GPS, του AIS και των εταιρικών δικτύων IT, έχουν ήδη ψηφιοποιηθεί, γεγονός που τα καθιστά ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις, (Komianos, 2018).

Στους Πίνακες 6.1, 6.2, συνοψίζονται για τα κύρια συστήματα αυτοματισμού στα σύγχρονα και αυτόνομα πλοία, οι ευπάθειες και οι συνέπειες που μπορεί να αποφέρει μια κακόβουλη επίθεση.



“Ιωάννα Δελή”,  
 “ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
 Εφαρμογές και Προοπτικές ”



**Πίνακας 6.1:** Ευάλωτα συστήματα στον θαλάσσιο τομέα, (Ροτάμος κ.ά., 2024)



“Ιωάννα Δελή”,  
 “ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
 Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Systems	Vulnerabilities	Consequences
Automatic Identification System (AIS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Signal interference</li> <li>- False information sharing</li> <li>- Malware</li> <li>- Spoofing</li> <li>- No encryption</li> <li>- Signal jamming</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ship hijacking</li> <li>- Destruction of data</li> <li>- Theft of valuable data</li> </ul>
Electronic Chart Display Information System (ECDIS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obsolete OSs</li> <li>- Insecure update mediums</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Loss of communication with the NS</li> <li>- Hijacking of a ship</li> <li>- Sensitive data theft</li> <li>- Compromising computers and OSs</li> </ul>
GNSS and GPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jamming attacks</li> <li>- Weak signal strength</li> <li>- Interference</li> <li>- Spoofing attacks</li> <li>- DoS/DDoS attacks</li> <li>- Packet modification</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ship hijacking</li> <li>- Problems with the NS</li> <li>- GPS signal false information</li> <li>- Disrupt vessel operation</li> <li>- Delays in services</li> </ul>
Radar	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jamming attacks</li> <li>- Spoofing attacks</li> <li>- DoS/DDoS attacks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Loss of communication with the NS</li> <li>- Loss of lives and cargo</li> <li>- Delays in cargo management</li> </ul>
Global Maritime Distress System (GMDSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Malware</li> <li>- Spoofing attacks</li> <li>- DoS/DDoS attacks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wrong position of the ship</li> <li>- Further attacks on ECDIS</li> </ul>
Industrial Control Systems (ICSs)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inadequate ACM</li> <li>- No support for integrity check</li> <li>- Information exposure</li> <li>- Poor patch management</li> <li>- Hardware failures</li> <li>- Improper security configuration</li> <li>- Lack of network segmentation</li> <li>- Weak password policies</li> <li>- Lack of firewalls</li> <li>- Lack of encryption</li> <li>- Weak remote access policies</li> <li>- Weak USB policy</li> <li>- Lack of training for SOS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ship hijacking</li> <li>- Unavailability of the ICS</li> <li>- Data leakage</li> <li>- Physical damage to facilities</li> <li>- Interference with safety systems</li> <li>- Unplanned shutdowns</li> <li>- Damage to equipment</li> </ul>
Propulsion and machinery management and power control systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Malware attack</li> <li>- DoS/DDoS attacks</li> <li>- Smuggling</li> <li>- Stealing</li> <li>- Manipulation attacks</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ship hijacking</li> <li>- Diversion of the ship</li> <li>- PS could be interrupted</li> <li>- Ship damage</li> <li>- Financial damage</li> <li>- Disclosure of sensitive data</li> </ul>
Very Small Aperture Terminal (VSAT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fake signals</li> <li>- Malware attack</li> <li>- Stealing</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Theft of sensitive data</li> <li>- Upload of malware</li> <li>- Change of GPS coordinates</li> </ul>
IT network systems	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Poor access control</li> <li>- DoS/DDoS attacks</li> <li>- Weak password policies</li> <li>- Malware attacks</li> <li>- Poor patch management</li> <li>- Improper security configuration</li> <li>- Poor security documentation</li> <li>- Lack of network segmentation</li> <li>- Lack of firewalls</li> <li>- Lack of encryption</li> <li>- Weak remote access policies</li> <li>- Weak USB policy</li> <li>- Lack of training for SOS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Upload malware</li> <li>- Unauthorised physical access</li> <li>- Unauthorised logical access</li> <li>- Loss of confidential documents</li> <li>- Financial damage</li> <li>- Theft of sensitive data</li> <li>- Reputation damage</li> </ul>

OS: Operating System. NS: Navigational System. ACM: Access Control Management. SOS: Secure Operations of the System. PS: Propulsion System.

**Πίνακας 6.2:** Περίληψη των κύριων τρωτών σημείων των σύγχρονων συστημάτων πλοίων και των συνεπειών τους, (Ακραν κ.ά., 2024)



Έτσι, κάθε φορά που μεταδίδονται δεδομένα μεταξύ του DT και του φυσικού του αντίγραφου ή μεταξύ των διακομιστών που φιλοξενούν το DT, υπάρχει σημαντικός κίνδυνος απώλειας κρίσιμων πληροφοριών όπως:

1. Λεπτομέρειες σχετικά με τη μηχανική και λειτουργική κατάσταση του σκάφους
2. Δεδομένα πλοήγησης και γεωγραφικής θέσης
3. Πληροφορίες από αισθητήρες και οπτικά συστήματα
4. Δεδομένα που αφορούν το ανθρώπινο δυναμικό, συμπεριλαμβανομένων των προγραμμάτων του πληρώματος και των επιχειρησιακών καθηκόντων
5. Περιβαλλοντικά και επιχειρησιακά δεδομένα, όπως μετεωρολογικές συνθήκες, προδιαγραφές φορτίου και λεπτομέρειες προορισμού.

Η διασύνδεση του DT με εξωτερικά συστήματα (λιμένες, διαχειριστές φορτίου, προμηθευτές) αυξάνει τον κυβερνοχώρο επίθεσης (attack surface).

Είναι επιτακτική ανάγκη να λαμβάνονται υπόψη έννοιες ασφάλειας δεδομένων, όπως η ιδιωτικότητα, ο έλεγχος ταυτότητας, η ακεραιότητα και η ιχνηλασιμότητα, κατά την ανάπτυξη συστημάτων DT.

Ενδεικτικές μέθοδοι ασφάλειας περιλαμβάνουν την κρυπτογράφηση δεδομένων, τα δικαιώματα πρόσβασης, την αυτοματοποιημένη σάρωση του πηγαίου κώδικα, τις δοκιμές διείσδυσης και τις τακτικές επιθεωρήσεις. Επιπλέον, μια πιθανή στρατηγική για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων είναι η αξιοποίηση των τεχνολογιών blockchain για τη διασφάλιση του απορρήτου των δεδομένων κατά την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ κατανεμημένων τεχνολογικών συστημάτων, (Mihai κ.ά., 2022).

Η αποτελεσματικότητα αυτών των επιθέσεων εξαρτάται και από την υπολογιστική υποδομή που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη των DT. Είναι σαφές ότι η έκταση και το εύρος της επίθεσης ποικίλλει σε μεγάλο βαθμό, επειδή η τεχνολογία DT βασίζεται στη διασύνδεση δύο κόσμων μέσω συστημάτων επικοινωνίας, τεχνολογιών και αλγορίθμων, (Alcaraz and Lopez, 2022).

### 6.2.2 ΔΕΛΟΜΕΝΑ

Προκειμένου να βελτιωθεί η ακρίβεια, η αποτελεσματικότητα και η ευελιξία των υπηρεσιών που βασίζονται σε DT, όπως η διασφάλιση της ποιότητας, η πρόβλεψη, η απόδοση και η βελτιστοποίηση διαδικασιών, απαιτείται συλλογή ολοκληρωμένων



δεδομένων. Τα ολοκληρωμένα δεδομένα περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα πληροφοριών, όπως δεδομένα που αφορούν τόσο για την κανονική όσο και για την ανώμαλη κατάσταση, δεδομένα τόσο για τα συχνά όσο και για ασυνήθιστα περιστατικά, δεδομένα που προκύπτουν τόσο για το βέβαιο σενάριο όσο και για το αβέβαιο κτλ.

Οι εφαρμογές DT που αναπτύσσονται με βάση μη ολοκληρωμένα δεδομένα αντιμετωπίζουν διάφορες προκλήσεις. Σύμφωνα με τους M. Zhang κ.ά. (2022), για την αντιμετώπιση τους πρέπει να λαμβάνονται δεδομένα τόσο από τον φυσικό όσο και από τον ψηφιακό κόσμο. Λόγω της διαφορετικής προέλευσης των δεδομένων που σχετίζονται με DT, υπάρχει παρουσία θορύβου, ασυνέπειας και ασυμφωνία δεδομένων. Τα δεδομένα πρέπει να είναι ποιοτικά, χωρίς θόρυβο, επαρκή και να έχουν συνεπή και αδιάλειπτη ροή αλλιώς αποτελούν κίνδυνο για την απόδοση του DT, (Fuller κ.ά., 2020).

Επιπλέον παράγοντες όπως, η δυσλειτουργία των αισθητήρων, οι περιβαλλοντικές διακυμάνσεις, η ανθρώπινη παρέμβαση, ο συγχρονισμός μεταξύ DT και φυσικού αντικειμένου μπορούν να επηρεάσουν τα δεδομένα τα οποία με τη σειρά τους, επηρεάζουν την εντροπία των πληροφοριών καθώς και το επίπεδο λεπτομέρειας στις προσομοιώσεις DT.

Η σύνδεση και ολοκλήρωση του φυσικού και του εικονικού κόσμου αποτελεί πρόκληση λόγω των μοναδικών χαρακτηριστικών του φυσικού περιβάλλοντος, όπως η μεταβλητότητα, η αβεβαιότητα και η ασάφεια. Επιπλέον, οι διαφορετικές κλίμακες του φυσικού και του εικονικού χώρου, καθώς και η συνεχής παραγωγή δεδομένων από διάφορες οντότητες, περιπλέκουν περαιτέρω τη διαδικασία αυτή.

Σύμφωνα με τον Stamouli (2022), υπάρχει περιορισμός στο θέμα των ροών δεδομένων. Η ροή πραγματοποιείται μονόδρομα, ενώ η ανατροφοδότηση μεταφέρεται από το γραφείο στο πλήρωμα του πλοίου με τη μορφή οδηγιών, οι οποίες στη συνέχεια εκτελούνται από το ανθρώπινο δυναμικό του πλοίου. Η έννοια της αμφίδρομης επικοινωνίας και η δυνατότητα αυτόματης εκτέλεσης διορθωτικών και προληπτικών μέτρων από ένα κεντρικό γραφείο βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια ανάπτυξής της. Λόγω του υψηλού κόστους τους, οι δορυφορικές επικοινωνίες δεν χρησιμοποιούνται επί του παρόντος για συνεχή απομακρυσμένη παρακολούθηση της υγείας και της



απόδοσης του εξοπλισμού του πλοίου. Συνήθως, τα δεδομένα απόδοσης συλλέγονται σε έναν τοπικό διακομιστή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού. Όταν βρίσκεται κοντά σε ένα ασύρματο επίγειο δίκτυο επικοινωνίας ή στην ξηρά, τα δεδομένα αποστέλλονται στη συνέχεια στους κεντρικούς διακομιστές της εταιρείας για ανάλυση και αποθήκευση.

Με την παράκαμψη αυτών των δυσκολιών, η εμπλοκή σε πραγματικό χρόνο θα είναι περισσότερο διαχειρίσιμη. Ο συγχρονισμός μεταξύ των εικονικών και φυσικών μοντέλων είναι εξαιρετικά σημαντικός, αλλά απαιτεί σημαντική πρόοδο στην τεχνολογία μετάδοσης υψηλής ταχύτητας προκειμένου να επιλυθεί το ζήτημα, (Pires κ.ά., 2019).

Σύμφωνα με τους Mihai κ.ά., (2022), ο πλήρης αντικατοπτρισμός και η σύνδεση σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του φυσικού στοιχείου και του ψηφιακού του διδύμου είναι ακόμα ανέφικτη. Εντούτοις, και να ήταν εφικτή πιθανώς να μην είναι πάντα απαραίτητη, καθώς η πιστότητα και ο ρυθμός συγχρονισμού μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού μέρους εξαρτώνται και από τις συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης του DT αλλά και από τις απαιτήσεις που μπορεί να τεθούν κατά την δημιουργία ενός DT. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ενός έργου μεγάλης κλίμακας, η απαραίτητη ακρίβεια και ταχύτητα μπορεί να οδηγεί σε υπερβολικό κόστος, θυσιάζοντας έτσι μέρος της πιστότητας. Ενώ κρίσιμοι κλάδοι όπως αυτός της υγείας μπορεί να αντιμετωπίζει ολοένα και πιο αυστηρές απαιτήσεις για λεπτομερή κατοπτρισμό σε πραγματικό χρόνο, ιδιαίτερα όταν το DT χρησιμοποιείται για να επιτρέψει τις απομακρυσμένες λειτουργίες

### 6.2.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

Η πορεία των ψηφιακών διδύμων εξαρτάται από την εξέλιξη των τεχνολογιών που επιτρέπουν την ανάπτυξη (αισθητήρες IoT, Big Data, Cloud, ML, κ.λπ.), οι οποίες βρίσκονται σήμερα σε διαφορετικά στάδια προόδου. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών και η εφαρμογή τους σε ένα ή περισσότερα φυσικά περιουσιακά στοιχεία απαιτεί βαθιά κατανόηση του πεδίου. Η πρόοδος που προκύπτει καθορίζεται από τη ζήτηση των βιομηχανιών και το επίπεδο τεχνολογικής ετοιμότητας και ωριμότητας των επιχειρήσεων.



Μεγάλο μέρος από τις υπάρχουσες υποδομές πληροφορικής δεν συμβαδίζουν με τις γρήγορες εξελίξεις των τεχνολογιών που υποστηρίζουν την ανάπτυξη των DT, (Sharma κ.ά., 2020; Fuller κ.ά., 2020). Πέραν του αναγκαίου ψηφιακού μετασχηματισμού των επιχειρήσεων, μια επιπλέον αποτελεσματική στρατηγική για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος είναι η εγκατάσταση αισθητήρων IoT σε πεπαλαιωμένο εξοπλισμό, αποτρέποντας έτσι τη σπατάλη δεδομένων και επιτρέποντας τη χρήση αναλυτικών στοιχείων σε αυτά τα μηχανήματα.

Εντούτοις, σύμφωνα με τους Ibrion κ.ά. (2019), υπάρχουν και εκεί προκλήσεις σχετικές με τους αισθητήρες, όπως τα υψηλά ποσοστά αστοχίας, τα ζητήματα αξιοπιστίας, οι απαιτήσεις βαθμονόμησης, η βέλτιστη τοποθέτηση και η κατάλληλη επιλογή. Η δυσλειτουργία ενός αισθητήρα έχει σαν αποτέλεσμα να λάβουμε λανθασμένα δεδομένα μετρήσεων τα οποία λειτουργούν ως είσοδοι σε ένα μοντέλο με βάση τα δεδομένα, το οποίο μοντέλο θα συνδέεται από υψηλή αβεβαιότητα που μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφικά σενάρια.

Στον τομέα της ναυτιλίας, όπως έχει αναφερθεί, ο όγκος των δεδομένων που σχετίζονται με το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των πλοίων είναι τεράστιος. Η αυξανόμενη ποσότητα των παραμέτρων που περιλαμβάνονται, μαζί με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των συστημάτων του πλοίου, θα ενισχύσει τις προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαχείριση και τη ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ τμημάτων, φάσεων και συνεργατών του έργου.

Σε απομακρυσμένες θαλάσσιες περιοχές, η διαθεσιμότητα των δικτύων επικοινωνίας μπορεί να είναι περιορισμένη, κάτι που μπορεί να δυσχεράνει τη μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Τα πλοία έχουν συνήθως προβλεπόμενη διάρκεια ζωής περίπου 25 ετών, κατά τη διάρκεια της οποίας αναμένεται ότι τα συστήματα υπολογιστών θα πρέπει να αντικατασταθούν πολλές φορές. Αυτό δημιουργεί περαιτέρω επιπλοκές στην ολοκλήρωση και διασύνδεση των συστημάτων.

Η επιτυχής εφαρμογή του DT, εξαρτάται και από τον βαθμό ψηφιοποίησης του πλοίου που αποτελεί βασική παράμετρο για περιορισμό ή μη ως προς την χρήση του, αλλά και από τον βαθμό του ψηφιακού μετασχηματισμού των ναυτιλιακών οργανισμών, (Lv κ.ά., 2023).



Όσον αφορά τον τομέα της ναυπήγησης, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι ο τομέας περιλαμβάνει τη χρήση πολλών εξειδικευμένων εργαλείων λογισμικού από τον σχεδιασμό μέχρι την κατασκευή του πλοίου. Ωστόσο, λόγω της περίπλοκης φύσης της ναυπηγικής βιομηχανίας, εξακολουθούν να είναι απαραίτητες αρκετές πλατφόρμες και καθίσταται αναγκαία η εναρμόνιση διαφορετικών πληροφοριών από διάφορα συστήματα. Αυτό περιπλέκει περαιτέρω το έργο της ανάπτυξης ενός DT. Για την επιτυχή κατασκευή πλοίων και την ενσωμάτωση της τρέχουσας τεχνολογίας πάνω σε αυτά, ένα ναυπηγείο πρέπει να διαθέτει ολοκληρωμένη υποδομή, εξειδικευμένο εξοπλισμό, τεχνολογία αιχμής και προσωπικό με γνώσεις των τρεχουσών τεχνολογιών, (Morais κ.ά., 2018).

Η αποτελεσματική αντιμετώπιση των μεγάλων και περίπλοκων συστημάτων, όπως αυτά που βρίσκονται στα πλοία, απαιτεί τη χρήση πιο εξελιγμένων και ανθεκτικών τεχνολογιών, όπως το IoT προκειμένου να διασφαλιστεί η ασφάλειά τους. Οι ανάγκες για υπολογιστική ισχύ, διαθεσιμότητα των χερσαίων δικτύων επικοινωνίας και υψηλές επιδόσεις ως προς την συνδεσιμότητα, αυξάνονται. Κρίνεται απαραίτητο να κατασκευαστούν υπηρεσίες ροής που ενσωματώνουν αξιόπιστες βάσεις δεδομένων, μαζί με υλικό και πρωτόκολλα μετάδοσης που μπορούν να παρέχουν την απρόσκοπτη ανταλλαγή σημαντικών όγκων δεδομένων (εύρος ζώνης) μεταξύ θάλασσας και ξηράς με μεγάλη αξιοπιστία.

Ωστόσο, η σημερινή εξάρτηση από τη συμβατική τεχνολογία, τις διαδικασίες, τις απαιτήσεις που επιβάλλονται από διαφορετικούς νηογνώμονες και τις πρακτικές κατασκευής των ναυπηγείων λειτουργεί ως εμπόδιο που δυσχεραίνει την πρόοδο του κλάδου.

### **6.3 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ**

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας DT στη ναυτιλιακή βιομηχανία αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη, αν και συνεπάγεται σημαντικά ρυθμιστικά εμπόδια. Η εμφάνιση αυτής της τεχνολογίας, η οποία μεταμορφώνει την επιτήρηση και την αυτοματοποίηση, απαιτεί την επείγουσα θέσπιση σαφών, αποτελεσματικών και διεθνώς αναγνωρισμένων νομικών πλαισίων.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Ο διεθνής χαρακτήρας του κλάδου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πρότυπα, κανόνες και καθιερωμένες διαδικασίες για τη διασφάλιση της ασφάλειας, της αποτελεσματικότητας και της τήρησης των περιβαλλοντικών κανόνων. Η ενσωμάτωση ενός δυναμικού ψηφιακού αντικειμένου, όπως το DT, που αλληλοεπιδρά, επηρεάζει και σε ορισμένες περιπτώσεις, λαμβάνει αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο, απαιτεί τον επανασχεδιασμό και τον εκσυγχρονισμό των υφιστάμενων πλαισίων.

### 6.3.1 ΕΛΛΕΙΨΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ

Η διαλειτουργικότητα του DT με τα υπάρχοντα λογισμικά και συστήματα που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία για την διαχείριση π.χ. των προϊόντων, μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση της υλοποίησής του. Επιπλέον, η ομαλή ενσωμάτωση και ανταλλαγή δεδομένων στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, όπως ο σχεδιασμός, η παραγωγή και η συντήρηση, αποτελεί πρόκληση λόγω της παρουσίας διαφορετικών τύπων δεδομένων. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, είναι επιτακτική ανάγκη να τυποποιηθεί ο μετασχηματισμός δεδομένων, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλό επίπεδο καθολικότητάς των, (Zhang κ.ά., 2022).

Ο ναυτιλιακός τομέας βασίζεται εδώ και καιρό σε κατακερματισμένα συστήματα λογισμικού και διαδικασίες χειρισμού δεδομένων, με αποτέλεσμα την έλλειψη τυποποιημένων μοντέλων δεδομένων.

Ο διεθνής χαρακτήρας της ναυτιλίας, δημιουργεί δυσκολίες στον καθορισμό παγκοσμίως εφαρμόσιμων προτύπων και πλαισίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανοιχτά από τα εμπλεκόμενα μέρη. Για παράδειγμα, ένα πλοίο μπορεί να νηολογηθεί υπό τη σημαία οποιουδήποτε από τα κράτη που έχουν υπογράψει τη συμφωνία SOLAS, επιτρέποντάς του να πλέει σε οποιοδήποτε λιμάνι παγκοσμίως, γενικά υπό τους ίδιους διεθνείς κανονισμούς. Οι πλοιοκτήτες, οι διαχειριστές και οι ναυλωτές μπορεί επίσης να βρίσκονται σε οποιοδήποτε από αυτά τα κράτη. Οι κατασκευαστές εξοπλισμού, τα ναυπηγεία, οι νηογνώμονες και άλλοι πάροχοι υπηρεσιών μπορούν να βρίσκονται επίσης σε όλο τον κόσμο, (Berre and Rødseth, 2018).

Ως εκ τούτου, προκύπτει πως δεν υπάρχει μια ενιαία, συνεκτική μέθοδος για την απεικόνιση δεδομένων πλοίων σε διάφορες πλατφόρμες λογισμικού. Η απουσία



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

προτύπων δημιουργεί προκλήσεις κατά την προσπάθεια συγχώνευσης δεδομένων από διαφορετικές πηγές σε ένα ενιαίο DT.

Οι Fonseca and Gaspar (2021), αναδεικνύουν τις δυσκολίες μοντελοποίησης για ένα ψηφιακό δίδυμο πλοίο, οι οποίες εντείνονται λόγω της εμπλοκής πολλών μερών, όπως προαναφέρονται στο παράδειγμα και της ανάγκης ικανοποίησης πρόσθετων κριτηρίων κατά τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου για τη συνεργασία με δεδομένα αισθητήρων που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο κατά τη λειτουργία. Επισημαίνουν την ανάγκη για τα μοντέλα δεδομένων πλοίων, να συνοδεύονται από αντίστοιχα επιχειρηματικά μοντέλα και να καθοδηγούνται από τα ενδιαφερόμενα μέρη που προτίθενται να τα υιοθετήσουν.

Τα τελευταία χρόνια, Οργανισμοί τυποποίησης όπως η UN/CEFACT<sup>1</sup> και η DCSA<sup>2</sup> έχουν δημιουργήσει μια σειρά από δομικά στοιχεία για την ενίσχυση της ψηφιοποίησης της ναυτιλίας γραμμών. Αυτά περιλαμβάνουν το "UN/CEFACT Smart Container data model" και η "DCSA IoT connectivity infrastructure", τα οποία είναι πρότυπα διεπαφής συνδεσιμότητας IoT για εμπορευματοκιβώτια. Μπορούν να εφαρμοστούν από φορείς εκμετάλλευσης και πλοιοκτήτες, από λιμένες, τερματικούς σταθμούς, ναυπηγεία εμπορευματοκιβωτίων, παρόχους εσωτερικής εφοδιαστικής και άλλα τρίτα μέρη για να διασφαλιστεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ λύσεων έξυπνων εμπορευματοκιβωτίων σε επίπεδο ραδιοδιεπαφής, (Voorspuij κ.ά., 2020; Transport and Logistics Middle East, 2020).

Ωστόσο, για την αποτελεσματική κατασκευή και εφαρμογή των DT στον τομέα της ναυτιλίας απαιτούνται πρόσθετα πρότυπα, τα οποία πρέπει να καλύπτουν τόσο τις τρέχουσες ανάγκες του χώρου όσο και τις μελλοντικές.

### *6.3.2 ΔΙΑΚΥΒΕΡΝΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ*

Εκτός από το ζήτημα της τυποποίησης, ένα άλλο στενά συνδεδεμένο εμπόδιο αφορά την ιδιοκτησία και τη διακυβέρνηση των δεδομένων, εγείροντας έτσι ένα νέο ερώτημα: Ποιος κατέχει την κυριότητα των πληροφοριών του DT;

---

<sup>1</sup> United Nations Centre for Trade Facilitation and Electronic Business (UN/CEFACT)

<sup>2</sup> Digital Container Shipping Association (DCSA)



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Αναμένεται ότι, καθώς οι τεχνολογίες εξελίσσονται, η βιομηχανία θα μεταβεί σε ένα οικοσύστημα συνδεδεμένων δεδομένων που μπορεί να έχουν πολλούς ιδιοκτήτες τόσο των φυσικών περιουσιακών στοιχείων όσο και των DT. Επιπλέον, η πιθανότητα ενός δικτύου DT υποδηλώνει την απαίτηση για μια κοινή δομή επικοινωνίας για τη διευκόλυνση της τυποποιημένης ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ ετερογενών πηγών δεδομένων. Η συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζει μια σειρά ζητημάτων που περιλαμβάνουν τεχνολογικά, οικονομικά και νομικά ζητήματα που χρήζουν διευκρίνισης.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, (Mihai κ.ά., 2022; Berre and Rødseth, 2018) μια πιθανή προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 είναι η εφαρμογή της έννοιας του βιομηχανικού χώρου δεδομένων (IDS). Η έννοια του IDS περιλαμβάνει έναν εικονικοποιημένο χώρο δεδομένων που εξασφαλίζει την ιδιοκτησία των δεδομένων σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αξιοποίησης ανοικτών προτύπων, υφιστάμενης τεχνολογίας και κοινών πλαισίων διακυβέρνησης που προωθούν την οικονομία των δεδομένων. Δεδομένου ότι τα DT θεωρούνται αναπόσπαστο μέρος του I4.0, το μοντέλο IDS μπορεί να αποτελέσει λύση για τη διαχείριση και την εποπτεία της ιδιοκτησίας και της διακυβέρνησης των δεδομένων των DT.

Μια ανάλογη έννοια με το IDS, προτείνεται από τους Berre and Rødseth, (2018), γνωστή και ως Θαλάσσιος Χώρος Δεδομένων (MDS). Η ιδέα διερευνήθηκε και αναπτύχθηκε περαιτέρω από ερευνητές του SINTEF<sup>3</sup> στη Νορβηγία. Το MDS αποτελεί μέρος του οικοσυστήματος του IDS, ή αλλιώς πρόκειται για μια επέκταση του IDS προσαρμοσμένη στα μοναδικά χαρακτηριστικά της ναυτιλίας. Θα περιλαμβάνει ένα προσαρμοσμένο πλαίσιο ψηφιακής εμπιστοσύνης, λαμβάνοντας υπόψη την περιορισμένη σύνδεση που είναι διαθέσιμη για τα πλοία στη θάλασσα και την ετερογενή αρχιτεκτονική των συστημάτων ελέγχου και των φυσικών συστημάτων των πλοίων.

Πριν από τον κύκλο ζωής του ψηφιακού δίδυμου, οι ενδιαφερόμενοι φορείς πρέπει να καθορίσουν μια ακριβή κατανόηση και όρια όσον αφορά την ιδιοκτησία των

---

<sup>3</sup> <https://www.sintef.no/en/>



δεδομένων, καθώς και να θεσπίσουν πρωτόκολλα για την πρόσβαση τρίτων στα δεδομένα. Το διεθνές δίκαιο, οι εθνικοί νόμοι και οι νομικές υποχρεώσεις των κρατών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την αποφυγή νομικών προβλημάτων.

### 6.3.3 ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

Ενώ τα DT, είναι ευρέως αναγνωρισμένα για την ικανότητά τους να βελτιώνουν τις ναυτιλιακές δραστηριότητες, συμπεριλαμβανομένης της διαχείρισης του στόλου και της ενίσχυσης της ασφάλειας, η ανάπτυξη τους πρέπει να συμμορφώνεται με τους ισχύοντες κανονισμούς που διέπουν τις ναυτιλιακές δραστηριότητες.

Ο IMO έχει ασχοληθεί ενεργά με τις επιπτώσεις των ψηφιακών τεχνολογιών στις ναυτιλιακές δραστηριότητες. Οι κατευθυντήριες γραμμές δίνουν προτεραιότητα στην ασφάλεια και την προστασία του περιβάλλοντος, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένες εκτιμήσεις κινδύνου κατά την εφαρμογή τεχνολογιών όπως τα DT (Almeaided κ.ά., 2021).

Παρόλο που πολλές εφαρμογές έχουν φτάσει σε τεχνολογική ωριμότητα, η εκτεταμένη εφαρμογή τους στη ναυτιλία αντιμετωπίζει ρυθμιστικά εμπόδια. Το παρόν πλαίσιο των συμβάσεων για την Ασφάλεια της Ζωής στη Θάλασσα (SOLAS), για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL), για τα Πρότυπα Εκπαίδευσης, Πιστοποίησης και Φύλαξης των Ναυτικών (STCW), τον Κώδικα Ασφαλούς Διαχείρισης ISM για να αναφέρουμε μερικές από αυτές καθώς και κατευθυντήριες γραμμές του IMO για την κυβερνοασφάλεια δεν αναπτύχθηκαν με γνώμονα πλήρως αυτόνομα και ολοκληρωμένα ψηφιακά μοντέλα όπως είναι το DT πλοίου, (ABS, 2024; DNV, 2023; Ogundare κ.ά., 2024).

Ο IMO δεν έχει διαμορφώσει ένα οριστικό κανονιστικό πλαίσιο για τα DT, με αποτέλεσμα την εν μέρει υιοθέτησή τους. Ωστόσο, σε στρατηγικό επίπεδο, έχει διατυπώσει τον στόχο του να επικεντρωθεί στα αυτόνομα επιφανειακά πλοία (MASS), στα οποία η συγκεκριμένη ψηφιακή τεχνολογία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο (IMO, 2022).

Μια επιπλέον καθοριστική πρόκληση, αποτελούν οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί που αποτελούν κρίσιμο στοιχείο του κανονιστικού πλαισίου για την τεχνολογία DT στις θαλάσσιες εφαρμογές. Η ναυτιλιακή βιομηχανία αντιμετωπίζει αυξανόμενη πίεση για



τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεών της, και τα DT παρέχουν δημιουργικές λύσεις για την ενίσχυση της συμμόρφωσης μέσω βελτιωμένης παρακολούθησης, βελτιστοποίησης των λειτουργιών και μείωσης των εκπομπών, (Markopoulos κ.ά., 2024). Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τη διαχείριση του περιβάλλοντος με τη μεγιστοποίηση της οικονομίας καυσίμων και την ελαχιστοποίηση των ρύπων. Η συμμόρφωση με κανόνες, όπως η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (MARPOL), είναι ζωτικής σημασίας, (Almeaided κ.ά., 2021).

Οι νηογνώμονες από την άλλη, παίζουν σημαντικό ρόλο στο κανονιστικό πλαίσιο για τα DT στις ναυτιλιακές εφαρμογές. Αυτοί οι οργανισμοί διαμορφώνουν τεχνικά πρότυπα που εγγυώνται την ασφάλεια, την προστασία του περιβάλλοντος, την αξιοπιστία των πλοίων και των υπεράκτιων υποδομών. Αποτελούν βασικό φορέα του κλάδου και θέτουν τα θεμέλια της ναυτικής ασφάλειας, της τεχνικής εποπτείας, της πιστοποίησης πλοίων και τεχνολογικών συστημάτων. Οργανισμοί όπως οι DNV, ABS, Lloyd’s Register (LR) και Bureau Veritas (BV), CassNK είναι απαραίτητοι για την αξιολόγηση και την τυποποίηση των αναδυόμενων τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένων των DT. Ωστόσο, η τρέχουσα συμμετοχή τους είναι περιορισμένη και συνίσταται κυρίως σε ερευνητικές ή συμβουλευτικές λειτουργίες, χωρίς υποχρεωτικούς κανονισμούς ή εκτελεστές προδιαγραφές που να αφορούν άμεσα τη ναυτιλία.

Τα κυρίαρχα χαρακτηριστικά των μεθοδολογιών που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα από τους νηογνώμονες είναι τα εξής:

1. Δεν είναι υποχρεωτικές, καθώς όλα τα τρέχοντα έγγραφα είναι προαιρετικά ή αντιπροσωπεύουν «βέλτιστες πρακτικές».
2. Δεν διαθέτουν αυστηρές μεθόδους αξιολόγησης, όπως υποχρεωτικές δοκιμές, ελέγχους ή συγκριτικές αξιολογήσεις μοντέλων DT.
3. Δεν διαθέτουν επίσημα πιστοποιητικά DT, με αποτέλεσμα την απουσία ενός τυποποιημένου μηχανισμού πιστοποίησης για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας, της ασφάλειας και της χρησιμότητας ενός DT.

Αυτό δημιουργεί έλλειψη εμπιστοσύνης μεταξύ των ναυτιλιακών επιχειρήσεων, των προμηθευτών τεχνολογίας και των ρυθμιστικών φορέων. Η έλλειψη ενιαίας



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

πιστοποίησης δημιουργεί αμφιβολίες σχετικά με το αν οι πλατφόρμες DT θεωρούνται «κατάλληλες για χρήση», εμποδίζοντας έτσι την υιοθέτηση της τεχνολογίας και παρεμποδίζοντας σημαντικές δαπάνες σε ψηφιακή υποδομή.

Η κανονιστική αβεβαιότητα παραμένει ένα σημαντικό εμπόδιο. Η συμμόρφωση με τους περιφερειακούς και διεθνείς κανονισμούς, καθώς και οι πιστοποιήσεις ασφάλειας, θα είναι απαραίτητες προτού τα DT μπορούν να ενσωματωθούν πλήρως στα λειτουργικά ναυτιλιακά συστήματα.

Συνεπώς, υπάρχει απουσία ρητών κατευθυντήριων γραμμών και προτύπων που να ρυθμίζουν τη χρήση των DT στις ναυτιλιακές δραστηριότητες. Οι ισχύοντες κανονισμοί δίνουν έμφαση κυρίως στη συμβατική λειτουργία και ασφάλεια των πλοίων, παραβλέποντας συχνά τις επιπτώσεις των προηγμένων τεχνολογιών, όπως τα DT.

## **7. ΑΞΙΑ DT ΚΑΙ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ**

Ο παγκόσμιος κλάδος της ναυτιλίας, ο οποίος είναι ζωτικής σημασίας για το διεθνές εμπόριο, βιώνει μια σημαντική μεταβολή που σχετίζεται με τις ταυτόχρονες απαιτήσεις για ψηφιοποίηση και μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Σε αυτό το περιβάλλον, η τεχνολογία DT αναπτύσσεται όχι μόνο ως τεχνολογική πρόοδος, αλλά και ως κρίσιμη στρατηγική αναγκαιότητα που μετασχηματίζει το επιχειρηματικό μοντέλο της ναυτιλίας.

Ενώ το Industry 4.0 έδωσε έμφαση στην αυτοματοποίηση και τη συνδεσιμότητα (IoT), το επερχόμενο μοντέλο Industry 5.0 δίνει έμφαση στον άνθρωπο, τονίζοντας τη βιωσιμότητα, την ανθεκτικότητα και τη συνεργασία ανθρώπου-μηχανής. Το DT στη ναυτιλία ευθυγραμμίζεται πλέον με αυτή τη δομή, λειτουργώντας ως εργαλείο που ενδυναμώνει τη λήψη αποφάσεων από τον άνθρωπο αντί να την αντικαθιστά πλήρως, ιδίως σε βασικούς ρόλους ασφάλειας και περιβαλλοντικής διαχείρισης, (Zhou κ.ά.,2024). Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στους διαχειριστές στόλου και στο προσωπικό να αποκτήσουν ολοκληρωμένη επίγνωση της κατάστασης και να προβλέψουν μελλοντικά σενάρια, μετατρέποντας την αβεβαιότητα σε διαχειρίσιμο κίνδυνο, (Lloyd’s list, 2025).

Αυτή η ενότητα προσφέρει μια επισκόπηση της αξίας των DT, αντλώντας γνώση από πρόσφατη βιβλιογραφία και δεδομένα της αγοράς. Συγκεκριμένα, εξετάζονται η



επιχειρηματική αξία της εφαρμογής του και η υποστήριξη που μπορεί να επιφέρει στον κλάδο σε σχέση με τις απαιτήσεις για μείωση των ρύπων αλλά και οι προοπτικές αξιοποίησης που αναμένεται ότι θα κυριαρχήσουν.

## 7.1 ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΗ ΑΞΙΑ

Η εφαρμογή της DT τεχνολογίας στη ναυτιλία, συνιστά όχι μόνο τεχνολογική αναβάθμιση, αλλά και στρατηγική επένδυση με καθοριστικό οικονομικό αντίκτυπο. Μια ανάλυση κόστους-οφέλους αποδεικνύει ότι το κόστος αρχικής επένδυσης (CAPEX), κυρίως σε αισθητήρες και λογισμικό, μπορεί να παραμένει υψηλό αλλά τα μακροπρόθεσμα λειτουργικά οφέλη στο λειτουργικό κόστος (OPEX) και η αύξηση της αξίας των περιουσιακών στοιχείων συνεπάγονται υψηλή απόδοση της επένδυσης (ROI), (DT4GS, 2022).

### 7.1.1 ΜΕΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ (OPEX)

Η μείωση του λειτουργικού κόστους επιτυγχάνεται κυρίως με δύο μεθόδους: την προγνωστική συντήρηση και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου.

**Προγνωστική συντήρηση:** Η μετάβαση από την διορθωτική (reactive) ή προληπτική (preventive) συντήρηση στην προγνωστική συντήρηση (Predictive Maintenance PdM) μέσω της εφαρμογής DT, αποφέρει αξιοσημείωτα αποτελέσματα. Μελέτες δείχνουν ότι η υιοθέτηση της προγνωστικής συντήρησης (PdM) μπορεί να μειώσει τον χρόνο εκτός λειτουργίας (downtime) κατά 15-20% και τα συνολικά έξοδα συντήρησης έως και 30%, (DT4GS, 2022; Alguirat κ.ά., 2025).

Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων δόνησης και θερμοκρασίας, είναι δυνατό να προβλεφθούν οι βλάβες του εξοπλισμού πριν από την εμφάνισή τους, διευκολύνοντας την άμεση προμήθεια ανταλλακτικών και τον προγραμματισμό επισκευών, αποτρέποντας έτσι δαπανηρές καθυστερήσεις και βλάβες εν πλω, (Ismail, 2025).

**Βελτιστοποίηση κατανάλωσης καυσίμου:** Όσον αφορά τη χρήση καυσίμων, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των λειτουργικών εξόδων (50-70%), τα DT παρέχουν ακριβείς λειτουργίες προσομοίωσης και βελτιστοποίησης. Έχει αποδειχθεί ότι, η εφαρμογή τους για τη βελτιστοποίηση της διαδρομής και της ταχύτητας, λαμβάνοντας



υπόψη τις καιρικές συνθήκες και την κατάσταση του κύτους, επιφέρει μια μείωση της κατανάλωσης καυσίμων κατά 5-15%, (Lloyd’s list, 2025).

Οι Vasilikis κ.ά., (2023) δημιούργησαν ένα DT για πλοίο του ολλανδικού ναυτικού, υβριδικής πρόωσης, επιτυγχάνοντας ακρίβεια πρόβλεψης της στιγμιαίας κατανάλωσης καυσίμου, κάτω του 5% MAPE (Mean Absolute Percentage Error), αυτό σημαίνει ότι η πρόβλεψη του συστήματος είναι πάνω από 95% ακριβής σε σχέση με την πραγματικότητα. Η εφαρμογή ML αλγορίθμων (data-driven) με μοντέλα σταθερής κατάστασης πρώτης αρχής (physics-based), ενίσχυσε την ακρίβεια κατά 40-50% σε σχέση με τα συμβατικά μοντέλα, καταδεικνύοντας τη σημασία της τεχνολογίας στη διαχείριση της ενεργειακής απόδοσης.

### 7.1.2 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΑΞΙΑΣ ΠΕΡΙΟΥΣΙΑΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Στο τρέχον ναυτιλιακό τοπίο, η αξία ενός πλοίου συνδέεται στενά με την περιβαλλοντική του αποδοτικότητα, (Jia κ.ά, 2024). Τα μέτρα ενεργειακής απόδοσης με δείκτες όπως είναι ο δείκτης έντασης άνθρακα CII (MEPC, 2021b) και ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων πλοίων EEXI (MEPC, 2021a), που έχει θεσπίσει και επιβάλλει ο IMO, δημιουργούν κατ’ επέκταση μια διπλή αγορά.

Τα πλοία με χαμηλή βαθμολογία δείκτη CII (D ή E) είναι ευάλωτα σε “Brown Discount”, με αποτέλεσμα την πιθανή υποτίμηση της αξίας μεταπώλησής τους έως και 40%, καθώς μειώνεται η ελκυστικότητά τους για τους αγοραστές.

Αντίθετα, η εφαρμογή του DT για την επίτευξη υψηλής βαθμολογίας CII (A ή B) μέσω συνεχούς παρακολούθησης και βελτιστοποίησης προσφέρει ένα “Green Premium” επιτυγχάνοντας αύξηση στην αξία μεταπώλησης κατά 10-20% και αύξηση στα ναύλα. Το DT λειτουργεί σαν πιστοποιητικό υγείας και ως πιστοποίηση της λειτουργικής κατάστασης και της ανώτερης ενεργειακής (eco-friendly) απόδοσης του πλοίου, εξασφαλίζοντας διαφάνεια για τους υποψήφιους αγοραστές και επενδυτές. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως τα συστήματα λίπανσης με αέρα ή η χρήση μεθανόλης, όταν προσομοιώνονται και επικυρώνονται από DT, μπορούν να αυξήσουν την αξία του πλοίου κατά 10-35%, (Ship Universe, 2024).



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

### 7.1.3 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΓΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Η αγορά των DT γνωρίζει ραγδαία ανάπτυξη, γεγονός που υποδηλώνει την ισχυρή ζήτηση και την τεχνολογική πρόοδο. Η παγκόσμια αγορά για τον ψηφιακό μετασχηματισμό των φορτηγών πλοίων εκτιμήθηκε σε 1,43 δισεκατομμύρια δολάρια το 2024, με αναμενόμενο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 19,8% έως το 2033.

Η συνολική αγορά DT σε όλους τους τομείς προβλέπεται να αυξηθεί από 21 δισεκατομμύρια δολάρια το 2024 σε πάνω από 150 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2030, παρουσιάζοντας ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) 47,9%, (MarketsandMarkets, 2025).

Η αγορά της τεχνητής νοημοσύνης στη ναυτιλία (Maritime AI), η οποία λειτουργεί ως ο «εγκέφαλος» του DT, αναμένεται να φθάσει τα 18,98 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2029, με την Βόρεια Αμερική να ηγείται των επενδύσεων και την περιοχή Ασίας-Ειρηνικού να παρουσιάζει τους ταχύτερους ρυθμούς ανάπτυξης, (Technavio 2024).

Αυτές οι προβλέψεις και οι τάσεις της αγοράς, διαμορφώνουν το τοπίο γύρω από την επένδυση των οργανισμών στον ψηφιακό μετασχηματισμό, υποδεικνύοντας ότι η επένδυση σε DT δεν αποτελεί πλέον μια εξειδικευμένη επιλογή, αλλά μια κυρίαρχη τάση που θα καθορίσει τη μελλοντική ανταγωνιστικότητα.

### 7.2 ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΗ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΗ (IMO & EU ETS)

Ο ναυτιλιακός κλάδος αντιμετωπίζει σημαντική πίεση για τη μείωση του περιβαλλοντικού του αντίκτυπου. Ο IMO, εκτιμά ότι έως το 2050 οι θαλάσσιες μεταφορές θα αντιπροσωπεύουν το 15% των συνολικών εκπομπών CO<sub>2</sub>, υπογραμμίζοντας την επιτακτική ανάγκη για προσπάθειες μείωσης των εκπομπών στον τομέα αυτό (DNV, 2019). Ο IMO έχει δεσμευτεί να επιτύχει μηδενικές εκπομπές από τις θαλάσσιες μεταφορές το αργότερο έως το 2050 (IMO, 2025).

Το DT γίνεται το κύριο μέσο για την επίβλεψη αυτής της αλλαγής, παρέχοντας ακρίβεια, προβλεψιμότητα και διαφάνεια, (Xiao, 2025).



### 7.2.1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (CII & EEXI)

Οι δείκτες CII και EEXI απαιτούν συνεχή παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης. Το DT επιτρέπει στους διαχειριστές να υπολογίζουν σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή σε πραγματικές δυναμικές συνθήκες πλεύσης, τους δείκτες, λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές αβεβαιότητες και την απρόβλεπτη φύση των συνθηκών περιβάλλοντος.

Μέσω σεναρίων «τι θα συμβεί αν», ένας χειριστής μπορεί να αξιολογήσει τον αντίκτυπο που θα έχει στην βαθμολογία CII στο τέλος του έτους, από την αύξηση της ταχύτητας για ένα συγκεκριμένο ταξίδι ή την αναβολή του καθαρισμού της γάστρας. Η ανάπτυξη ενός DT, χρησιμοποιώντας μια συνδυασμένη προσέγγιση μοντέλων σταθερής κατάστασης και ML αλγορίθμων, η οποία τροφοδοτείται με λειτουργικά δεδομένα υψηλής συχνότητας, - σε αντίθεση με τις μεροληπτικές μεσημεριανές αναφορές (noon reports) -, επιτρέπει την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας των συνθηκών λειτουργίας και περιβάλλοντος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ακριβή αξιολόγηση του δείκτη CII σε πραγματικό χρόνο, με περιθώριο σφάλματος μικρότερο του 2,5% σε διάστημα εμπιστοσύνης 95% (Vasilikis κ.ά.,2023).

### 7.2.2 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΡΥΠΩΝ ΤΗΣ ΕΕ (EU ETS)

Με την παρακολούθηση της κατανάλωσης καυσίμων και των δεδομένων φορτίου σε πραγματικό χρόνο, οι χειριστές μπορούν να έχουν επίγνωση όχι μόνο του δείκτη CII πριν το τέλος του χρόνου αλλά και του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών της ΕΕ (EU ETS).

Η ενσωμάτωση της ναυτιλίας στο σύστημα EU ETS επιβάλλει άμεσο οικονομικό κόστος για κάθε τόνο CO<sub>2</sub>, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί μια νέα χρηματοπιστωτική αγορά για τους πλοιοκτήτες. Το DT λειτουργεί ως χρηματοοικονομικό μέσο, καθώς η ακριβής τεκμηρίωση και η πρόβλεψη του κόστους των δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>, δίνουν τη δυνατότητα στις εταιρείες να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τους προϋπολογισμούς τους και να τιμολογούν κατάλληλα τις υπηρεσίες τους, (NAPA, 2024).

Οι Eirado κ.ά, (2025), δημιούργησαν ένα DT που δεν περιορίζεται στο περιουσιακό στοιχείο καθαυτό αλλά επεκτείνεται στην μοντελοποίηση του συστήματος EU ETS. Συγκεκριμένα, συνδυάζοντας προσομοιώσεις DT με μοντέλα ML, αναλύουν τον



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται το δίκτυο αγοράς ρύπων ανταποκρινόμενο στις κανονιστικές ρυθμίσεις και στις αλλαγές της αγοράς. Η προσέγγιση αυτή, διευκολύνει την πρόβλεψη δομικών αλλαγών και διακυμάνσεων στις τιμές των δικαιωμάτων εκπομπών, προσφέροντας στους διαχειριστές ένα εργαλείο για την βέλτιστη στρατηγική αγοράς δικαιωμάτων των ρύπων, προστατεύοντας τις εταιρείες από την οικονομική αστάθεια της αγοράς.

### 7.2.3 ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΡΟΩΣΗΣ

Η μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα και υβριδικά συστήματα πρόωσης αυξάνει την πολυπλοκότητα για τους διαχειριστές. Τα DT χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της λειτουργίας των υβριδικών συστημάτων και την αξιολόγηση της απόδοσης των νέων καυσίμων πριν από την χρήση, με αποτέλεσμα τον περιορισμό του επενδυτικού ρίσκου.

**Υβριδικά συστήματα πρόωσης:** Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται με σκοπό την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπών, ενώ παράλληλα βελτιώνουν την επιχειρησιακή ευελιξία των πλοίων. Ωστόσο, η μεγιστοποίηση της απόδοσης, εξαρτάται από την ορθή διαχείριση της ισχύος μεταξύ των διαφορετικών πηγών ενέργειας. Τα στατικά μοντέλα προσομοίωσης κρίνονται ανεπαρκή για την βέλτιστη απόδοση των υβριδικών ενεργειακών συστημάτων, για τα οποία απαιτείται η λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Οι Mylonopoulos κ.ά., (2023) υποστηρίζουν ότι η χρήση υποκατάστατων μοντέλων βασισμένων σε δεδομένα (data-driven surrogate models), επιτρέπει την ταχεία απόκτηση βέλτιστων λύσεων με επαρκή ακρίβεια, ακόμη και για περίπλοκες, ένθετες, πολυεπίπεδες, πολυκριτηριακές βελτιστοποιήσεις των συστημάτων πρόωσης των πλοίων.

**Εναλλακτικά καύσιμα:** Η μετάβαση σε καύσιμα μηδενικών εκπομπών CO<sub>2</sub> παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα ασφάλειας. Η εφαρμογή τεχνολογίας DT μπορεί να καταστήσει δυνατή την διαχείριση μέσω προηγμένης παρακολούθησης και προσομοίωσης.



- Υδρογόνο

Οι An κ.ά., (2024) προτείνουν ένα μοντέλο ασφαλείας για σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου που χρησιμοποιεί την τεχνολογία DT σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη (AI). Η έρευνά τους, βασίζεται στην ενίσχυση της λειτουργικής ασφάλειας και της λήψης αποφάσεων με βάση την τεχνητή νοημοσύνη (CNN-based decision making) και τις τρισδιάστατες προσομοιώσεις. Με την ανάπτυξη μιας πλατφόρμας ψηφιακών δίδυμων που μπορεί να παρακολουθεί και να αναλύει πολλούς πιθανούς κινδύνους κατά τη λειτουργία των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου, αναμένεται σημαντική βελτίωση της ταχύτητας και της ακρίβειας της λήψης αποφάσεων για την πρόληψη ατυχημάτων και την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης.

- Αμμωνία

Η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) έχει αναδειχθεί ως ένα βιώσιμο καύσιμο με μηδενικές εκπομπές άνθρακα. Ωστόσο, απαιτεί σχεδόν τριπλάσιο όγκο αποθήκευσης σε σχέση με το συμβατικό μαζούτ. Επιπλέον, είναι πολύ τοξική και διαβρωτική, γεγονός που καθιστά κρίσιμη την ακεραιότητα των συστημάτων αποθήκευσης.

Το ερευνητικό έργο  $\text{NH}_3\text{CRAFT}$ , (στο πλαίσιο του προγράμματος Horizon Europe) αντιμετωπίζει αυτή την πρόκληση με στόχο τον σχεδιασμό και την επίδειξη ενός ασφαλούς και βιώσιμου συστήματος αποθήκευσης  $\text{NH}_3$  μεγάλης κλίμακας, (1.000 m<sup>3</sup> σε πίεση 10 bar), σε πλοίο χωρητικότητας 31.000 τόνων (DWT). Η έρευνα χρησιμοποιεί μια ψηφιακή πλατφόρμα που συνδυάζει υπολογιστικά μοντέλα, προσομοιώσεις και δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο, συμπεριλαμβανομένων επιθεωρήσεων με τεχνητή νοημοσύνη (AI), για τη δημιουργία ενός DT ειδικά για το σύστημα τροφοδοσίας  $\text{NH}_3$ , (Edward κ.ά, 2025).

### 7.3 ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι έρευνες δείχνουν μια αυξανόμενη τάση ενσωμάτωσης των ψηφιακών τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένου και του DT στις ναυτιλιακές δραστηριότητες, καθώς ο κλάδος υφίσταται περαιτέρω ψηφιοποίηση και ηλεκτροκίνηση. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι το DT λειτουργούν ως καταλύτης για την υλοποίηση του «Shipping 4.0», συνδέοντας τις φυσικές διαδικασίες με την ανάλυση ψηφιακών δεδομένων, (Madusanka κ.ά., 2023). Η εφαρμογή των DT, δύναται να επεκταθεί πέρα από τα μεμονωμένα πλοία,



περιλαμβάνοντας ολόκληρο το οικοσύστημα των θαλάσσιων μεταφορών, (Lv κ.ά., 2023). Οι εφαρμογές που θα επικρατήσουν την επόμενη δεκαετία δίνουν έμφαση στη βιωσιμότητα, την διασυνδεσιμότητα και την αυτονομία.

### 7.3.1 ΝΑΥΠΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ (SHIPBUILDING 4.0)

Παρά τον εκσυγχρονισμό του ναυπηγικού τομέα με τεχνικές όπως το CAD/CAM, ο τομέας αυτός παραμένει κατακερματισμένος. Τα DT αντιπροσωπεύουν την απαραίτητη τεχνολογική πρόοδο για την ενοποίηση του κύκλου ζωής του πλοίου, τη διαχείριση της πολυπλοκότητας και την ελαχιστοποίηση του χρόνου παράδοσης.

Σύμφωνα με τους Hoffman κ.ά., (2023), τα DT ενοποιούν πολλαπλές τεχνολογίες και υπάρχουν 4 βασικές πτυχές όπου μπορούν να προσφέρουν μετασχηματική αξία:

#### 1. Συμπίεση του κύκλου ζωής

Η κατασκευή πλοίων, ιδίως των πολεμικών πλοίων, είναι μια μακροχρόνια και δύσχρηστη διαδικασία, λόγω του μεγάλου αριθμού ενδιαφερόμενων μερών και οργανισμών που εμπλέκονται σε ένα ναυπηγικό έργο, της αναποτελεσματικότητας που συνδέεται με τη διαχείριση τεράστιων ποσοτήτων πληροφοριών και δεδομένων, καθώς και της ενσωμάτωσης αλλαγών κατά τη διάρκεια του έργου. Η τεχνολογία DT, μπορεί να διευκολύνει την προγνωστική λειτουργικότητα. Μέσω προσομοιώσεων οι ναυπηγοί μπορούν να προβλέπουν τις μελλοντικές συνέπειες των τρεχουσών αποφάσεων, ελαχιστοποιώντας έτσι τις καθυστερήσεις και βελτιώνοντας τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

#### 2. Διαχείριση της πολυπλοκότητας

Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό του ναυπηγικού κλάδου είναι η πολυπλοκότητα. Ένα πλοίο χαρακτηρίζεται ως «σύστημα συστημάτων» που παρουσιάζει μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις. Τα DT διαχειρίζονται αυτή την πολυπλοκότητα μέσω αρθρωτών διεπαφών (modular interfaces), που λειτουργούν ως «αντιτυρικές ζώνες» μεταξύ των συστημάτων. Διευκολύνουν την έγκαιρη κατανόηση των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων (σιλό) του έργου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού. Συμπερασματικά, τα DT επικουρεί να «στεγανοποιηθούν» τα προβλήματα που υφίσταται η ναυπηγική λόγω της πολυπλοκότητας, ώστε να μην εξαπλώνονται οι δυσκολίες και υπαγορεύει τα διαφορετικά τμήματα να συνεργάζονται



μεταξύ τους βλέποντας την συνολική εικόνα κι όχι μόνο το κομμάτι τους (σπάσιμο των σιλό).

### 3. Ενσωμάτωση τεχνολογιών (IT/OT)

Η ενσωμάτωση του IT του σχεδιασμού με τα βιομηχανικά συστήματα OT των εγκαταστάσεων επιτρέπει σε πηγές πληροφοριών που ήταν διακριτές να συγχωνευτούν σε μια ολοκληρωμένη εικόνα. Τα μοντέλα σχεδιασμού και κατασκευής προϊόντων θα εφαρμοστούν στη λειτουργία και τη συντήρηση των πλοίων. Ταυτόχρονα, οι πληροφορίες σχετικά με την απόδοση των πλοίων θα μεταβιβάζονται στους σχεδιαστές και τους κατασκευαστές, ώστε να διευκολύνεται η λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων για μελλοντικά πλοία και κατηγορίες πλοίων.

### 4. Συνεργατική ανάπτυξη απαιτήσεων μέσω DT

Παραδοσιακά, ο καθορισμός των απαιτήσεων και των προδιαγραφών ήταν αποκλειστικά καθήκον του πελάτη. Η ανάπτυξη ενός DT επεκτείνει πλέον αυτήν την προσέγγιση ώστε να καλύπτει ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Οι σχεδιαστές, οι μηχανικοί κατασκευής και οι προμηθευτές εξοπλισμού συνεργάζονται στο ψηφιακό μοντέλο, ενσωματώνοντας την τεχνογνωσία τους εξαρχής. Αυτή η συνεργατική μέθοδος διευκολύνει τη βελτίωση των απαιτήσεων πριν από την κατασκευή, με αποτέλεσμα να έχουμε πιο παραγωγικά κατασκευάσιμα και με καλύτερες επιδόσεις πλοία.

#### 7.3.2 ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΠΛΟΙΑ (MASS, ASV)

Η πιο κρίσιμη προοπτική των DT είναι στην ανάπτυξη και στη λειτουργία των αυτόνομων πλοίων (MASS). Σε αυτή την περίπτωση, το DT δεν είναι απλώς ένα παθητικό μοντέλο παρακολούθησης, αλλά αποτελεί το «Κεντρικό Νευρικό Σύστημα» (Maritime Central Nervous System - M-CNS) του πλοίου. Σύμφωνα με τον Kilinc (2025), το DT συγχωνεύει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από τους αισθητήρες και τα ρομποτικά συστήματα του σκάφους με τον πυρήνα τεχνητής νοημοσύνης, που αναφέρεται ως «Ψηφιακός Καπετάνιος» και των κέντρων τηλεχειρισμού, διευκολύνοντας την αυτόνομη λήψη αποφάσεων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Για να επιτύχει η εφαρμογή της τεχνολογίας DT στα αυτόνομα πλοία, απαιτούνται υψηλής



πιστότητας μοντέλα, τα οποία μέσω επαλήθευσης και επικύρωσης, θα μπορούν να θεωρηθούν λειτουργικά άρτια.

Η πολυπλοκότητα και η λειτουργικότητα ταξινομείται σε επίπεδα. Οι Menges κ.ά., (2024) παρουσιάζουν μια ταξινόμηση με κλίμακα από 0 έως 5 για τις τεχνολογίες λήψης αποφάσεων σε αυτόνομα σκάφη, με το «Επίπεδο 5» (Αυτόνομο) να επιτρέπει την αποφυγή συγκρούσεων και την χάραξη πορείας. Σε αυτό το επίπεδο, εφαρμόζεται αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ DT και περιουσιακού στοιχείου. Έτσι, δημιουργείται ένας κλειστός βρόγχος ελέγχου όπου υπάρχει αδιάκοπη ενημέρωση του περιουσιακού στοιχείου προς το DT με δεδομένα από αισθητήρες και συστήματα επικοινωνίας (Lidar, Radar, AIS, κλπ.) σε πραγματικό χρόνο. Οι ανακρίβειες του μοντέλου διορθώνονται και βελτιώνεται η λήψη αποφάσεων, εξοπλίζοντας το σκάφος με βασική επίγνωση της κατάστασης, σε ένα συνεκτικό ψηφιακό περιβάλλον.

Μια καινοτόμος λύση προτείνεται από τους Vasanthan και Nguyen, (2021), για το πρόβλημα του αυτόνομου σχεδιασμού διαδρομής, που βασίζεται στην εποπτευόμενη μάθηση (Supervised Learning). Ωστόσο για την εκπαίδευση μοντέλων με εποπτευόμενη μάθηση χρειάζεται τεράστιος όγκος δεδομένων για να εκπαιδευτούν. Γιαυτό το λόγο, αναπτύχθηκε ένα DT ώστε μέσω προσομοίωσης να δημιουργηθούν τα χιλιάδες δεδομένα που χρειάζονται για την εκπαίδευση. Για την εκπαίδευση του μοντέλου καθορίστηκαν περιορισμοί σύμφωνα με τις απαιτήσεις που θέτει η DNV GL για έναν αυτόνομο σχεδιαστή διαδρομών, σε συνδυασμό με τον κανόνα 14 της COLREGs για την αποφυγή συγκρούσεων. Επιπλέον το DT ενσωματώθηκε μέσα στον αλγόριθμο σχεδιασμού πορείας για να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο και να πραγματοποιεί ελέγχους της πορείας και να προτείνει επανασχεδιασμό αν εντοπιστεί κίνδυνος. Το σύστημα δοκιμάστηκε με το εργαλείο προσομοίωσης Simulink, χρησιμοποιώντας το μοντέλο του ερευνητικού πλοίου R/V Gunnerus και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα λειτούργησε όσον αφορά τους περιορισμούς.

### 7.3.3 ΕΞΥΠΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΛΙΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΔΟΜΩΝ (SMART PORTS)

Ένας από τους μεγαλύτερους τερματικούς σταθμούς στον κόσμο, έχει προβλέψει ότι οι τεχνολογία DT θα αποτελέσει κρίσιμο επενδυτικό στόχο για τους τερματικούς σταθμούς τα επόμενα χρόνια, (Port Technology Team, 2021).



Η εφαρμογή της τεχνολογίας DT στους σύγχρονους λιμένες αντιπροσωπεύει μια σημαντική στροφή προς την αειφόρο ανάπτυξη και την αποτελεσματική διαχείριση των πόρων, και όχι απλώς μια ψηφιακή βελτίωση. Έχουν δημιουργηθεί πολυάριθμα πλαίσια για την εφαρμογή ψηφιακών δίδυμων σε θαλάσσιους λιμένες.

Η συγχώνευση των DT με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και τη Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίων (BIM) διευκολύνει τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού οικοσυστήματος, στο οποίο τα γεωχωρικά δεδομένα GIS (τοποθεσία, περιβάλλον) συγχωνεύονται με τα δομικά δεδομένα BIM (χαρακτηριστικά κτιρίων, υλικά), προσφέροντας συνολική παρακολούθηση των λιμενικών εγκαταστάσεων, σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την προληπτική συντήρηση και την λήψη αποφάσεων, (Cancelas κ.ά., 2025).

Ένα νέο γενικό πλαίσιο προτείνεται από τους Zhu κ.ά., (2025) για τη αξιολόγηση ανθεκτικότητας και βιωσιμότητας σε διάφορες κατηγορίες φορτίων, τερματικές και κτηριακές εγκαταστάσεις. Το πλαίσιο ενσωματώνει δεδομένα από το θαλάσσιο περιβάλλον, τον ευρύτερο χώρο του λιμανιού (συμπεριλαμβανομένων των κτηρίων προσωπικού), γεωγραφικά και μετεωρολογικά δεδομένα αλλά και πρακτικές από τον κλάδο AEC. Η μελέτη ανέδειξε τον ρόλο του DT στον στρατηγικό σχεδιασμό και την προετοιμασία για εναλλακτικά σενάρια με χαρακτηριστικό παράδειγμα ένα λειτουργικό DT για τις δραστηριότητες συνολικής διαχείρισης βιομάζας στο λιμάνι του Tyne.

Οι Wang κ.ά., (2021) προτείνουν μια δομή πέντε επιπέδων για την ανάπτυξη DT στη διαχείριση λιμένων. Το πλαίσιο αυτό, μέσω μοντέλων και πλατφορμών βασισμένα σε DT υποστηρίζει λειτουργίες όπως η διακίνηση και μεταφορά φορτίων, η λειτουργία και αποθήκευση εμπορευματοκιβωτίων, η μετάδοση και ανταλλαγή δεδομένων, η πρόβλεψη κινδύνων και η προστασία του περιβάλλοντος.

Ένα παρόμοιο πλαίσιο έχει επεκταθεί σε ένα πολυεπίπεδο υβριδικό σύστημα για το λιμάνι Qingdao στην Κίνα. Το σύστημα χρησιμοποιεί κυβερνοφυσική σύντηξη επιτρέποντας ολογραφικά μοτίβα οπτικής διαχείρισης και ελέγχου. Ενσωματώνει μοντελοποίηση DT, πανταχού παρούσα αντίληψη, χαρτογράφηση δεδομένων και συγχώνευση μοντέλων για την προώθηση έξυπνων λειτουργιών, τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων και την υποστήριξη αυτόνομων δυνατοτήτων διαχείρισης. Αυτή η



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

προηγμένη τεχνολογία επιτρέπει την τρισδιάστατη οπτική παρακολούθηση και τη βέλτιστη αποστολή με βάση δεδομένα αντίληψης σε πραγματικό χρόνο, (Yang κ.ά., 2024).

Ο ψηφιακός μετασχηματισμός για τους λιμένες είναι αναπόφευκτος καθώς θα πρέπει να υποστηρίζουν τα έξυπνα πλοία. Σε αυτό το πλαίσιο, τα DT τόσο των πλοίων όσο και των λιμένων θα λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ των δύο έξυπνων συστημάτων. Ωστόσο, η ψηφιακή μετάβαση θα απαιτήσει την επιτυχή ευθυγράμμιση και την στενή συνεργασία μεταξύ των φορέων.

## **8. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ**

Ιστορικά, ο τομέας της ναυτιλίας ήταν επιφυλακτικός στην υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια βιώνει μια ραγδαία ψηφιακή επανάσταση, που ωθείται από την επιτακτική ανάγκη για την απανθρακοποίηση, την λειτουργική αποδοτικότητα, την μείωση του λειτουργικού κόστους, με στόχο την διατήρηση του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος των εταιρειών εν μέσω των σύγχρονων διεθνών κρίσεων. Στον πυρήνα της ψηφιακής μεταμόρφωσης βρίσκεται η έννοια του DT.

Στο παρόν κεφάλαιο, αποσκοπείται η παρουσίαση των σύγχρονων ερευνητικών και πιλοτικών πρωτοβουλιών ανάπτυξης ψηφιακού διδύμου με έμφαση στις θαλάσσιες εφαρμογές και την μεταφορά βασικής τεχνογνωσίας από σχετικούς βιομηχανικούς κλάδους που χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα, όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία και η ενέργεια.

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην προϋπόθεση ότι η ναυτιλία δεν λειτουργεί πλέον μεμονωμένα. Η επιτακτική ανάγκη συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς που έχουν θεσπιστεί από τον IMO (IMO, 2023) και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Fit for 55) (European Council, 2026), έχει καταστήσει την τεχνολογία DT ένα στρατηγικά σημαντικό εργαλείο. Τα έργα που παρουσιάζονται παρακάτω είναι χρηματοδοτούμενα κυρίως από το πρόγραμμα Horizon Europe και από βιομηχανικές κοινοπραξίες.



## 8.1 ΕΥΡΩΠΑΪΚΑ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΙΛΟΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αναγνωρίζοντας τον κομβικό ρόλο της ψηφιοποίησης στην επίτευξη της Πράσινης Συμφωνίας, έχει χρηματοδοτήσει μέσω του Horizon Europe μια σειρά από έργα. Τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από την ολιστική τους προσέγγιση, καλύπτοντας ολόκληρο τον κύκλο της ζωής του πλοίου.

### 8.1.1 *DT4GS: ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΠΡΑΣΙΝΗ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ*

Το έργο DT4GS (Digital Twins for Green Shipping), με διάρκεια από τον Ιούνιο του 2022 έως τον Μάιο του 2025, αποτελεί μια προσπάθεια δημιουργίας ενός «Ανοικτού Πλαισίου Ψηφιακών Διδύμων» (Open Digital Twin Framework), για τις ναυτιλιακές εταιρείες και για τον ευρύτερο κλάδο των πλωτών μεταφορών, υποστηρίζοντας την μετάβαση προς την έξυπνη και πράσινη ναυτιλία σε υφιστάμενα και νεότευκτα πλοία, (European Commission, 2022).

Η καινοτομία του έργου είναι η δημιουργία ενός ενιαίου χώρου δεδομένων (Dataspace), που ευθυγραμμίζεται με τα πρότυπα GAIA-X, επιτρέποντας την ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των εμπλεκόμενων του ευρύτερου ναυτιλιακού τομέα. Συγκεκριμένα, έχουν τεθεί οι παρακάτω στόχοι:

1. Επίτευξη μείωσης εκπομπών CO<sub>2</sub> έως και 20% έως το 2026 στα DT που θα αναπτυχθούν στα 4 πλοία (Living Labs), ναυτιλιακών εταιρειών που συμμετέχουν στο πρόγραμμα με απώτερο σκοπό να υιοθετηθούν οι βέλτιστες πρακτικές σε περισσότερο από 1000 πλοία έως το 2030.
2. Καθιέρωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για την ναυτιλία μηδενικών εκπομπών, με την δημιουργία πλατφορμών και συστημάτων υποστήριξης λήψης αποφάσεων τόσο για τα νεότευκτα όσο και για τα τροποποιημένα πλοία, οι οποίες περιλαμβάνουν:
  - Δημιουργία ενός ενιαίου χώρου ανταλλαγής δεδομένων (Dataspace), για τον ευρύτερο τομέα της ναυτιλίας.
  - Λύσεις βασισμένες σε προσομοίωση για την αναβάθμιση πλοίων με στόχο την μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 55% έως το 2030.



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

- Έξυπνα και πράσινα ψηφιακά πρότυπα για τον σχεδιασμό των νεότευκτων και ανά τύπο πλοίου.
- Υπηρεσίες εικονικού πεδίου δοκιμών (Virtual Testbed), για την μείωση του κόστους των φυσικών δοκιμών των πράσινων λύσεων της ναυτιλίας (GS solution-Green Shipping solution) κατά 20%.

Το παραδοτέο της έρευνας προσέφερε μια χαρτογράφηση της αξίας (Value Proposition Mapping) με το DT να μην αντιμετωπίζεται μόνο ως τεχνολογία αλλά ως λύση που προσφέρει αξία σε διαφορετικούς ενδιαφερόμενους.

- Για τους πλοιοκτήτες: Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης π.χ. (μέσω τεχνολογικών αναβαθμίσεων) και μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub>.
- Για τα ναυπηγεία: Σχεδιασμός πλοίων με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- Για τους διαχειριστές στόλου: Λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας.
- Για τους διαχειριστές αλυσίδας εφοδιασμού: Μπορούν να επωφεληθούν έμμεσα λαμβάνοντας πληροφορίες σχετικά με την θέση του πλοίου, πιθανά προβλήματα, εκτιμώμενη ώρα άφιξης (ETA).

Το έργο προχώρησε σε εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες. Υλοποίησε 4 «Ζωντανά Εργαστήρια» (Living Labs - LLs), τα οποία καλύπτουν τους κυριότερους τύπους εμπορικών πλοίων, Πίνακας 8.1. Η επιλογή διαφορετικών τύπων πλοίων επιτρέπει την ανάπτυξη εξειδικευμένων μοντέλων που ανταποκρίνονται στα επιχειρησιακά προφίλ της κάθε κατηγορίας. Τεχνολογίες ενεργοποίησης όπως IoT, Big Data, AI, κατέστησαν εφικτό το DT και ενσωματώθηκαν στα πλοία, (European Commission, 2022).



“Ιωάννα Δελή”,  
 “ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
 Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Living Lab	Διαχειριστής	Τύπος Πλοίου & Επιχειρησιακό Προφίλ	Εφαρμογή του DT	Προβλεπόμενη εξοικονόμηση
LL1	Euronav	Tanker (Δεξαμενόπλοιο): Μεταφορά αργού πετρελαίου, Παγκόσμια εμβέλεια	Βελτιστοποίηση ταξιδιού Αναγνώριση συμβάντων Προληπτική συντήρηση Φθορά του κύτους	15%
LL2	Danaos	Container Ship: Πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων Στόλος: 65/71 πλοία / Χωρητικότητας: 2,200 - 13,100 TEU	Βελτιστοποίηση ταξιδιού Αναγνώριση συμβάντων για προληπτική συντήρηση και ασφάλεια	>20%
LL3	Baleària	ROPAX (Επιβατηγό/Οχηματαγωγό): Λειτουργία σε γραμμές μικρών αποστάσεων (Short Sea Shipping) Στόλος: 30 ROPAX πλοία	Βελτιστοποίηση ταξιδιού Βελτιστοποίηση εξισορρόπησης Αναγνώριση συμβάντων για προγνωστική και προληπτική συντήρηση	>20%
LL4	Star Bulk	Bulk Carrier (Φορηγό): Παγκόσμια εμβέλεια Στόλος: 128 πλοία / Χωρητικότητας: 52k-210k DWT	Παρακολούθηση και μέτρηση της ανάπτυξης θαλάσσιων αποθέσεων στην γάστρα	>15%

**Πίνακας 8.1:** Living Labs του Έργου DT4GS, (DT4GS, 2023)



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Το έργο καταδεικνύει ότι τα DT αποτελούν ουσιαστικό μέσο για την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας, διευκολύνοντας την δοκιμή και την αξιολόγηση των επιλογών μείωσης των εκπομπών με ευέλικτο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Μια επιτυχημένη μετάβαση απαιτεί την συνεργασία όλων των ενδιαφερομένων μερών και συνδυασμό πολιτικών, επιχειρησιακών και τεχνολογικών παραγόντων.

#### 8.1.2 TWINSHIP: ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΜΗΔΕΝΙΚΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Το έργο TwinShip, διάρκειας εργασιών 3 ετών και συγκεκριμένα από 1 Φεβρουαρίου 2025 έως και 31 Ιανουαρίου 2028, διενεργείται με τη χρηματοδότηση της ΕΕ, μέσω του χρηματοδοτικού προγράμματος Horizon Europe. Είναι μια ακόμη πρωτοβουλία που εστιάζει στον ψηφιακό και περιβαλλοντικό μετασχηματισμό του κλάδου με απώτερο σκοπό την μετάβαση σε πλοία μηδενικών εκπομπών (Zero Emission Vessels – ZEV).

Το πρόγραμμα υλοποιείται από μια κοινοπραξία μεταξύ κορυφαίων παρόχων ναυτιλιακής τεχνολογίας, λύσεων και υπηρεσιών, ναυτιλιακών εταιρειών, ναυπηγείων, νηογνομόνων, λιμένων, προγραμματιστών λογισμικού, καθώς και ερευνητικών και ακαδημαϊκών φορέων. Μέσα από αυτή την συνεργασία, επιδιώκεται η μείωση των εκπομπών του θερμοκηπίου (GHG), συμβάλλοντας στις παγκόσμιες προσπάθειες για βιωσιμότητα.

Η καινοτομία του προγράμματος είναι ότι μέσω μιας συνεργατικής ανοιχτού κώδικα ψηφιακής πλατφόρμας, το DT θα τροφοδοτεί σύγχρονα συστήματα υποστήριξης λήψης αποφάσεων (Decision Support System – DSS), με δεδομένα λειτουργίας και τεχνολογίας, υποστηριζόμενη από τεχνολογίες ML και AI.

Το έργο έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για την μείωση των GHG, (European Commission, 2025). Με έτος αναφοράς το 2008 επιδιώκεται μείωση:

1. Κατά 30-40% έως το 2030
2. Κατά 80-90% έως το 2040
3. Μηδενικές εκπομπές (net-zero) έως το 2045

Οι παραπάνω στόχοι, αναμένεται να επιτευχθούν μέσω της ανάπτυξης 3 πιλοτικών αντιπροσωπευτικών πλοίων και ενός πειραματικού αυτόνομου σκάφους.

- Ένα σύγχρονο RoRo Grimaldi GreenClass



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

- Ένα επιβατηγό-οχηματαγωγό Stena RoPax
- Ένα χημικό δεξαμενόπλοιο της ίδιας εταιρείας
- Ένα πειραματικό μη επανδρωμένο αυτόνομο RoRo

Σε κάθε ένα πλοίο, θα εφαρμόζονται και διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης, σύμφωνα με τους κανονισμούς σχετικά με τις εκπομπές GHG, προκειμένου να αξιολογηθεί η πλατφόρμα και το DT που βασίζεται σε συστήματα υποστήριξης λήψης αποφάσεων (DSS), σε διάφορα επιχειρησιακά προφίλ.

Αναμένεται ότι βασικές λειτουργίες της πλατφόρμας, που δεν θα υλοποιηθούν κατά την διάρκεια του έργου, θα αναπτυχθούν μετά την λήξη αυτού, από τους φορείς που ενδιαφέρονται για την εμπορευματοποίηση της DT-DSS πλατφόρμας, (Armanes, 2025).

### *8.1.3 VESSELAI: Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (HPC)*

Το VesselAI είναι ένα έργο χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση, το οποίο εντάσσεται στο πλαίσιο του Horizon 2020. Οι εργασίες έχουν ολοκληρωθεί καθώς ξεκίνησε στις 1 Ιανουαρίου 2021 και ολοκληρώθηκε στις 31 Δεκεμβρίου 2023.

Το έργο ήταν κοινοπραξία μεταξύ 12 συνολικά φορέων από διαφορετικές χώρες, ανάμεσά τους πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα, επιχειρήσεις πληροφορικής, ναυτιλιακών παρόχων και συντονίστηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (European Commission, 2021).

Ο στόχος του έργου ήταν η δημιουργία, η επικύρωση και η παρουσίαση μιας διαδικτυακής πλατφόρμας που συνδυάζει τεχνολογίες όπως υπολογιστές υψηλής απόδοσης (High-Performance Computing – HPC), Big Data και AI, με σκοπό την εκτέλεση αναλύσεων εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας για την προώθηση των DT με βάση τα δεδομένα σε θαλάσσιες εφαρμογές. Η τεχνολογία DT επιτρέπει την ενσωμάτωση και την επεξεργασία μεγάλου όγκου ετερογενών δεδομένων, με αποτέλεσμα την ακριβή μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας των πλοίων σε διάφορες δυναμικές καταστάσεις, σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν την πλατφόρμα για να πραγματοποιήσουν προσομοιώσεις και να αξιολογήσουν διάφορες καταστάσεις, με αποτέλεσμα την λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και βελτιωμένων αποτελεσμάτων (Ilias et al., 2023).



*“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”*

Στο πλαίσιο του έργου αναπτύχθηκαν 4 πιλοτικές εφαρμογές ώστε να αναδειχτούν και να αξιολογηθούν πρακτικά οι δυνατότητες της πλατφόρμας και των τεχνολογιών που ενσωματώθηκαν. Αυτές περιλαμβάνουν, (VesselAI, 2021):

1. Μοντελοποίηση πλοίων για την παρακολούθηση και διαχείριση της παγκόσμιας κυκλοφορίας πλοίων.
  - **Εργασίες:** Πρόβλεψη διαδρομών τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα, με βελτιωμένη παρακολούθηση της κυκλοφορίας των πλοίων και αυξημένη ασφάλεια, αντικαθιστώντας τα απλά γραμμικά μοντέλα με προηγμένα μοντέλα βασισμένα σε δεδομένα (data-driven), στοχεύοντας στην παρακολούθηση του παγκόσμιου στόλου.
  - **Συμμετέχοντες φορείς:** MarineTraffic και Πανεπιστήμιο Πειραιώς
2. Παγκοσμίως βέλτιστος σχεδιασμός ενεργειακών συστημάτων πλοίων.
  - **Εργασίες:** Αυτό το πιλοτικό πρόγραμμα έδωσε έμφαση στη διαδικασία σχεδιασμού των ενεργειακών συστημάτων νέων πλοίων. Χρησιμοποιώντας DT και εκτενείς προσομοιώσεις, οι οποίες εκτελούνται σε λίγες ώρες αντί για ημέρες ή εβδομάδες, αναλύονται πολυάριθμοι πιθανοί συνδυασμοί ενεργειακών συστημάτων, προκειμένου να προσδιοριστεί η ιδανική λύση που μειώνει το κόστος και τις εκπομπές GHG κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου.
  - **Συμμετέχοντες φορείς:** VTT και NAPA
3. Αυτόνομα πλοία στις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων
  - **Εργασίες:** Ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα AIS συγκεντρώθηκαν σε μια βάση δεδομένων και χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση μοντέλων ML. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν προέβλεπαν τις κινήσεις των γύρω πλοίων, αναγνώριζαν κινδύνους σύγκρουσης και πρότειναν βέλτιστες διαδρομές αποφυγής σε πραγματικό χρόνο. Το αποτέλεσμα ήταν η επίγνωση της κατάστασης των χειριστών του κέντρου ελέγχου ξηράς παρέχοντάς τους την δυνατότητα πρόβλεψης.
  - **Συμμετέχοντες φορείς:** KONGSBERG, MASSTERLY, SINTEF, Πανεπιστήμιο Πειραιώς



#### 4. Υπηρεσία πρόβλεψης καιρού και πληροφοριών στόλου στη ναυτιλία

- **Εργασίες:** Χρήση μοντέλων ΑΙ για βελτιστοποίηση της πορείας των πλοίων. Προέκυψε πως η συνεχής προσαρμογή της διαδρομής κατά την διάρκεια του ταξιδιού επιφέρει μια επιπλέον εξοικονόμηση καυσίμου της τάξεως του 2% σε μεγάλα ταξίδια με δυσμενείς καιρικές συνθήκες, πέραν του 10% που εξοικονομείται από την αρχική δρομολόγηση βάσει καιρού. Επιπλέον τα μοντέλα ΑΙ μείωσαν τους απαιτούμενους υπολογιστικούς πόρους κατά 95% ενεργοποιώντας την διαδικασία επαναλαμβανόμενης βελτιστοποίησης μόνο όταν είναι απαραίτητο, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε εφαρμογή σε παγκόσμια κλίμακα. Τέλος η ακρίβεια στην εκτίμηση απόδοσης του πλοίου βελτιώθηκε κατά πάνω από 10%, με τη βελτίωση αυτή να είναι ακόμα πιο σημαντική σε συνθήκες πλεύσης ρηχών νερών εκεί όπου τα κλασικά μοντέλα δυσκολεύονται.
- **Συμμετέχοντες φορείς:** NAPA, MarineTraffic, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, VTT

#### 8.1.4 DIGITSENSE: DIGITAL TWIN ΠΛΟΙΟΥ

Σε εθνικό επίπεδο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το ερευνητικό πρόγραμμα «Ψηφιακό Δίδυμο Ενεργειακών Συστημάτων Πλοίου DIGITSENSE», το οποίο είναι μια ελληνική πρωτοβουλία για την ανάπτυξη ψηφιακού διδύμου (DT) πλοίου. Το έργο συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση και υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της δράσης «ΕΡΕΥΝΩ-ΔΗΜΙΟΥΡΓΩ-ΚΑΙΝΟΤΟΜΩ Β' ΚΥΚΛΟΣ» με έναρξη εργασιών τον Σεπτέμβριο του 2021 και ολοκλήρωση του ερευνητικού κύκλου τον Νοέμβριο του 2023. Αποτελεί σύμπραξη μεταξύ παρόχου τεχνολογίας αιχμής στους τομείς των ηλεκτρονικών, της πληροφορικής, των τηλεπικοινωνιών και της ενέργειας, ναυτιλιακών εταιρειών, καθώς και ερευνητικών και ακαδημαϊκών ιδρυμάτων.

Σκοπός του προγράμματος ήταν η ανάπτυξη ενός ευφυούς ψηφιακού διδύμου που εστιάζει στα ενεργειακά συστήματα των πλοίων. Η καινοτομία του έργου έγκειται στη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας, η οποία μέσω εγκατεστημένων αισθητήρων επί του πλοίου, μπορεί να συλλέγει, να επεξεργάζεται και να οπτικοποιεί



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Απώτερος στόχος είναι η εκτίμηση τόσο της στιγμιαίας όσο και των σωρευτικών καταναλώσεων καυσίμου καθώς και του αποτυπώματος άνθρακα των ενεργειακών συστημάτων για διάφορους τύπους πλοίων.

Η ευφυΐα του συστήματος στηρίζεται στο ότι το DT βασίζεται στον συνδυασμό φυσικών μοντέλων (Physics-based models) και πραγματικών δεδομένων που συλλέγονται από τους αισθητήρες του πλοίου, γεγονός που το καθιστά ικανό να υποστηρίζει επιπλέον εφαρμογές (ανάλυση απόδοσης, πρόβλεψη συμπεριφοράς), σε σύγκριση με τα υπάρχοντα συστήματα καταγραφής μετρήσεων και επεξεργασίας δεδομένων με βάση στατιστικές μεθόδους.

Επιπλέον, σε συνδυασμό με τεχνικές AI το DT δύναται να υποστηρίξει τη διάγνωση της λειτουργικής κατάστασης διαφόρων συστημάτων και να παρέχει συστάσεις για βέλτιστη διαχείριση της ενέργειας, με βάση τις πραγματικές λειτουργικές και περιβαλλοντικές συνθήκες. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται σημαντικά η επιχειρησιακή ικανότητα ενός πλοίου, μειώνεται το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα και το πλοίο ευθυγραμμίζεται με τους διεθνείς στόχους απαλλαγής από τον άνθρακα που έχουν τεθεί από τον IMO, (DIGITSENSE, 2022).

## 8.2 ΠΡΩΤΟΒΟΥΛΙΕΣ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΕΣ ΜΕ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Εκτός από τα χρηματοδοτούμενα ερευνητικά προγράμματα οι νηογνώμονες σε συνεργασία με βιομηχανικούς φορείς του ναυτιλιακού κλάδου παίζουν καθοριστικό ρόλο. Οι κοινοπραξίες αυτές γεφυρώνουν την έρευνα με την εμπορική εφαρμογή συμβάλλοντας στην ψηφιακή μετάβαση της ναυτιλίας στοχεύοντας σε λύσεις πιο ασφαλούς, αποδοτικής και βιώσιμης ναυτιλίας. Παρακάτω ακολουθεί μια ενδεικτική και συνοπτική περιγραφή των θέσεων και δράσεων των μεγαλύτερων νηογνώμωνων σχετικά με την ανάπτυξη εφαρμογών στο πλαίσιο τεχνολογιών που αξιοποιούν DT.

### 8.2.1 *DNV (DET NORRSKE VERITAS)*

#### 1. **Open Simulation Platform (OSP)**

Η Ανοιχτή πλατφόρμα προσομοίωσης (OSP) είναι μια ανοιχτού κώδικα πλατφόρμα προσομοίωσης που δημιουργήθηκε από τον νηογνώμονα DNV σε συνεργασία με



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

βιομηχανικούς, ακαδημαϊκούς φορείς (Kongsberg Maritime, NTNU και SINTEF Ocean) αλλά και πολλούς άλλους εταίρους της βιομηχανίας.

Στόχος της πλατφόρμας είναι η καθιέρωση ενός κοινού προτύπου για μοντέλα και προσομοιώσεις σε ένα ενιαίο περιβάλλον χωρίς ανάγκη μετατροπής ή προσαρμογής διαφορετικών εργαλείων. Η πλατφόρμα επιτρέπει την συν-προσομοίωση (co-simulation) πολλαπλών μοντέλων ταυτόχρονα με αποτέλεσμα την επίγνωση της συμπεριφοράς διαφορετικών συστημάτων ή και διαδικασιών όταν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους πριν αυτά εφαρμοστούν στο πραγματικό πλοίο, (DNV, 2020).

## 2. Hyundai Intelligent Digital Twin Ship (HiDTS)

Μια σημαντική εφαρμογή των DT στη ναυτιλία αποτελεί η συνεργασία του DNV με τον όμιλο HD Hyundai για την ανάπτυξη του HiDTS. Ο νηογνώμονας απένειμε Έγκριση επί της Αρχής (AiP – Approval in Principle) στο HiDTS διασφαλίζοντας ότι το σύστημα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του προτύπου επαλήθευσης βάσει δεδομένων (DDV – Data-Driven Verification), με την αξιολόγηση να βασίζεται σε ψηφιακό δίδυμο (qualifier DT).

Η ανάπτυξη του HiDTS περιλάμβανε την σταδιακή ενσωμάτωση κρίσιμων συστημάτων και συγκεκριμένα συστήματος διαχείρισης ισχύος (PMS), συστήματος ελέγχου κινητήρα (ECS) και συστήματα διαχείρισης αερίου και χειρισμού φορτίου (GMS & CHS), σε ένα DT βασισμένο στο cloud. Μέσω αυτού, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις και εικονικές δοκιμές των συστημάτων πριν αυτά εγκατασταθούν στο πλοίο ενισχύοντας την ασφάλεια, την αξιοπιστία και την ενεργειακή απόδοση, (DNV, 2024).

### 8.2.2 LR (LLOYD'S REGISTER)

#### 1. Structural Digital Twin (SDT)

Ο LR αναπτύσσει ένα DT του κύτους του FPSO (Floating Production Storage and Offloading) Glas Dowl της Bluewater, δημιουργώντας ένα λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE) της δομής του κύτους, χρησιμοποιώντας ιστορικά και σύγχρονα δεδομένα από το δίκτυο των αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι επί του σκάφους και παρακολουθούν τις καταπονήσεις στα διάφορα γεωγραφικά περιβάλλοντα. Το DT είναι ικανό να προβλέψει εκτός από την δομική κόπωση και την



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

υπολειπόμενη διάρκεια ζωής του σκάφους, καθορίζοντας το εύρος των τροποποιήσεων και την επιλογή πεδίου. Απώτερος σκοπός της εταιρείας Bluewater είναι η αντικατάσταση των δραστηριοτήτων επιθεώρησης με την βοήθεια του DT μειώνοντας σημαντικά τα έξοδα επιθεώρησης και τον κίνδυνο διακοπής λειτουργίας.

## 2. Πιστοποίηση “Digital Twin Ready”

Ο LR απένειμε Έγκριση επί της Αρχής (AiP), στη Hyundai Heavy Industries (HHI) του Συστήματος Ψηφιακής Διαχείρισης Υγείας (Digital Health Management – DHM) με σκοπό την διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας των δεξαμενών Τύπου B, σε πλοία LNG την βελτίωση της απόδοσης των περιουσιακών στοιχείων και την κατάσταση των εξαρτημάτων της δεξαμενής, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το DT HiPIX (Hyundai Prismatic Independent IMO Type B Tank eXcellence), το οποίο είναι ένα λογισμικό που ανέπτυξε η HHI.

Μέσω του DT, αναλύονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και παράγονται πληροφορίες για την κατάσταση της δεξαμενής συγκράτησης αερίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της συντήρησης με παροχή στοχευμένων και έγκαιρων συμβουλών συντήρησης. Επιπλέον, έχει την ικανότητα της εκτίμησης και του εντοπισμού αναδυόμενων συνθηκών βλάβης. Κατά συνέπεια, το DT διευκολύνει την ακριβή παρακολούθηση και την εξέλιξη των σφαλμάτων πριν προκύψουν δαπανηρές βλάβες, (Lloyd’s Register, 2020).

### 8.2.3 ABS (AMERICAN BUREAU OF SHIPPING)

#### 1. ABS EagleTwin™

Ο ABS παρουσίασε το ABS EagleTwin™, ενός διαδικτυακού 3D δομικού DT (Structural Digital Twin), ειδικά σχεδιασμένο για ιδιοκτήτες και χειριστές πλωτών περιουσιακών στοιχείων όπως FPSO, FLNG και FSRU. Το νέο εργαλείο επιτρέπει μια τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση ενός υπεράκτιου περιουσιακού στοιχείου ενσωματώνοντας δεδομένα επιθεώρησης και κλάσης και μπορεί να συνδέεται με οποιαδήποτε μάρκα Ηλεκτρονικού Συστήματος Διαχείρισης Συντήρησης (CMMS). Μέσω του εργαλείου παρέχεται στους χειριστές μια ολοκληρωμένη εικόνα της δομικής υγείας του περιουσιακού στοιχείου σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την ασφάλεια,



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τον μη προγραμματισμένο χρόνο εκτός λειτουργίας, (ABS, 2025).

## 2. Samsung Innovative Structural Digital Twin (SiSDT)

Ο ABS απένειμε προς την Samsung Heavy Industries (SHI), Έγκριση επί της Αρχής (AiP) για την νέα ψηφιακή τεχνολογία DT παρακολούθησης δομικής ακεραιότητας. Το SiSDT λαμβάνει δεδομένα από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στο κύτος και σε συνδυασμό με εξελιγμένους αλγόριθμους, παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την κατάσταση των δομικών στοιχείων ενός πλοίου.

Μέσω του DT τα δεδομένα συλλέγονται και αξιοποιούνται σε πραγματικό χρόνο, μετατρέποντας την παρακολούθηση της καταπόνησης του κύτους σε άμεση λειτουργική πληροφορία, επιτρέποντας την βελτιστοποίηση των αποδόσεων, την στοχευμένη συντήρηση και την ενίσχυση της ασφάλειας, (Ναυτεμπορική, 2025).

### 8.2.4 CLASSNK (NIPPON KAIJI KYOKAI)

**Digital Twin Project:** Το έργο Digital Twin αποσκοπεί στην παροχή μιας ασφαλούς πλατφόρμας ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ ναυπηγείων και πλοιοκτητών, με στόχο την ενίσχυση της χρήσης DT κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός πλοίου, βελτιώνοντας έτσι την λειτουργική αποδοτικότητα και την ασφάλεια. Η πλατφόρμα θα επιτρέπει την ανταλλαγή 3D μοντέλων που δημιουργούνται κατά τη φάση σχεδιασμού του πλοίου, σε ένα ασφαλές ψηφιακό περιβάλλον με ελεγχόμενη πρόσβαση για τους συμμετέχοντες ενδιαφερόμενους. Στόχος είναι η αντιμετώπιση των προκλήσεων που συνδέονται με τη διάδοση ευαίσθητων δεδομένων σχεδιασμού και λειτουργίας, (ClassNK, 2025).

Οι φορείς αναμένουν τα παρακάτω οφέλη:

- Βελτίωση των μελλοντικών σχεδίων πλοίων μέσω της ανατροφοδότησης με λειτουργικά δεδομένα.
- Πρόβλεψη βασισμένη σε δεδομένα ώστε να αξιολογούνται εκ των προτέρων οι επιπτώσεις των νέων τεχνολογιών όπως, η δρομολόγηση βάσει καιρού, η αιολική πρόωση ή οι μπαταρίες, στην ασφάλεια, τη λειτουργία και την χωρητικότητα του πλοίου.
- Αξιολόγηση (Verification) νέων συστημάτων που εγκαθίστανται στο πλοίο.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

### 8.2.5 BUREAU VERITAS (BV)

**Digital Twin Pilots:** Ο Bureau Veritas σε συνεργασία με την εταιρεία ARAS, θα υλοποιήσουν πιλοτικά προγράμματα ψηφιακών διδύμων με σκοπό την παροχή ακριβών και λεπτομερών πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της πλατφόρμας DT ο BV θα δημιουργήσει μια ενιαία πηγή για κάθε πλοίο και περιουσιακό στοιχείο ώστε να εξασφαλίσει πλήρη ιχνηλασιμότητα των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και να υποστηρίξει την συνεχή ενημέρωση του πλοίου από την φάση του σχεδιασμού έως την λειτουργία.

Σκοπός του έργου είναι βελτίωση της ασφάλειας, της λειτουργικής αποδοτικότητας και των περιβαλλοντικών επιδόσεων σε διάφορους τύπους περιουσιακών στοιχείων, (Bureau Veritas, 2022).

Οι παραπάνω πρωτοβουλίες, καθιστούν εμφανές το γεγονός πως οι νηογνώμονες έχουν εξελιχθεί πέρα από τους συμβατικούς τους ρόλους όπως είναι η επιθεώρηση και η πιστοποίηση. Μετασχηματίζονται σε ψηφιακούς φορείς διασφάλισης αξιοποιώντας DT για να αποκτήσουν επίγνωση της κατάστασης των πλοίων τόσο στην φάση του σχεδιασμού όσο και στην φάση της λειτουργίας.

### 8.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ DT ΣΕ ΕΞΥΠΝΟΥΣ ΛΙΜΕΝΕΣ

Ο ψηφιακός μετασχηματισμός των λιμένων έχει καταστεί επιτακτική ανάγκη και στρατηγική προτεραιότητα. Τα σύγχρονα λιμάνια εξελίσσονται σε έξυπνους κόμβους (Smart Hubs) μέσω της εφαρμογής αναδυόμενων τεχνολογιών όπως είναι και η τεχνολογία DT. Το DT επιτρέπει στα λιμάνια να αντικατοπτρίζουν πέραν των περιουσιακών στοιχείων και τις φυσικές διαδικασίες σε ένα εικονικό περιβάλλον, να αναλύουν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο επιτρέποντας την λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Σκοπός των φορέων διαχείρισης λιμένων είναι μεταξύ άλλων, η αντιμετώπιση των αυξανόμενων και περίπλοκων διαδικασιών της εφοδιαστικής αλυσίδας, η μείωση των χρόνων αναμονής στο λιμάνι, η δυνατότητα να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των σύγχρονων πλοίων η μεγιστοποίηση της χρήσης και της αξιοπιστίας του εξοπλισμού, και η μείωση του οικολογικού τους αντικτύπου.



Ακολουθούν τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα λιμανιών που έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία αυτή στο πλαίσιο του ψηφιακού τους μετασχηματισμού.

### 8.3.1 ΛΙΜΑΝΙ ΤΟΥ ΡΟΤΕΡΝΤΑΜ

Το λιμάνι του Ρότερνταμ είναι το μεγαλύτερο στην Ευρώπη. Οι φορείς διαχείρισης του λιμένα έχουν θέσει σαν στόχο να είναι το πρώτο λιμάνι που θα δέχεται αυτόνομα πλοία έως το 2030, διατηρώντας την ηγετική θέση του όσον αφορά την αποδοτικότητα και τις δυνατότητες που προσφέρει στους πελάτες του.

Σε συνεργασία με την IBM και την ERSI ο οργανισμός του λιμένος δημιούργησε ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο των υποδομών του λιμανιού. Το DT αποτελείται από συστήματα που συλλέγουν αναλύουν και απεικονίζουν τις πληροφορίες. Τα βασικά συστατικά του συστήματος αποτελούν η πλατφόρμα IoT της IBM και το σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών της ERSI.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο και υλοποιείται από ένα εκτεταμένο δίκτυο έξυπνων αισθητήρων που έχει εγκατασταθεί στις αποβάθρες, στους διαδρόμους του λιμανιού, στα κανάλια καλύπτοντας μια έκταση περίπου 42 χλμ. οι οποίοι συλλέγουν πληροφορίες για:

- Τις καιρικές συνθήκες (ορατότητα, ταχύτητα ανέμου)
- Την υδρογραφική κατάσταση (στάθμη νερού, ρεύματα, παλίρροια, αλατότητα)
- Τη διαθεσιμότητα των θέσεων ελλιμενισμού
- Τις κινήσεις των πλοίων και τις ροές κυκλοφορίας
- Γεωγραφικές πληροφορίες (GIS)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα καινοτομίας και εναρμόνισης με την πολιτική της Λιμενικής Αρχής για αύξηση της ασφάλειας και της αποτελεσματικότητας, αποτελούν οι «έξυπνες δέστρες» (smart bollards). Έχουν εγκατασταθεί 6 η μία δίπλα στην άλλη σε μια θέση ελλιμενισμού για πλοία εμπορευματοκιβωτίων και οι ενσωματωμένοι αισθητήρες μετρούν την αντοχή των αγκυροβολίων. Έτσι προκύπτουν πληροφορίες σχετικά με τις συνέπειες του ελλιμενισμού, της πρόσδεσης και της στάσης των πλοίων στην αποβάθρα.

Το DT του Ρότερνταμ θεωρείται από τους ειδικούς πρωτόπορο στις πρωτοβουλίες ψηφιοποίησης, επιτρέποντας στους διαχειριστές να βελτιώνουν συνεχώς την



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

κατανόηση για τον τρόπο βελτίωσης και αποτελεσματικότητας των λειτουργιών, συμμορφούμενοι παράλληλα με αυστηρά πρότυπα ασφαλείας και περιβαλλοντικών κανονισμών, (Port of Rotterdam, 2023).

### 8.3.2 ΛΙΜΑΝΙ ΤΗΣ ΑΜΒΕΡΣΑΣ – ΜΠΡΙΖ

Το λιμάνι της Αμβέρσας αποτελεί άλλο ένα παράδειγμα έξυπνου λιμένα που εφαρμόζει καινοτόμες και έξυπνες λύσεις για την λειτουργία του. Στο πλαίσιο της στρατηγικής του η ψηφιοποίηση παίζει βασικό ρόλο στην δυναμική του και συντελεί στον απώτερο στόχο των φορέων να δημιουργήσουν το λιμάνι του μέλλοντος.

Η αξία του λιμένα ενισχύεται μέσω των έξυπνων λειτουργιών που εφαρμόζονται. Οι διαχειριστές αναπτύσσουν και βελτιστοποιούν εντατικά ένα DT του λιμανιού, αξιοποιώντας αισθητήρες που καλύπτουν το σύνολο της έκτασης, αυτόνομα drones και έξυπνες κάμερες για επιθεώρηση και απομακρυσμένη παρακολούθηση των δραστηριοτήτων στο λιμάνι.

Το DT γνωστό και ως APICA (Advanced Port Information & Control Assistant) είναι ένα εξελιγμένο τρισδιάστατο (3D) ψηφιακό αντίγραφο της περιοχής του λιμένα, βοηθώντας τους χειριστές καθημερινά να δραστηριοποιούνται πιο αποτελεσματικά και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ενσωματώνει δεδομένα από τις κάμερες, τα drones, τους αισθητήρες, τα συστήματα AIS και παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για:

- Τις καιρικές συνθήκες
- Την ποιότητα αέρα
- Τις κινήσεις των πλοίων και τις ροές κυκλοφορίας
- Τη ρύθμιση κυκλοφορίας των γεφυρών και των θυροφραγμάτων του λιμανιού
- Την ανίχνευση ατυχημάτων, διαρροών καυσίμων ή επιβλαβών αερίων αποστέλλοντας αυτόματα ειδοποιήσεις στους αρμόδιους για άμεση παρέμβαση

Οι φορείς έχουν θέσει ως στόχο την κατασκευή ενός «ψηφιακού νευρικού συστήματος» για μια ολοκληρωμένη και απομακρυσμένη διαχείριση του λιμένα. Για να καταστεί εφικτό συνεργάζονται με εταίρους που επενδύουν στην καινοτομία και χρησιμοποιούν τον χώρο του λιμανιού ως πλατφόρμα έρευνας και ανάπτυξης. Με την βοήθεια της τεχνολογίας DT, της AI και της χρήσης ιστορικών δεδομένων θα είναι σε θέση να προβλέπουν επικίνδυνες καταστάσεις πριν συμβούν και να ενισχύσουν την



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

ασφαλή, ομαλή και βιώσιμη ροή της κυκλοφορίας και των καθημερινών δραστηριοτήτων του λιμανιού, (Port of Antwerp – Bruges, n.d.).

### 8.3.3 ΛΙΜΑΝΙ ΤΗΣ ΣΙΓΚΑΠΟΥΡΗΣ

Το λιμάνι της Σιγκαπούρης αποτελεί παράδειγμα καινοτομίας στην εφαρμογή της τεχνολογίας DT σε λιμάνια παγκοσμίως. Κατά τη διάρκεια της Ναυτικής Εβδομάδας της Σιγκαπούρης 2025, η Ναυτιλιακή και Λιμενική Αρχή της Σιγκαπούρης (MPA) παρουσίασε επίσημα το Maritime Digital Twin (MDT), ένα εικονικό μοντέλο του λιμανιού που αναπτύχθηκε σε συνεργασία με την Κυβερνητική Υπηρεσία Τεχνολογίας της Σιγκαπούρης (GovTech).

Η τεχνολογία DT, μεταξύ άλλων πρωτοβουλιών, θα ενισχύσει τις προσπάθειες των φορέων να επιτύχουν τον στρατηγικό τους ρόλο στο παγκόσμιο εμπόριο με την κατασκευή του μεγαλύτερου αυτοματοποιημένου τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων στον κόσμο τον Tuas Mega Port, με ετήσια χωρητικότητα 65 εκατ. TEU. Το έργο θα υλοποιηθεί σε 4 φάσεις. Το 2024 διακίνησε 41,12 εκατ. TEU με απώτερο στόχο να συγκεντρώσει όλες τις λιμενικές δραστηριότητες της χώρας σε μια ενιαία και αυτόνομη εγκατάσταση έως το 2040.

Το DT θα ενσωματώνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από:

- Τα πλοία
- Τις δραστηριότητες του λιμανιού
- Αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στην έκταση του λιμανιού αλλά και επί της θαλάσσης σε σηματοδύρες
- Από δορυφόρους με την βοήθεια των γεωχωρικών εργαλείων

Σε συνδυασμό με την χρήση της ΑΙ και της προγνωστικής ανάλυσης οι διαχειριστές είναι σε θέση να βελτιστοποιούν και να ενισχύουν την δυναμική και την επιχειρησιακή λειτουργία του λιμένα αποκομίζοντας οφέλη όπως:

- Ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης
- Μείωση των εκπομπών
- Αποδοτικότερη διαχείριση της ασφάλειας
- Αντιμετώπιση των έκτακτων αναγκών π.χ. διαρροές πετρελαίου και επιβλαβών αερίων στην ατμόσφαιρα



- Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των διαδρομών των πλοίων, συμπεριλαμβανομένης της ακριβούς άφιξης στο λιμάνι και της μείωσης του χρόνου αναμονής στο λιμάνι

Οι λιμενικές αρχές έχουν προβεί σε συνεργασίες με εταιρείες και ερευνητές εστιάζοντας στην καινοτομία, την έρευνα, την ανάπτυξη και την πιλοτική δοκιμή πριν την εφαρμογή. Αυτή η προσέγγιση ενισχύει την προοπτική του λιμένα Tuas να γίνει ο κορυφαίος κόμβος του θαλάσσιου εμπορίου, εφαρμόζοντας πλήρη αυτοματοποίηση διατηρώντας υψηλά τα επίπεδα ασφαλείας και βιωσιμότητας, (Maritime and Port Authority of Singapore, 2025).

Συνοψίζοντας, τα παραπάνω παραδείγματα εφαρμογής των DT αναδεικνύουν πως η τεχνολογία αυτή καθιερώνεται σε κρίσιμο εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού των λιμένων μεγάλης κλίμακας, υποστηρίζοντας την αυτοματοποίηση, τη βιωσιμότητα και την διαχείριση πολύπλοκων επιχειρησιακών διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο.

#### 8.4 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑΣ ΑΠΟ ΑΛΛΟΥΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ ΚΛΑΔΟΥΣ

Η τεχνολογία DT σχεδιάστηκε αρχικά για τεχνολογικά πολύπλοκους τομείς, όπως η αεροδιαστημική, η βιομηχανική παραγωγή και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η απαίτηση για υψηλή αξιοπιστία, ασφάλεια και βελτιστοποίηση του κόστους κύκλου ζωής απαιτούσε την εφαρμογή εξελιγμένων εργαλείων προσομοίωσης και παρακολούθησης συστημάτων. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει την τάση για άντληση τεχνογνωσίας για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, η οποία αντιμετωπίζει ανάλογες προκλήσεις πολυπλοκότητας, λειτουργίας σε ακραίες συνθήκες και συμμόρφωσης με τους κανονισμούς.

##### *8.4.1 ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ (ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ)*

Η βιομηχανική παραγωγή μπορεί να αποτελέσει σημαντικό τομέα μεταφοράς γνώσης προς την ναυτιλία, όπου τα DT χρησιμοποιούνται εκτενώς για εφαρμογές προγνωστικής συντήρησης. Στον τομέα αυτό τα DT που εφαρμόζονται συγκρίνουν την πραγματική απόδοση μιας μηχανής με το ψηφιακό αντίστοιχο διευκολύνοντας τον



εντοπισμό των αποκλίσεων που σχετίζονται με την φθορά ή μια επικείμενη βλάβη, (Hassan κ.ά., 2023).

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην συνεχή συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες αλλά και ιστορικά δεδομένα και στην ανάπτυξη υβριδικών μοντέλων (grey-box model) που απεικονίζουν την φυσιολογική λειτουργία του εξοπλισμού. Η ανάλυση των μη τυπικών συμπεριφορών και η εκτίμηση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (Remaining Useful Life – RUL) επιτρέπουν τον έγκαιρο προγραμματισμό της συντήρησης χωρίς διακοπή της παραγωγής, (Errandonea κ.ά., 2020).

Αντίστοιχα, η μεθοδολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην ναυτιλία για την παρακολούθηση των κρίσιμων συστημάτων όπως είναι το σύστημα πρόωσης, οι αντλίες, οι γεννήτριες και τα συστήματα διαχείρισης καυσίμου. Παρόμοια με τις πρακτικές της βιομηχανίας, η σύγκριση των πραγματικών δεδομένων λειτουργίας με τα ψηφιακά μοντέλα μπορεί να επιτρέψει την έγκαιρη διάγνωση και την μετάβαση από προληπτική συντήρηση σε προγνωστική χωρίς διακοπή λειτουργίας του περιουσιακού στοιχείου.

#### 8.4.2 ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ (ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ)

Ένας βασικός τομέας στον οποίο ο κλάδος της αυτοκινητοβιομηχανίας προσφέρει σημαντική εξειδίκευση στη ναυτιλία είναι η ανάπτυξη τεχνολογίας αυτόνομων λειτουργιών. Τα αυτόνομα οχήματα (AV) βασίζονται σε ψηφιακά δίδυμα, αισθητήρες περιβάλλοντος και αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης για την αντίληψη του χώρου, τη λήψη αποφάσεων και τον αυτοματοποιημένο έλεγχο. Όλες οι παραπάνω αποτελούν τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε αυτόνομα ή ημιαυτόνομα πλοία.

- **Σύντηξη δεδομένων**

Αποτελεί μια σημαντική πτυχή τεχνογνωσίας καθώς τα αυτόνομα οχήματα χρησιμοποιούν εξελιγμένους αλγόριθμους που ενσωματώνουν δεδομένα από κάμερες, αισθητήρες LiDAR, RADAR και GPS για να δημιουργήσουν μια ακριβή αναπαράσταση του περιβάλλοντος, (Grigorescu κ.ά., 2020; Mao κ.ά., 2025). Αντίστοιχα στις θαλάσσιες εφαρμογές, μπορούν να εφαρμοστούν παρόμοιες μεθοδολογίες για την ενσωμάτωση δεδομένων από RADAR, AIS, GPS



μετεωρολογικούς αισθητήρες και συστήματα παρακολούθησης κινητήρων βελτιστοποιώντας την επίγνωση της κατάστασης του πλοίου.

- **Προηγμένη προσομοίωση**

Η ενσωμάτωση των DT στα αυτόνομα οχήματα έχει επιτρέψει την εκτέλεση προηγμένων προσομοιώσεων και τις αξιολογήσεις ασφαλείας, μειώνοντας τους χρόνους ανάπτυξης και το κόστος για κάθε πρωτότυπο πριν την φάση της κατασκευής, (Μαο κ.ά., 2025; Kilinc, 2025). Αυτή η μέθοδος μπορεί να υποστηρίξει την πρόοδο των αυτόνομων θαλάσσιων επιφανειακών σκαφών (MASS), ώστε μέσω αλγόριθμων πλοήγησης να αξιολογούνται σε προσομοιωμένα περιβάλλοντα τρέχοντας χιλιάδες εικονικά σενάρια.

#### 8.4.3 ΑΣΦΑΛΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΤΕΧΝΟΓΝΩΣΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ)

Ο αεροδιαστημικός τομέας αποτελεί παράδειγμα ασφαλείας και αξιοπιστίας, χρησιμοποιώντας τα DT για βασικές λειτουργίες όπως η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας, η πρόβλεψη βλαβών κινητήρων και η εκτίμηση κινδύνων, (Ταο κ.ά., 2019a).

Οι παραπάνω λειτουργίες είναι απόλυτα συναφείς με την ναυτιλία όπου η δομική ακεραιότητα του σκάφους και η ασφάλεια του πληρώματος είναι υψίστης σημασίας. Η δυνατότητα αναπαραγωγής ακραίων επιχειρησιακών σεναρίων (what-if) μέσω DT για δυσμενείς καιρικές συνθήκες, μηχανικές δυσλειτουργίες ή καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ενισχύει την εκτίμηση κινδύνου πριν την εκδήλωση αυτών.

Επιπλέον, στον αεροπορικό κλάδο, τα DT χρησιμοποιούνται για την συνεχή παρακολούθηση της υγείας κρίσιμων συστημάτων. Αντίστοιχα αυτή η πρακτική πρέπει να χρησιμοποιηθεί στα πλοία για την ανάλυση των καταπονήσεων του κύτους, της πρόωσης και του κινητήρα, συμβάλλοντας στην επιχειρησιακή ασφάλεια, (Μαο κ.ά., 2025).

Η υιοθέτηση βέλτιστων πρακτικών από τεχνολογικά ώριμους κλάδους όπως η βιομηχανική παραγωγή, η αεροδιαστημική και η αυτοκινητοβιομηχανία επιταχύνει τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ναυτιλίας μέσω αποδεδειγμένων και καθιερωμένων



λύσεων για τα κρίσιμα ζητήματα της προγνωστικής συντήρησης, της αυτόνομης πλοήγησης και της επιχειρησιακής ασφάλειας.

## **9. ΕΥΡΗΜΑΤΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ**

### **9.1 ΕΥΡΗΜΑΤΑ**

Έπειτα από εκτενή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αποτέλεσε και σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας που είναι πρωτίστως η κατανόηση της έννοιας της αναδυόμενης τεχνολογίας του DT και πως μπορεί να καταστεί δυνατή η εφαρμογή του στον κλάδο της ναυτιλίας, μπορούν να απαντηθούν τα ερωτήματα που τέθηκαν στην ενότητα 1.3.

**Ερώτημα 1:** Υπάρχει ενιαίος και σαφής ορισμός;

Η μελέτη κατέδειξε πως δεν υπάρχει μέχρι και σήμερα ένας καθολικά αποδεκτός και σαφής ορισμός για το DT. Παρατηρείται πως, η έννοια διαφοροποιείται ανάλογα με το πλαίσιο εφαρμογής ακόμα και την φάση του κύκλου ζωής.

Ωστόσο, η πλειάδα των ορισμών συγκλίνουν στο ότι ένα ψηφιακό δίδυμο είναι μια εικονική αναπαράσταση μιας φυσικής οντότητας (αντικείμενο ή διαδικασία) στον εικονικό κόσμο, η οποία θα πρέπει να διατηρεί αμφίδρομη και συνεχή σύνδεση με το φυσικό της αντίστοιχο μέσω ροής δεδομένων.

**Ερώτημα 2:** Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του και τα συστατικά στοιχεία;

Ως προς τα συστατικά του στοιχεία οι περισσότεροι συγγραφείς εξετάζουν το μοντέλο DT 3 διαστάσεων που πρότεινε ο Grieves (2014):

1. Φυσικό μέρος
2. Εικονικό μέρος
3. Αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ τους

Η ροή των συνδέσεων είναι που διακρίνουν το ψηφιακό δίδυμο από το ψηφιακό μοντέλο και την ψηφιακή σκιά.

Ωστόσο, σύγχρονες προσεγγίσεις επεκτείνουν το μοντέλο προσθέτοντας τις διαστάσεις των δεδομένων και των υπηρεσιών με τον πυρήνα να παραμένει ίδιος.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Έτσι δημιουργείται το μοντέλο 5 διαστάσεων με την διάσταση των δεδομένων να περιλαμβάνει διαδικασίες απόκτησης και διαχείρισης ετερογενών δεδομένων και την διάσταση των υπηρεσιών να προσφέρει πρακτικά οφέλη (π.χ. προσομοίωση, βελτιστοποίηση, πρόγνωση) προς τους χρήστες.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του και αυτά που το διαχωρίζουν από μοντέλα CAD είναι:

1. Ικανότητα προσομοίωσης σε όλο τον κύκλο της ζωής του προϊόντος κι η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του φυσικού συστήματος
2. Η συνεχής διασύνδεση και συγχρονισμός (φυσικού-εικονικού μέρους)
3. Η ενσωμάτωση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

**Ερώτημα 3:** Με ποιες τεχνολογίες συνδέεται;

Το DT δεν αποτελεί μια μεμονωμένη τεχνολογία. Είναι ένα οικοσύστημα αναδυόμενων τεχνολογιών που καθιστούν εφικτή την υλοποίησή του. Συνδέεται άμεσα με τις εξής τεχνολογίες:

1. Το IoT και τους έξυπνους αισθητήρες για απόκτηση δεδομένων.
2. Το cloud για αποθήκευση, επεξεργασία και προσβασιμότητα δεδομένων.
3. Τα Big Dat Analytics για επεξεργασία και τεχνικές ανάλυσης μεγάλου όγκου δεδομένων.
4. Ασύρματο δίκτυο υψηλών ταχυτήτων (5G) για διασυνδεδεμένο περιβάλλον και ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
5. Την ML για την εκπαίδευση των μοντέλων.
6. Την AI για την πρόβλεψη και την βελτιστοποίηση.
7. Τεχνολογίες VR/AR για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την αλληλεπίδραση του χρήστη με το DT.

**Ερώτημα 4:** Σε ποιους τομείς εφαρμόζεται με το παρόν αλλά και δυνητικά;

**Αεροδιαστημική:** Η τεχνολογία εφαρμόστηκε αρχικά στην αεροδιαστημική για την παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας των σκαφών.

**Μεταποίηση:** Σύντομα επεκτάθηκε στις γραμμές παραγωγής εργοστασίων για την προληπτική συντήρηση των μηχανημάτων.

**Αυτοκινητοβιομηχανία:** Τα DT αξιοποιούνται από τον σχεδιασμό μέχρι την συντήρηση αλλά και για προηγμένη προσομοίωση στα αυτόνομα οχήματα.



**Ενέργεια:** Εφαρμόζονται DT για την ενεργειακή απόδοση, την βελτιστοποίηση της συντήρησης και την απομακρυσμένη παρακολούθηση.

**Υγεία:** Χρησιμοποιούνται για νοσοκομεία και κλινικές για μοντελοποίηση της ροής ασθενών και διαχείρισης συστημάτων νοσοκομείου. Πολλά υποσχόμενο αποτελεί το «ανθρώπινο DT» με μοντέλα που ενσωματώνουν δεδομένα του ασθενή.

**Έξυπνες πόλεις:** Συγκωνεύοντας 3D χαρτογραφικά δεδομένα, μοντέλα πόλης και δεδομένα αισθητήρων, τα DT χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της εξέλιξης των υποδομών, της κυκλοφορίας, του περιβάλλοντος και δοκιμή σεναρίων σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης.

**Ναυτιλία:** Εφαρμόζονται για την παρακολούθηση της κατάστασης, της απόδοσης του πλοίου, τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου, τον επιχειρησιακό σχεδιασμό ταξιδιού. Στους έξυπνους λιμένες χρησιμοποιείται η τεχνολογία για την υποστήριξη, την αυτοματοποίηση, τη βιωσιμότητα και την διαχείριση πολύπλοκων επιχειρησιακών διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και στην ναυπηγική για την σύγκριση της απόδοσης του εξοπλισμού.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως το DT είναι μια τεχνολογία με ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών με προοπτικές αξιοποίησης και εφαρμογής εκεί όπου ένα ψηφιακό αντίστοιχο μπορεί να επιφέρει αξία.

**Ερώτημα 5:** Ποια είναι τα οφέλη του;

Από την βιβλιογραφία φαίνεται πως τα DT έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν μια βαθιά εικόνα και έλεγχο σε πολύπλοκα συστήματα και στις διαδικασίες που τα πλαισιώνουν. Προκύπτουν πολλά οφέλη με την εφαρμογή τους. Μερικά από αυτά που καταγράφονται είναι:

Μέσω της ακριβούς προσομοίωσης και των δεδομένων πραγματικού χρόνου επιτρέπει:

- Πρόβλεψη καταστάσεων
- Μείωση σφαλμάτων, αβεβαιότητας καθώς επιτρέπει τον εντοπισμό τους πριν αυτά κλιμακωθούν
- Προγνωστική συντήρηση και αξιοπιστία μέσω της ανάλυσης δεδομένων
- Μείωση των σιλό στην πληροφορία μέσω της σύνδεσης τμημάτων και φάσεων που λειτουργούσαν απομονωμένα



- Ασφάλεια και απόδοση μέσω της έγκαιρης διάγνωσης
- Ενίσχυση βιωσιμότητας και εξοικονόμησης πόρων

**Ερώτημα 6:** Είναι εφικτή η εφαρμογή του ψηφιακού δίδυμου στην ναυτιλία και σε ποιον βαθμό;

Η εφαρμογή των DT μέχρι και σήμερα αν και έχει κάνει προόδους, διαφαίνεται πως είναι σε πρώιμα στάδια σε σχέση και με άλλους τομείς. Παρόλο που μετρούνται σχεδόν 15 χρόνια από την εισαγωγή της ιδέας η ναυτιλία μόλις τα τελευταία χρόνια κάνει προσπάθειες μέσω του ψηφιακού σχηματισμού να προχωρήσει σε εφαρμογή αναδυόμενων τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένης και της τεχνολογίας που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Αυτό αποδεικνύεται από την αύξηση των ερευνητικών εργασιών και των πιλοτικών εφαρμογών.

Η εφαρμογή του DT στην ναυτιλία είναι εφικτή και σε πρακτικό επίπεδο έχουν υλοποιηθεί αρκετές πρωτοβουλίες και πιλοτικά έργα όπως προαναφέρθηκε. Αυτές περιλαμβάνουν την δημιουργία ψηφιακών αντιγράφων των υποδομών και των ροών εργασίας τους για μεγάλους λιμένες (Ρότερνταμ, Σιγκαπούρη, Αμβέρσα), λειτουργίες παρακολούθησης και προσομοίωσης παρακολουθώντας την κατάσταση ενός συστήματος του πλοίου σε πραγματικό χρόνο και δοκιμάζοντας εικονικά διάφορες διαδικασίες λειτουργίας.

Η ευρεία εφαρμογή της τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τεχνολογική ετοιμότητα του τομέα, την συνδεσιμότητα και την πολυπλοκότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Η πλήρης υλοποίηση DT για ένα πολύπλοκο σύστημα όπως είναι το πλοίο ή για έναν ολόκληρο στόλο αποτελεί ακόμα πρόκληση.

**Ερώτημα 7:** Ποιες προκλήσεις πρέπει να υπερκεράσει για την υιοθέτησή του;

Η μελέτη της βιβλιογραφίας ανέδειξε πως μολονότι υπάρχουν πολλά και σημαντικά οφέλη από την εφαρμογή των DT, υπάρχουν και κρίσιμες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν ώστε να ενσωματωθεί η τεχνολογία στον κλάδο της ναυτιλίας. Οι σημαντικότερες είναι:

- Κουλτούρα και έλλειψη ψηφιακών δεξιοτήτων
- Κόστος ανάπτυξης και συντήρησης της τεχνολογίας
- Ωριμότητα της τεχνολογίας που υποστηρίζει την εφαρμογή των DT



- Έλλειψη κοινών προτύπων και διαλειτουργικότητας
- Ζητήματα ιδιοκτησίας δεδομένων και πρόσβασης σε αυτά
- Κυβερνοασφάλεια
- Δημιουργία κοινού πλαισίου από διεθνείς οργανισμούς και νηογνώμονες

**Ερώτημα 8:** Πώς μπορεί να αξιοποιήσει η ναυτιλιακή κοινότητα την αναδυόμενη τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου;

Η βιομηχανία της ναυτιλίας μπορεί να αποκομίσει πολλά οφέλη από την υιοθέτηση των DT. Οι κύριοι τομείς αξιοποίησης είναι:

- Βελτιστοποίηση επιχειρησιακών λειτουργιών και διαχείριση στόλου με παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης και της απόδοσης κάθε πλοίου.
- Βελτιωμένη λήψη αποφάσεων για τα δρομολόγια, την ταχύτητα πλεύσης, την κατανάλωση καυσίμου.
- Προγνωστική συντήρηση μειώνοντας τους χρόνους εκτός λειτουργίας.
- Ενίσχυση στην ανάπτυξη και την λειτουργία των αυτόνομων σκαφών.
- Ενίσχυση της ναυπηγίας με διαχείριση της πολυπλοκότητας και ελαχιστοποίηση του χρόνου παράδοσης.
- Βελτιστοποίηση των λιμενικών και εφοδιαστικών διαδικασιών.

Όλα τα παραπάνω προσφέρουν στο τομέα καλύτερη επισκόπηση και επίγνωση της κατάστασης με πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις και πιο ευέλικτες και αποδοτικές επιχειρήσεις.

## 9.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία καταδεικνύει ότι τα DT αποτελούν μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της ναυτιλίας. Η μελέτη της βιβλιογραφίας και των εφαρμογών υποδεικνύει ότι η τεχνολογία έχει εξελιχθεί πέραν της θεωρητικής έρευνας και μεταβαίνει στη φάση της πρακτικής εφαρμογής, ωστόσο σε περιορισμένη κλίμακα.

Η απουσία ενός ενιαίου ορισμού δεν δείχνει να αναβάλλει την αναγνώριση ότι τα DT είναι ένα δυναμικό ψηφιακό αντίγραφο του φυσικού αντικειμένου, το οποίο είναι ικανό



να αλλάζει παράλληλα με αυτό καθ’ όλη τη διάρκεια της ζωής του, προσφέροντας ανατροφοδότηση και διορθωτικές προτάσεις.

Ωστόσο, η απουσία ολοκληρωμένων βρόχων ανατροφοδότησης για την επικύρωση των των τεχνολογιών συμπεριλαμβανομένου και του DT και των δυνατοτήτων που προσφέρουν, υπάρχει η πιθανότητα να αναβάλλεται η υιοθέτησή τους και κατά συνέπεια και τα πιθανά μακροπρόθεσμα οφέλη της εφαρμογής τους.

Η καθολική και αποτελεσματική χρήση της τεχνολογίας βασίζεται στις ταυτόχρονες εξελίξεις στους τομείς της τεχνολογίας, της οργάνωσης, των νομοθετικών ρυθμίσεων, της κουλτούρας και της αποδοχής από τους ενδιαφερόμενους.

### 9.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Οι μελλοντικές έρευνες και πρωτοβουλίες σχετικά με την εφαρμογή της αναφερόμενης τεχνολογίας στην ναυτιλία θα πρέπει να εστιάσει στα θέματα που περιγράφονται παρακάτω:

- **Τυποποίηση αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων:** Είναι σημαντικό να θεσπιστούν ενιαία πρότυπα προκειμένου να διασφαλιστεί η συμβατότητα μεταξύ των συστημάτων και των πλατφορμών. Οι οργανισμοί όπως ο ISO και οι νηογνώμονες θα πρέπει σε συνεργασία να ορίσουν ρητά τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, ώστε να μειωθεί ο κίνδυνος οι ενδιαφερόμενοι να προβούν σε επενδύσεις πάνω σε ασύμβατα συστήματα.
- **Επικύρωση και πιστοποίηση μοντέλων:** Απαιτείται περισσότερη έρευνα και όχι μόνο ιδιωτικές πρωτοβουλίες και οδηγίες από τους νηογνώμονες, σχετικά με τις μεθοδολογίες επικύρωσης και επαλήθευσης αλγορίθμων κυρίως αυτών που βασίζονται στην μηχανική μάθηση, ούτως ώστε να τα μοντέλα να είναι πιστοποιήσιμα ότι θα λειτουργήσουν για τον σκοπό που προορίζονται.
- **Διαχείριση δεδομένων, διαλειτουργικότητα και κυβερνοασφάλεια:** Προτεραιότητα για μελλοντική έρευνα πρέπει να αποτελέσει και η διαχείριση του τεράστιου όγκου δεδομένων που παράγεται από την ναυτιλία, καθώς επίσης και η διασφάλιση ασφαλούς ανταλλαγής, ώστε να μην εκτίθενται σε κυβερνοεπιθέσεις. Επιπλέον, προτείνεται ανάπτυξη ανοικτών προτύπων διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (API) και ανταλλαγής δεδομένων



ώστε οι πλατφόρμες DT διαφορετικών κατασκευαστών (πλοίου, μηχανής, αισθητήρων) να μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες απρόσκοπτα.

- **Μελέτη και αξιολόγηση κόστους – οφέλους:** Συνίσταται η διεξαγωγή μακροπρόθεσμων μελετών κόστους-οφέλους για την αξιολόγηση αποτελεσμάτων σε σχέση με το κόστος επένδυσης και συντήρησης της τεχνολογίας σε νέα και υφιστάμενα πλοία. Αυτό κρίνεται απαραίτητο, δεδομένου ότι στη ναυτιλία μεγάλο μέρος των περιουσιακών στοιχείων είναι παρωχημένης τεχνολογίας και χρήζουν αναβάθμισης ώστε να ανταπεξέλθουν στο νέο ανταγωνιστικό και απαιτητικό σε σχέση με τους κανονισμούς περιβάλλον.
- **Ανθρώπινος παράγοντας:** Για να είναι εφικτή η ολιστική εφαρμογή της τεχνολογίας προτείνεται η δημιουργία ενός νέου πλαισίου κατάρτισης των χρηστών της τεχνολογίας είτε σε ξηρά είτε επί του πλοίου. Επιπλέον, θα πρέπει να διερευνηθεί ο αντίκτυπος του ψηφιακού μετασχηματισμού στους ρόλους και στις διαδικασίες σε όλα τα επίπεδα αλλά κυρίως στους υπευθύνους λήψης αποφάσεων καθώς αυτοί καλούνται να λάβουν αποφάσεις με βάση μια νέα συνθήκη που λέγεται «βάσει δεδομένων». Ωστόσο αυτό μπορεί να εγείρει θέματα ηθικής και νομοθεσίας γύρω από την τεχνολογία DT καθώς πώς καταμερίζονται οι ευθύνες αν ένα DT δώσει λανθασμένη πρόβλεψη και κατ' επέκταση λανθασμένη απόφαση;

Εν κατακλείδι κάθε μελλοντική έρευνα θα πρέπει να έχει μια ολιστική και συνεργατική προσέγγιση που δεν θα περιορίζεται μόνο στην τεχνολογική βελτίωση αλλά θα εξετάζονται και τα απαραίτητα πρότυπα, η επιχειρηματική αξία, η εμπιστοσύνη στην νέα τεχνολογία λαμβάνοντας υπόψιν τις ηθικές προκλήσεις που μπορεί να προκύψουν από την αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων.

Μέσα από στοχευμένες και προσεκτικές ενέργειες το DT μπορεί να αποτελέσει βασικό εργαλείο για τις σύγχρονες ναυτιλιακές προκλήσεις, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ της τρέχουσας κατάστασης και της πλήρους αξιοποίησης των δυνατοτήτων του.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

**A1 Digital OPC UA: Open communication for industry.** Available at: <https://www.a1.digital/knowledge-hub/opc-ua-the-communication-standard-for-industry/> (Accessed: 10 Ιανουαρίου 2026).

**A3 Association for Advancing Automation (2025) Your Legacy Equipment Can Still Get You to Digital Transformation.** Available at: <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/legacy-equipment-digital-transformation> (Accessed: 22 Νοεμβρίου 2025).

**ABS (2018) Guidance Notes on Smart Function Implementation.** ABS, November 2018. Available at: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/304-gn-smartfunctionimplementation-2018/smart-functions-gn-nov18.pdf> (Accessed: 22 Νοεμβρίου 2025)

**ABS (2023) Guide for Cybersecurity Implementation for the Marine and Offshore Industries.** Houston, TX: ABS. Available at: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/307\\_cybersecurity\\_implementation\\_2023/Pub307\\_Cybersecurity\\_Implementation\\_Guide\\_2023.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/307_cybersecurity_implementation_2023/Pub307_Cybersecurity_Implementation_Guide_2023.pdf) (Accessed: 22 Νοεμβρίου 2025).

**ABS (2024) Guidance Notes on Verification and Validation of Models, Simulations, and Digital Twins.** Houston, TX: ABS. Available at: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/design\\_and\\_analysis/348-guidance-notes-on-verification-and-validation-of-models,-simulations,-and-digital-twins-2024/348-vandv-gn-nov24.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/design_and_analysis/348-guidance-notes-on-verification-and-validation-of-models,-simulations,-and-digital-twins-2024/348-vandv-gn-nov24.pdf) (Accessed: 22 Νοεμβρίου 2025).

**(ABS) (2025) ABS launches EagleTwin™ – real-time 3D digital comprehensive life-cycle management tool.** Available at: <https://pressreleases.eagle.org/news/abs-launches-eagletwin-real-time-3d-digital-comprehensive-life-cycle-management-tool> (Accessed: 31 Ιανουαρίου 2026).

**ABS (2025) Guide for Smart Functions for Marine Vessels and Offshore Units.** Houston, TX: ABS. Available at: <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/307-guide-for-smart-functions-for-marine-vessels-and-offshore-units-2025/307-smart-guide-jan25.pdf> (Accessed: 25 Νοεμβρίου 2025).

**Airbus (2025) Digital twins: accelerating aerospace innovation from design to operations.** Available at: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2025-04-digital-twins-accelerating-aerospace-innovation-from-design-to-operations> (Accessed: 5 Φεβρουαρίου 2026).

**Aivaliotis, P., Georgoulas, K., Arkouli, Z. and Makris, S. (2019) Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance.** *Procedia CIRP*, 81, pp. 417–422. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.072>.

**Akpan, F., Bendiab, G., Shiaeles, S., Karamperidis, S. and Michaloliakos, M. (2022) Cybersecurity challenges in the maritime sector.** *Network*, 2(1), pp.123–138. [doi:10.3390/network2010009](https://doi.org/10.3390/network2010009).



**Alcaraz, C. and López, J.** (2022) Digital Twin: A comprehensive survey of security threats. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(3), pp.1475-1503. [doi:10.1109/COMST.2022.3171465](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3171465).

**Alexiou, K., Pariotis, E.G., Leligou, H.C. & Zannis, T.C.** (2022) Towards data-driven models in the prediction of ship performance (speed–power) in actual seas: A comparative study between modern approaches. *Energies*, 15(16), article 6094. [doi:10.3390/en15166094](https://doi.org/10.3390/en15166094).

**Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M. and Ayyash, M.** (2015) Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), pp. 2347–2376. [doi:10.1109/COMST.2015.2444095](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095).

**Alguirat, I., Lehyani, F. and Zouari, A.** (2025) Digital twins in supply chain management: a review of their role in boosting operational efficiency. *Business Process Management Journal*. Available at: <https://www.emerald.com/bpmj/article/doi/10.1108/BPMJ-02-2025-0147/1277451/Digital-twins-in-supply-chain-management-a-review> (Accessed: 25 Νοεμβρίου 2025).

**Almeaided, S., Al-Rubaye, S., Tsourdos, A. and Avdelidis, N.P.** (2021) Digital Twin Analysis to Promote Safety and Security in Autonomous Vehicles. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(1), pp.40–46. [doi:10.1109/MCOMSTD.011.2100004](https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.011.2100004).

**AltexSoft** (2025) Digital twins: Technology, use cases, and implementation tips. Available at: <https://www.altexsoft.com/blog/digital-twins/> (Accessed: 2 Φεβρουαρίου 2025).

**An, N.Y., Yang, J.H., Song, E., Hwang, S.-H., Byun, H.-G. and Park, S.** (2024) Digital Twin-Based Hydrogen Refueling Station (HRS) Safety Model: CNN-Based Decision-Making and 3D Simulation. *Sustainability*, 16(21), p. 9482. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16219482>.

**Andrade, M., Lepikson, H. and Machado, C.** (2021) A new framework and methodology for digital twin development. In: *2021 IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, pp. 134–138. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529701>.

**Anyfantis, K.N.** (2021) An abstract approach toward the structural digital twin of ship hulls: a numerical study applied to a box girder geometry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 235(3), pp. 718–736. [doi:10.1177/1475090221989188](https://doi.org/10.1177/1475090221989188).

**Armanes, D.** (2025) Requirements Gathering and Digital Twin (DT) enabled Decision Support System (DSS) Functional Specifications. *TwinShip Deliverable D1.1, Version 2.0, Horizon Europe Grant Agreement No. 101192583, UiT The Arctic University of Norway (lead author)*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/391275495\\_Requirements\\_Gathering\\_and\\_Digital\\_Twin\\_DT\\_enabled\\_Decision\\_Support\\_System\\_DSS\\_Functional\\_Specifications](https://www.researchgate.net/publication/391275495_Requirements_Gathering_and_Digital_Twin_DT_enabled_Decision_Support_System_DSS_Functional_Specifications) (Accessed: 28 Ιανουαρίου 2026).



- Assani, N., Matic, P. and Katalinić, M.** (2022) Ship’s Digital Twin—A Review of Modelling Challenges and Applications. *Applied Sciences*, 12(12), Article number 6039. [doi:10.3390/app12126039](https://doi.org/10.3390/app12126039).
- Attaran, M. and Celik, B.** (2023) Digital twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. *Decision Analytics Journal*, 6, 100165. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100165>.
- Augustine, P.** (2020) The industry use cases for the Digital Twin idea. *Advances in Computers*, 117, pp. 79–105. In: Raj, P. and Evangeline, P. (eds.) *The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases*. Elsevier. [doi:10.1016/bs.adcom.2019.10.008](https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2019.10.008).
- Autiosalo, J., Vepsäläinen, J., Viitala, R. & Tammi, K.** (2020) A Feature-Based Framework for Structuring Industrial Digital Twins. *IEEE Access*, 8, pp. 1193–1208. [doi:10.1109/ACCESS.2019.2950507](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950507).
- Banica, L. and Stefan, C.** (2019) Stepping into the Industry 4.0: The digital twin approach. *Annals of Dunarea de Jos University of Galati. Fascicle I. Economics and Applied Informatics*, 25, pp. 107–113. <https://doi.org/10.35219/eai1584040962>.
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E. & Fogli, D.** (2019) A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications. *IEEE Access*, 7, pp. 167653–167671. [doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499).
- Baum-Talmor, P. and Kitada, M.** (2022) Industry 4.0 in shipping: Implications to seafarers' skills and training. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 13, p.100542. [doi:10.1016/j.trip.2022.100542](https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100542).
- Bekker, A.** (2018) Exploring the blue skies potential of digital twin technology for a polar supply and research vessel. In: *Proceedings of the 13th International Marine Design Conference (Marine Design XIII)*, 10-14 June 2018, Helsinki, Finland, Volume 1, pp. 135–146.
- Berre, A.J. & Rødseth, Ø.J.** (2018) From digital twin to maritime data space: Transparent ownership and use of ship information. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Integrated Ship’s Information Systems & Marine Traffic Engineering Conference (ISIS-MTE)*, Berlin, Germany, 27-28 September 2018, pp. 1–8.
- Boger, T.** (2017) How digital twin technology is increasing competition, innovation. *Thought Leadership – Siemens Software Blog*, 11 August. Available at: <https://blogs.sw.siemens.com/thought-leadership/how-digital-twin-technology-is-increasing-competition-innovation/> (Accessed: 7 Ιουλίου 2022).
- Boschert, S. & Rosen, R.** (2016) Digital Twin—The Simulation Aspect. In: *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and Their Designers* (eds P. Hehenberger & D. Bradley), pp. 59–74. Springer International Publishing, Cham. [doi: 10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5).
- Botín-Sanabria, D.M., Mihaita, A.-S., Peimbert-García, R.E., Ramírez-Moreno, M.A., Ramírez-Mendoza, R.A. and Lozoya-Santos, J. de J.** (2022) Digital twin



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

technology challenges and applications: A comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>.

**Bruynseels, K., Santoni de Sio, F. and van den Hoven, J.** (2018) Digital twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. *Frontiers in Genetics*, 9, p. 31. [doi:10.3389/fgene.2018.00031](https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031).

**Bureau Veritas** (n.d.) *Digital twin: digital services*. Available at: <https://middle-east.bureauveritas.com/digital/digital-services/digital-twin> (Accessed: 6 Ιουνίου 2022).

**Bureau Veritas** (2022) *Bureau Veritas and Aras deploy digital twin pilots*, press release, 1 June. Available at: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/newsroom/bureau-veritas-and-aras-deploy-digital-twin-pilots> (Accessed: 1 Φεβρουαρίου 2026).

**Carlos, J.**, (2021) SpaceX: Enabling Space Exploration through Data and Analytics. *Digital Innovation and Transformation*. Available at: <https://d3.harvard.edu/platform-digit/submission/spacex-enabling-space-exploration-through-data-and-analytics/> (Accessed: 7 Ιουλίου 2022).

**Chen, B.Q., Videiro, P.M. and Guedes Soares, C.** (2021) Review of digital twin of ships and offshore structures. In: Soares, C.G. and Santos, T.A. (eds.) *Developments in Maritime Technology and Engineering: Proceedings of the 5th International Conference on Maritime Technology and Engineering (MARTECH 2020)*. CRC Press/Balkema, pp. 445–451. <https://doi.org/10.1201/9781003216582-50>.

**CIMAC WG20** (2025) Digital twins in the maritime industry: concepts, definitions and applications. *CIMAC Working Group 20 Guideline*, May 2025. Available at: [https://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG20/CIMAC\\_WG20\\_2025\\_Guideline\\_Digital\\_Twins\\_in\\_the\\_Maritime\\_Industry.pdf](https://www.cimac.com/cms/upload/workinggroups/WG20/CIMAC_WG20_2025_Guideline_Digital_Twins_in_the_Maritime_Industry.pdf) (Accessed: 13 Δεκεμβρίου 2025).

**ClassNK** (2018) *ClassNK Magazine No. 83*, June 2018. Available at: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/publications/Publications\\_image/classnk\\_magazine\\_no83.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/publications/Publications_image/classnk_magazine_no83.pdf) (Accessed: 5 Ιουνίου 2022).

**ClassNK** (2024) Guidelines for Cyber Resilience of Ships. *Edition July 2024. Tokyo: Nippon Kaiji Kyokai*. Available at: [https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/cybersecurity/gl\\_CyberResilienceofShips\\_202407e.pdf](https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/cybersecurity/gl_CyberResilienceofShips_202407e.pdf) (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**ClassNK** (2025) *Four new major Japanese maritime organizations join Digital Twin Project*, press release, 25 February. Available at: [https://www.classnk.or.jp/HP/en/hp\\_pressrelease.aspx?id=13042&layout=1](https://www.classnk.or.jp/HP/en/hp_pressrelease.aspx?id=13042&layout=1) (Accessed: 1 Φεβρουαρίου 2026).

**Coelho, G.E., Ribeiro, A., dos Reis, J. and Simões, C.** (2022) Industry 4.0 legacy systems integration case study. in *Proceedings of the Joint IMEKO TC11 & TC24 Hybrid Conference: Measurement for a better life*. Dubrovnik, Croatia, 16–20 October. Dubrovnik: IMEKO. [doi:10.21014/tc11-2022.08](https://doi.org/10.21014/tc11-2022.08).



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**Corso Systems** *Integrating Legacy OPC-UA Systems with MQTT and Ignition*. Available at: <https://corsosystems.com/posts/integrating-legacy-opc-ua-systems-with-mqtt> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**David, I., Shao, G., Tilbury, D., Gomes, C. & Zarkhout, B.**, (2025) Interoperability of Digital Twins: Challenges, Success Factors, and Future Research Directions. In: T. Margaria & B. Steffen (eds.), *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Specification and Verification – 12th International Symposium, ISO/ISA 2024, Proceedings*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 15223, Springer, Cham, pp.27–46. [doi:10.1007/978-3-031-75390-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-75390-9_3).

**Digital Twin Consortium** (n.d.) Definition of a Digital Twin. *Digital Twin Consortium*. Available at: <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin/> (Accessed: 25 Ιουλίου 2022).

**DIGITSENSE** (2022) *Project Description: Digital Twin of Ship Energy Systems*. Available at: <https://dightsense.gr/index.php/el/project> (Accessed: 30 Ιανουαρίου 2026).

**DNV** (n.d.) Data smart asset solutions – Digital twin. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/services/data-smart-asset-solutions-digital-twin-65556/> (Accessed: 10 Ιουλίου 2022).

**DNV GL** (2017) New WindGEMINI advances wind turbine operations. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/news/2017/new-windgemini-advances-wind-turbine-operations-104699/> (Accessed: 10 Ιουλίου 2022).

**DNV** (2019) DNV-RP-A203: Technology qualification. *Recommended Practice DNV*, Edition September 2019. Available at: <https://www.dnv.com/energy/standards-guidelines/dnv-rp-a203-technology-qualification/> (Accessed: 28 Νοεμβρίου 2025).

**DNV** (2020) Boosting wind turbine performance through structural monitoring. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/article/boosting-wind-turbine-performance-through-structural-monitoring-188016/> (Accessed: 10 Ιουλίου 2022).

**DNV** (2020) Open Simulation Platform – the next generation of digital twins. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Open-Simulation-Platform-the-next-generation-of-digital-twins/> (Accessed: 31 Ιανουαρίου 2026).

**DNV** (2024) HD Hyundai receives DNV AiP for cloud-based HiDTS digital twin system. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/news/hd-hyundai-receives-dnv-aip-for-cloud-based-hidts-digital-twin-system/> (Accessed: 31 Ιανουαρίου 2026).

**DNV** (2026) Cyber Secure notation level selector app. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/maritime-cyber-security/notation-level-selector-app/> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**DNV** (2026) How to make your digital twins a real asset. *DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/energy/services/digital-twins/> (Accessed: 21 Δεκεμβρίου 2025).

**DNV** (2026) Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook 2019. *Høvik, Norway: DNV*. Available at: <https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast/> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**DT4GS** (2023) *The Project*. DT4GS – Digital Twins for Green Shipping. Available at: <https://www.dt4gs.eu/the-project/> (Accessed: 20 Ιανουαρίου 2026).

**Edward, G., Cui, X., Jopen, A. and Liu, X.** (2025) Developing a digital twin for the ammonia fuelling system structure: A systems approach. *Open Research Europe*, 5. Available at: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.20392.1>.

**Eirado, C.R.R., Silveira, D. and Cajueiro, D.O.** (2025) Digital Twins and Network Resilience in the EU ETS: Analysing Structural Shifts in Carbon Trading. *Sustainability*, 17(15), p. 6924. Available at: <https://doi.org/10.3390/su17156924>.

**EMQ** (2023) *Bridging Modbus Data to MQTT for IIoT: A Step-by-Step Tutorial*. Available at: <https://www.emqx.com/en/blog/bridging-modbus-data-to-mqtt-for-iiot> (Accessed: 22 Νοεμβρίου 2025).

**Errandonea, I., Beltrán, S. & Arrizabalaga, S.** (2020) Digital Twin for maintenance: a literature review. *Computers in Industry*, 123, 103316. [doi:10.1016/j.compind.2020.103316](https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103316).

**European Commission** (2022) D1.1: Value-oriented Analysis in enabling Shipping Decarbonisation. *DT4GS Project Deliverable*. Available at: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e50bc962d2&appId=PPGMS> (Accessed: 7 Ιανουαρίου 2026).

**European Commission** (2021) VesselAI: Enabling maritime digitalization by extreme-scale analytics, AI and digital twins (Grant Agreement No. 957237). *CORDIS – EU Research Results*. Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/957237> (Accessed: 26 Ιανουαρίου 2026).

**European Commission (CORDIS)** (2022) Open collaboration and open Digital Twin infrastructure for Green Smart Shipping (DT4GS), Grant agreement ID 101056799, *Horizon Europe*. Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/101056799> (Accessed: 25 Ιανουαρίου 2026).

**European Commission (CORDIS)** (2025) TwinShip – Integrated Digital Twin Framework to Enable Green Ship Operations Towards Zero Emission Vessels, Grant agreement ID 101192583, *Horizon Europe*. Available at: <https://cordis.europa.eu/project/id/101192583> (Accessed: 25 Ιανουαρίου 2026).

**European Council (Consilium)** (2026) Fit for 55 package, Consilium – *EU policies*. Available at: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (Accessed: 26 Ιανουαρίου 2026).

**Falidouri, M.** (2025) Cybersecurity in maritime digital twins. MSc Thesis. *Piraeus: University of Piraeus*. Available at: <https://dione.lib.unipi.gr> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**Fonseca, I.A. and Gaspar, H.M.** (2021) Challenges when creating a cohesive digital twin ship: a data modelling perspective. *Ship Technology Research*, 68(2), pp.70–83. [doi:10.1080/09377255.2020.1815140](https://doi.org/10.1080/09377255.2020.1815140).

**Fonseca, I.A., Gaspar, H.M., de Mello, P.C. and Sasaki, H.A.U.** (2022) A standards-based digital twin of an experiment with a scale model ship. *Computer-Aided Design*, 145, p.103191. [doi:10.1016/j.cad.2021.103191](https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103191).



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**Fraguela, F., Mendizábal, F., Pérez-Canosa, J.M. and Orosa, J.A.** (2025) Data-Driven Optimization of Voith-Schneider Tug Operations: Towards a Digital Twin Framework for Port Energy Management. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(8), p. 1405. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse13081405>.

**Fuller, A., Fan, Z., Day, C. and Barlow, C.** (2020) Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE Access*, 8, pp. 108952–108971. [doi:10.1109/ACCESS.2020.2998358](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358).

**Gartner, Inc.** (2019) Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019. *Gartner*. Available at: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019> (Accessed: 4/7/2022).

**Gautam, A., Aryal, M.R., Deshpande, S., Padalkar, S., Nikolaenko, M., Tang, M. and Anand, S.** (2025) IIoT-enabled digital twin for legacy and smart factory machines with LLM integration. *Journal of Manufacturing Systems*, 80, pp. 511–523. [doi:10.1016/j.jmsy.2025.03.022](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2025.03.022).

**GE HealthCare** (n.d.) Capacity strategy powered by a Digital Twin: Digital Twin Executive Brief. *GE HealthCare*. Available at: [https://www.gehealthcare.com/-/jssmedia/gehc/us/files/products/digital-twin/gehc-cc--digital-twin-exec-brief\\_jb32164xx.pdf](https://www.gehealthcare.com/-/jssmedia/gehc/us/files/products/digital-twin/gehc-cc--digital-twin-exec-brief_jb32164xx.pdf) (Accessed: 4 Ιουλίου 2022).

**GE Aviation** (2018) GE signs digital contract with Military Sealift Command to improve mission readiness. *GE Aviation*. Available at: <https://www.geaviation.com/press-release/digital-solutions/ge-signs-digital-contract-military-sealift-command-improve-mission> (Accessed: 4 Ιουλίου 2022).

**GE Vernova** (2025) What is a digital twin? *GE Vernova Software Blog*. Available at: <https://www.governova.com/software/blog/what-digital-twin> (Accessed: 16 Νοεμβρίου 2025).

**Giering, J.E. and Dyck, A.** (2021) Maritime digital twin architecture: A concept for holistic DT in shipbuilding & shipping. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(2), pp. 75–89. [doi:10.1080/20464177.2021.1905954](https://doi.org/10.1080/20464177.2021.1905954).

**Glaessgen, E. and Stargel, D.** (2012) The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles. In: *Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Honolulu, HI, USA, American Institute of Aeronautics and Astronautics. [doi: 10.2514/6.2012-1818](https://doi.org/10.2514/6.2012-1818).

**Grigorescu, S., Trasnea, B., Cocias, T. & Macesanu, G.** (2020) A survey of deep learning techniques for autonomous driving. *Journal of Field Robotics*, 37(3), pp. 362–386. [doi:10.1002/rob.21918](https://doi.org/10.1002/rob.21918).

**González-Cancelas, N., Martínez Martínez, P., Vaca-Cabrero, J. and Camarero-Orive, A.** (2025) Optimization of Port Asset Management Using Digital Twin and BIM/GIS in the Context of Industry 4.0: A Case Study of Spanish Ports. *Processes*, 13(3), p. 705. Available at: <https://www.mdpi.com/2227-9717/13/3/705> (Accessed: 18 Ιανουαρίου 2026).

**Grand View Research, Inc.** (2025) Digital Twin Market (2026–2033) Size, Share, & Trend Analysis Report. *Grand View Research*. Available at:



<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market> (Accessed: 4/7/2022).

**Grieves, M.** (2005) Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1/2), pp. 71–84. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.

**Grieves M.** (2014) Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. *White paper*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/275211047\\_Digital\\_Twin\\_Manufacturing\\_Excellence\\_through\\_Virtual\\_Factory\\_Replication](https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication) (Accessed: 29 Αυγούστου 2022).

**Grieves, M. & Vickers, J.** (2017) Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches* (eds F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt & A. Alves), pp. 85-113. Springer International Publishing, Cham. [doi: 10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4).

**Grieves, M.** (2022) Intelligent digital twins and the development and management of complex systems. *Digital Twin*, 2, 8. <https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17574.1>.

**Guo, J. & Lv, Z.** (2022) Application of Digital Twins in multiple fields. *Multimedia Tools and Applications*, 81(19), pp. 26941–26967. [doi: 10.1007/s11042-022-12536-5](https://doi.org/10.1007/s11042-022-12536-5).

**Haag, S. and Anderl, R.** (2018) Digital twin – Proof of concept. *Manufacturing Letters*, 15, pp. 64–66. [doi: 10.1016/j.mfglet.2018.02.006](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006).

**Haan, K.** (2024) The Best Data Visualization Tools. *Forbes Advisor*, 1 November. Available at: <https://www.forbes.com/advisor/business/software/best-data-visualization-tools/> (Accessed: 10 Δεκεμβρίου 2024).

**Hand, A.** (2025) Your Legacy Equipment Can Still Get You to Digital Transformation. *Automate.org*, 9 September. Available at: <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/legacy-equipment-digital-transformation> (Accessed: 11 Ιανουαρίου 2026).

**Hassan, M., Svadling, M. & Björnell, N.** (2024) Experience from implementing digital twins for maintenance in industrial processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35(2), pp. 875–884. [doi:10.1007/s10845-023-02078-4](https://doi.org/10.1007/s10845-023-02078-4).

**Hatledal, L.I., Skulstad, R., Li, G., Styve, A. & Zhang, H.** (2020) Co-simulation as a fundamental technology for twin ships. *Modeling, Identification and Control*, 41(4), pp.297–311. [doi:10.4173/mic.2020.4.2](https://doi.org/10.4173/mic.2020.4.2).

**Hribernik, K., Rabe, L., Thoben, K.-D. and Schumacher, J.** (2006) The product avatar as a product-instance-centric information management concept. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 1, pp. 367–379. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2006.011055>.

**Hoffman, R., Friedman, P. and Wetherbee, D.** (2023) Digital Twins in Shipbuilding and Ship Operation. in Crespi, N., Drobot, A.T. and Minerva, R. (eds.) *The Digital Twin*. Cham: Springer International Publishing, pp. 799–847. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_28).

**Huang, A., Huang, M., Shao, Z., Zhang, X., Wu, D. and Cao, C.** (2019) A Practical Marine Wireless Sensor Network Monitoring System Based on LoRa and MQTT. in



2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET). IEEE, pp. 330–334. [doi:10.1109/ICET48154.2019.8839464](https://doi.org/10.1109/ICET48154.2019.8839464).

**Ibrahim, M., Rassölkin, A., Vaimann, T. and Kallaste, A.** (2022) Overview on Digital Twin for Autonomous Electrical Vehicles Propulsion Drive System. *Sustainability*, 14(2), p. 601. [doi:10.3390/su14020601](https://doi.org/10.3390/su14020601).

**Ibrion, M., Paltrinieri, N. and Rasekhi Nejad, A.** (2019) On risk of Digital Twin implementation in marine industry: Learning from aviation industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1357(1), p.012009. [doi:10.1088/1742-6596/1357/1/012009](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1357/1/012009).

**Ichimura, Y., Dalaklis, D., Kitada, M. & Christodoulou, A.** (2022) Shipping in the era of digitalization: Mapping the future strategic plans of major maritime commercial actors. *Digital Business*, 2(1), 100022. [doi:10.1016/j.digbus.2022.100022](https://doi.org/10.1016/j.digbus.2022.100022).

**Ilias, L., Tsapelas, G., Kapsalis, P., Michalakopoulos, V., Kormpakis, G., Mouzakitis, S. & Askounis, D.** (2023) Leveraging extreme scale analytics, AI and digital twins for maritime digitalization: the VesselAI architecture. *Frontiers in Big Data*, 6, 1220348. [doi:10.3389/fdata.2023.1220348](https://doi.org/10.3389/fdata.2023.1220348).

**Inmarsat** (2024) IACS Unified Requirements E26 and E27: Cyber security beyond compliance. [White paper]. London: Inmarsat. Available at: [https://www.inmarsat.com/content/dam/viasat-maritime/perspectives/documents/MBU\\_IACS\\_UR\\_E26\\_E27\\_whitepaper\\_June\\_2024.pdf](https://www.inmarsat.com/content/dam/viasat-maritime/perspectives/documents/MBU_IACS_UR_E26_E27_whitepaper_June_2024.pdf) (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**International Maritime Organization** (2020) *IMO 2020 – cutting sulphur oxide*. Available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/sulphur-2020.aspx> (Accessed: 21 Νοεμβρίου 2025).

**International Maritime Organization** (2023) *2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*. Available at: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/2023-imo-strategy-on-reduction-of-GHG-emissions-from-ships.aspx> (Accessed: 26 Ιανουαρίου 2026).

**International Maritime Organization** (2025) *IMO approves net-zero regulations for global shipping*. Available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/imo-approves-netzero-regulations.aspx> (Accessed: 21 Νοεμβρίου 2025).

**International Maritime Organization** *London Convention (LDC, LC) and London Protocol (LP)*. Available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/recycling-of-ships-and-hong-kong-convention.aspx> (Accessed: 21 Νοεμβρίου 2025).

**International Maritime Organization** *Recycling of ships and the Hong Kong Convention*. Available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/recycling-of-ships-and-hong-kong-convention.aspx> (Accessed: 21 Νοεμβρίου 2025).

**International Maritime Organization** *Member States and industry stakeholders outline their readiness - and highlight challenges - for sulphur 2020 implementation*.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

Available at: <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/24-sulphur-2020-symposium.aspx> (Accessed: 21 Νοεμβρίου 2025).

**Ismail, L., Abdelmoti, A., Basu, A., Berini, A. D. E. and Naouss, M.** (2025) A systematic review of digital twin-driven predictive maintenance in industrial engineering: taxonomy, architectural elements, and future research directions. *arXiv preprint*. Available at: <https://arxiv.org/abs/910e4b735aad501a8559415844ba4ac8> (Accessed: 25 Νοεμβρίου 2025).

**Jedermann, R., Singh, K., Lang, W. & Mahajan, P.** (2023) Digital twin concepts for linking live sensor data with real-time models. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 12(1), pp. 111–121. [doi:10.5194/jsss-12-111-2023](https://doi.org/10.5194/jsss-12-111-2023).

**Jia, H., Jiang, L. and Azevedo, P.** (2024) Green premium and the role of financial investors in sustainable investment in container shipping. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 189, p. 103658. [doi:10.1016/j.tre.2024.103658](https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103658).

**Johansen, S. S. and Nejad, A. R.** (2019) On digital twin condition monitoring approach for drivetrains in marine applications. In: *Proceedings of the ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering – OMAE2019*, Volume 10: Ocean Renewable Energy, Glasgow, Scotland, UK, American Society of Mechanical Engineers (ASME). [doi: 10.1115/OMAE2019-95152](https://doi.org/10.1115/OMAE2019-95152).

**Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J. and Hicks, B.** (2020) Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, pp. 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.

**JPT staff** (2019) Digital Twins Mature in the North Sea. *Journal of Petroleum Technology*, 71(12), pp. 41–43. Available at: <https://doi.org/10.2118/1219-0041-JPT> (Accessed: 12 Ιουλίου 2022).

**Kapteyn, M.G., Knezevic, D.J., Huynh, D.B.P., Tran, M. & Willcox, K.E.** (2020) Data-driven physics-based digital twins via a library of component-based reduced-order models. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 123(13), pp. 2986–3003. [doi:10.1002/nme.6423](https://doi.org/10.1002/nme.6423).

**Ketola, S.** (2023) Information model for combustion engines. Master's Thesis. *Seinäjoki: Seinäjoki University of Applied Sciences*. Available at: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2023121136213> (Accessed: 11 Ιανουαρίου 2026).

**Kilinc, N. U.** (2025) The Digital Twin in Autonomous Shipping: A Global and Sustainable Architectural Plan Using Aerospace Safety Principles and Multidisciplinary Design. *Research Gate*. [doi: 10.13140/RG.2.2.30581.23527](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30581.23527).

**Komianos, A.** (2018) The Autonomous Shipping Era. Operational, Regulatory, and Quality Challenges. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 12(2), pp.335–348. [doi:10.12716/1001.12.02.15](https://doi.org/10.12716/1001.12.02.15).

**Krile, S., Kezić, D. and Dimc, G.** (2013) NMEA communication standard for shipboard data architecture. *International Journal of Maritime Science & Technology (NASE MORE)*, Vol. 60 No. 3-4, pp.68–81. Available at: <https://hrcak.srce.hr/110004> (Accessed: 11 Ιανουαρίου 2026).



- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. & Sihn, W.** (2018) Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), pp. 1016–1022. [doi:10.1016/j.ifacol.2018.08.474](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474).
- Kwan, C.** (2022) How Formula 1 teams are using tech to find an advantage in a lower budget cap season. *ZDNet*. Available at: <https://www.zdnet.com/article/how-formula-1-teams-are-using-tech-to-find-an-advantage-in-a-lower-budget-cap-season/> (Accessed: 4 Ιουλίου 2022).
- Lawton, G.** (2021) 21 ways medical digital twins will transform healthcare. *VentureBeat*, 4 July. Available at: <https://venturebeat.com/business/21-ways-medical-digital-twins-will-transform-healthcare> (Accessed: 4 Ιουλίου 2022).
- Liao, R.** (2025) *Understanding IoT Gateway Protocols: From Modbus and OPC UA to MQTT*. Available at: <https://www.robustel.store/blogs/industrial-iot-blog/iot-gateway-protocols-modbus-opc-ua-mqtt> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).
- Lim, K.Y.H., Zheng, P. and Chen, C.-H. (2020) 'A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives', *Journal of Intelligent Manufacturing*. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- Lind, M., Becha, H., Watson, R. T., Kouwenhoven, N., Zuesongdham, P. & Baldauf, U.** (2020) Digital twins for the maritime sector. Available at: <https://www.smartmaritimene트워크.com/wp-content/uploads/2020/07/Digital-twins-for-the-maritime-sector.pdf> (Accessed: 20 Νοεμβρίου 2024).
- Liu, Y. K., Ong, S. K. & Nee, A. Y. C.** (2022) State-of-the-art survey on digital twin implementations. *Advances in Manufacturing*, 10(1), pp. 1–23. [doi: 10.1007/s40436-021-00375-w](https://doi.org/10.1007/s40436-021-00375-w).
- Lloyd's List** (2025) *How digital twins help shipowners cut costs and meet emissions targets*. Available at: <https://www.lloydslist.com/LL1154578/How-digital-twins-help-shipowners-cut-costs-and-meet-emissions-targets> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).
- Lloyd's Register** (2018) *LR announces data-driven compliance framework*. Available at: <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2018/lr-announces-data-driven-compliance-framework/> (Accessed: 15 Ιουνίου 2022).
- Lloyd's Register** (2020) *LR awards Digital Twin Ready AiP to HHI for gas containment tank*. Available at: <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2020/digital-twin-ready-aip-hhi-gas-containment-tank/> (Accessed: 31 Ιανουαρίου 2026).
- Lloyd's Register** (2021) *Lloyd's Register launches industry-first Artificial Intelligence Register*. [Press release]. Available at: <https://www.lr.org/en/knowledge/press-room/press-listing/press-release/2021/lloyds-register-launches-industry-first-artificial-intelligence-register/> (Accessed: 10 Ιανουαρίου 2026).
- Ludvigsen, K.B. and Smogeli, Ø.** (2018) Digital Twins for Blue Denmark. *DNV GL Maritime – Marine Cybernetics Advisory Report No. 2018-0006, Rev. A*, Danish Maritime Authority, 02 Jan 2018. Available at: <https://safety4sea.com/wp->



[content/uploads/2018/03/DMA-Digital-Twins-for-Blue-Denmark-2018\\_03.pdf](#)

(Accessed: 10 Ιουλίου 2022).

**Lv, Z., Lv, H. and Fridenfalk, M.** (2023) Digital Twins in the Marine Industry. *Electronics*, 12(9), p. 2025. Available at: <https://doi.org/10.3390/electronics12092025>.

**Madusanka, N.S., Fan, Y., Yang, S. and Xiang, X.** (2023) Digital Twin in the Maritime Domain: A Review and Emerging Trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(5), p. 1021. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmse11051021>.

**Mao, R., Li, Y., Li, G., Hildre, H. and Zhang, H.** (2025) A systematic survey of digital twin applications: Transferring knowledge from automotive and aviation to maritime industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26, pp. 1–20. <https://doi.org/10.1109/TITS.2025.3535593>.

**Maritime and Port Authority of Singapore** (2025) *Singapore advances maritime innovation with geospatial partnerships and launches Maritime Digital Twin*, press release, 26 March. Available at: <https://www.mpa.gov.sg/media-centre/details/singapore-advances-maritime-innovation-with-geospatial-partnerships-and-launches-maritime-digital-twin> (Accessed: 6 Φεβρουαρίου 2026).

**MarketsandMarkets** (2025) *Digital Twin Market Size, Share, Industry Trends Report 2030*. Available at: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**Markopoulos, E., Markopoulos, P., Nandi, A., Faraclas, J., Leontopoulos, C., Meidanis, S., Monioudis, D. and Filahtos, G.** (2024) The Impact of Digital Twins Technology in Maritime Fleet and Safety Management. In: *Accessibility, Assistive Technology and Digital Environments*, AHFE 2024 International Conference Proceedings, vol. 121, pp. 109–119. [doi:10.54941/ahfe1004619](https://doi.org/10.54941/ahfe1004619).

**Mauro, F. and Kana, A. A.** (2023) Digital twin for ship life-cycle: A critical systematic review. *Ocean Engineering*, 269, p. 113479. [doi:10.1016/j.oceaneng.2022.113479](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113479).

**Menges, D. and Rasheed, A.** (2024) Digital Twin for Autonomous Surface Vessels: Enabler for Safe Maritime Navigation. *arXiv preprint arXiv:2411.03465*. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.03465> (Accessed: 13 Ιανουαρίου 2026).

**Mihai, S., Yaqoob, M., Hung, D.V., Davis, W., Towakel, P., Raza, M., Karamanoglu, M., Barn, B., Shetve, D., Prasad, R.V., Venkataraman, H., Trestian, R. and Nguyen, H.X.** (2022) Digital twins: a survey on enabling technologies, challenges, trends and future prospects. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 24(4), pp.2255-2291. [doi:10.1109/COMST.2022.3208773](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3208773).

**Morais, D., Alves, A., Ferreira, N. & Fernandes, A.A.R.** (2018) The Digital Twin Journey. In: *Proceedings of the 6th Conference on Competitive Manufacturing – COMPIT 2018*, Porto, Portugal, 12–14 September 2018, pp. 123–134.

**Murray, J.** (2020) Why France is developing digital twins for the country's nuclear reactors. *NS Energy*, 30 December. Available at: <https://www.nsenerybusiness.com/news/nuclear-reactors-digital-twins/> (Accessed: 10 Ιουλίου 2022).



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**Mylonopoulos, F., Polinder, H. and Coraddu, A.** (2023) A Comprehensive Review of Modeling and Optimization Methods for Ship Energy Systems. *IEEE Access*, 11, pp. 32697–32707. Available at: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263719>.

**NAPA** (2024) *A practical guide to EU ETS*. Available at: <https://www.napa.fi/a-practical-guide-to-eu-ets/> (Accessed: 10 Ιανουαρίου 2026).

**Negri, E., Fumagalli, L. & Macchi, M.** (2017) A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, 11, pp. 939–948. [doi:10.1016/j.promfg.2017.07.198](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198).

**Navantia** (n.d.) Digital twin. *Navantia*. Available at: <https://www.navantia.es/en/product/digital-twin/> (Accessed: 4 Ιουλίου 2022).

**Nyngon, J.** (2025) Physics informed neural networks for maritime energy systems and blue economy innovations. *Machine Learning: Earth*, 1(1), p.011002. [doi:10.1088/3049-4753/adfe73](https://doi.org/10.1088/3049-4753/adfe73).

**Ναυτεμπορική** (2025) Προηγμένη ψηφιακή τεχνολογία από ABS και Samsung Heavy Industries, Ναυτεμπορική. Available at: <https://www.naftemporiki.gr/maritime/2036197/proigmeni-psifiaki-technologia-apo-abs-kai-samsung-heavy-industries/> (Accessed: 1 Φεβρουαρίου 2026).

**Ogundare, T.O., Ibokette, A.I., Anyebe, A.P. and During, A.D.** (2024) The economic and regulatory challenges of implementing digital twins and autonomous vessels in U.S. maritime fleet modernization. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 9(11), pp.441–448. [doi:10.38124/ijisrt/IJISRT24NOV075](https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24NOV075).

**Patera, L., Garbugli, A., Bujari, A., Scotece, D. and Corradi, A.** (2022) A Layered Middleware for OT/IT Convergence to Empower Industry 5.0 Applications. *Sensors*, 22(1), p. 190. Available at: <https://doi.org/10.3390/s22010190>.

**Persson, A.** (2020) The digital twin – unsung hero in F1 and in the smart city. *Sensative*. Available at: <https://sensative.com/the-digital-twin-unsung-hero-in-f1-and-in-the-smart-city/> (Accessed: 2 Φεβρουαρίου 2025).

**Pires, F., Cachada, A., Barbosa, J., Moreira, A.P. and Leitão, P.** (2019) Digital Twin in Industry 4.0: technologies, applications and challenges. In: *Proceedings of the 17th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Helsinki, Finland, 2019, pp.721–726. [doi:10.1109/INDIN41052.2019.8972134](https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972134).

**Port of Antwerp Bruges** (2025) *Our port in a single click | Port of Antwerp-Bruges*. Available at: <https://www.portofantwerpbruges.com/en/our-port/port-future/smart-port> (Accessed: 4 Φεβρουαρίου 2026).

**Port of Rotterdam Authority** (2023) *Port of Rotterdam Authority tests smart berth at ECT*, press release, 24 March. Available at: <https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/port-of-rotterdam-authority-tests-smart-berth-at-ect> (Accessed: 4 Φεβρουαρίου 2026).

**Port Technology Team** (2021) *PSA highlights digital twin as biggest emerging technology trend*, Port Technology International, 21 April. Available at:



<https://www.porttechnology.org/news/psa-highlights-digital-twin-as-biggest-emerging-technology-trend/> (Accessed: 19 Ιανουαρίου 2026).

**Psarommatis, F. & May, G.** (2023a) A literature review and design methodology for digital twins in the era of zerodefekt manufacturing. *International Journal of Production Research*, 61(16), pp. 5723–5743. [doi:10.1080/00207543.2022.2101960](https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2101960)

**Psarommatis, F. & May, G.** (2023b) A standardized approach for measuring the performance and flexibility of digital twins. *International Journal of Production Research*, 61(20), pp. 6923–6938. [doi:10.1080/00207543.2022.2139005](https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2139005).

**Qi, Q. and Tao, F.** (2018) Digital twin and big data towards smart manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison. *IEEE Access*, 6, pp. 3585–3593. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2793265>.

**Qi, Q., Yan, M. S., Hu, T., Anwer, N., Liu, A., Wei, Y., Wang, L. & Nee, A. Y. C.** (2021) Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, pp. 3–21. [doi: 10.1016/j.jmsy.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001).

**Rasheed, A., San, O. and Kvamsdal, T.** (2020) Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>.

**Redelinghuys, A., Basson, A. and Kruger, K.** (2019) A six-layer digital twin architecture for a manufacturing cell. In: *Service Oriented, Holonic and Multi-Agent Manufacturing Systems for Industry of the Future (SOHOMA 2018)*. Springer, pp. 412–423. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-03003-2\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-03003-2_32).

**Riesener, M., Schuh, G., Dölle, C. and Tönnies, C.** (2019) The digital shadow as enabler for data analytics in product life cycle management. *Procedia CIRP*, 80, pp. 729–734. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.083>.

**Ríos, J., Hernandez-Matias, J., Oliva, M. and Mas, F.** (2015) Product avatar as digital counterpart of a physical individual product: Literature review and implications in an aircraft. In: *Product Lifecycle Management for Digital Transformation of Industries*. IOS Press. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>.

**Rødseth, Ø.J.**, (2024) *Onboard Maritime ICT Architecture and Standards*. ISTS Report R3.1, ISTS Consortium, 22 November 2024. Available at: <https://hdl.handle.net/11250/3170761> (Accessed: 12 Ιανουαρίου 2026).

**Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D.** (2015) About the Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), pp. 567–572. [doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.141](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141).

**SAFETY4SEA** (2018a) *Stena Line to test AI technology onboard ship*. Available at: <https://safety4sea.com/stena-line-to-test-ai-technology-onboard-ship/> (Accessed: 7 Ιανουαρίου 2026).

**SAFETY4SEA** (2018b) *Stena Line eyes AI on ships to reduce fuel consumption*. Available at: <https://safety4sea.com/stena-line-eyes-ai-on-ships-to-reduce-fuel-consumption/> (Accessed: 7 Ιανουαρίου 2026).



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**SAFETY4SEA** (2019) *Stena Line AI project saves fuel on vessels*. Available at: <https://safety4sea.com/stena-line-ai-project-saves-fuel-on-vessels/> (Accessed: 7 Ιανουαρίου 2026).

**SAS** (n.d.) *Modern manufacturing's triple play: Digital twins, analytics & IoT*. Available at: [https://www.sas.com/en\\_us/insights/articles/big-data/modern-manufacturing-s-triple-play-digital-twins-analytics-iot.html](https://www.sas.com/en_us/insights/articles/big-data/modern-manufacturing-s-triple-play-digital-twins-analytics-iot.html) (Accessed: 7 Ιουλίου 2022).

**Sleich, B., Dittrich, M.-A., Clausmeyer, T., Damgrave, R., Erkoyuncu, J.A., Haefner, B., de Lange, J., Plakhotnik, D., Scheidel, W. and Wuest, T.** (2019) Shifting value stream patterns along the product lifecycle with digital twins. *Procedia CIRP*, 86, pp. 3-11. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.049>.

**Semeraro, C.** (2020) *Contribution to the formalisation of data-driven invariant modelling constructs of Cyber-Physical Systems*. Ph.D. thesis. Université de Lorraine; Politecnico di Bari. Available at: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02929708> (Accessed: 15 Ιουλίου 2022).

**Semeraro, C., Lezoche, M., Panetto, H. and Dassisti, M.** (2021) Digital twin paradigm: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 130, p. 103469. [doi:10.1016/j.compind.2021.103469](https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469).

**Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J. & Wang, L.** (2010) Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap. *NASA Office of Chief Technologist, Washington, DC*. Available at: [https://www.nasa.gov/pdf/501321main\\_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf) (Accessed: 1 Φεβρουαρίου 2023).

**Shao, G. and Helu, M.** (2020) Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements. *Manufacturing Letters*, 24, pp. 105–107. [doi:10.1016/j.mfglet.2020.04.004](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.04.004).

**Sharma, A., Kim, T.-E. and Nazir, S.** (2021) Implications of Automation and Digitalization for Maritime Education and Training. In: *Sustainability in the Maritime Domain: Towards Ocean Governance and Beyond*, A. Carpenter, T. M. Johansson and J. A. Skinner (eds), Springer International Publishing, Cham, pp. 223–233. [doi:10.1007/978-3-030-69325-1\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69325-1_11).

**Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A. & Calinescu, A.** (2022) Digital twins: State of the art theory and practice, challenges, and open research questions. *Journal of Industrial Information Integration*, 30, article 100383. [doi:10.1016/j.jii.2022.100383](https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383).

**Shengli, W.** (2021) Is human digital twin possible? *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*, 1, p. 100014. [doi:10.1016/j.cmpbup.2021.100014](https://doi.org/10.1016/j.cmpbup.2021.100014).

**Ship Universe** (2024) *Decarbonization: Navigate It or Devalue It*. Available at: <https://www.shipuniverse.com/decarbonization-navigate-it-or-devalue-it-%E2%9A%A0%E2%80%8F/> (Accessed: 7 Ιανουαρίου 2026).

**Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E.P., Qiao, Y., Murray, N. and Devine, D.** (2021) Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovations*, 4(2), p.36. [doi:10.3390/asi4020036](https://doi.org/10.3390/asi4020036).



- Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N. and Devine, D.** (2022) Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences*, 12(11), 5727. <https://doi.org/10.3390/app12115727>
- Smogeli, Ø.** (2017) Digital twins at work in maritime and energy. *Maritime Impact*, 2017(1), pp. 18–21. Hamburg: DNV GL.
- Stachowski, T.-H. & Kjeilen, H.** (2017) Holistic ship design – How to utilise a digital twin in concept design through basic and detailed design. In: *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding (ICCAS 2017)*, Singapore, 26–28 September 2017, pp. 101–110.
- Stamoulis, D.S.** (2022) Managerial Issues in the Adoption of Digital Twins by Shipping Companies in Greece. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 7(5), pp.27–31. [doi:10.24018/ejeng.2022.7.5.2879](https://doi.org/10.24018/ejeng.2022.7.5.2879).
- Stark, R. and Damerou, T.** (2019) Digital Twin. In: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. [doi: 10.1007/978-3-642-35950-7\\_16870-1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1).
- Stark, J.** (2020) Product Lifecycle Management (Volume 1): 21st Century Paradigm for Product Realisation. 4th edn. *Springer Cham*. [doi:10.1007/978-3-030-28864-8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28864-8).
- Sullivan, B.P., Arias Nava, E., Desai, S., Sole, J., Rossi, M., Ramundo, L. & Terzi, S.** (2021) Defining Maritime 4.0: Reconciling principles, elements and characteristics to support maritime vessel digitalization. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 3(1), pp. 23–36. [doi:10.1049/cim2.12012](https://doi.org/10.1049/cim2.12012).
- Tao, F. and Zhang, M.** (2017) Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, pp. 20418–20427. [doi:10.1109/ACCESS.2017.2756069](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069).
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H. & Sui, F.** (2018a) Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9-12), pp. 3563–3576. [doi: 10.1007/s00170-017-0233-1](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1).
- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y. & Nee, A. Y. C.** (2018b) Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), pp. 3935–3953. [doi: 10.1080/00207543.2018.1443229](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229).
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A. & Nee, A.Y.C.** (2019a) Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), pp. 2405–2415. [doi:10.1109/TII.2018.2873186](https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186).
- Tao, F., Zhang, M. & Nee, A.Y.C.** (2019b) Five-Dimension Digital Twin Modeling and Its Key Technologies. In: Tao, F., Zhang, M. & Nee, A.Y.C. (eds.) *Digital Twin Driven Smart Manufacturing*, Academic Press, Elsevier, pp.63–81. [doi:10.1016/B978-0-12-817630-6.00003-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817630-6.00003-5).
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L. and Nee, A.Y.C.** (2019c) Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and Industry 4.0: Correlation and comparison. *Engineering*, 5(4), pp. 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>.



**Tao, F., Xiao, B., Qi, Q., Cheng, J. and Ji, P.** (2022) Digital twin modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 64, pp. 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.06.015>.

**Technavio** (2024) Maritime AI Market Growth Analysis - *Size and Forecast 2025-2029*. Available at: <https://www.technavio.com/report/maritime-ai-market-industry-analysis> (Accessed: 7 Ιανουαρίου 2026).

**Theotokas, I.N., Lagoudis, I.N. and Raftopoulou, K.** (2024) Challenges of maritime human resource management for the transition to shipping digitalization. *Journal of Shipping and Trade*, 9, article 6. [doi:10.1186/s41072-024-00165-0](https://doi.org/10.1186/s41072-024-00165-0).

**Tijan, E., Aksentijević, S., Ivanić, K. and Jardas, M.** (2021) Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, p. 120879. [doi: 10.1016/j.techfore.2021.120879](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879).

**Transport and Logistics Middle East** (2020) DCSA establishes IoT standards for container connectivity. *Transport and Logistics Middle East*, 17 Jun 2020. Available at: <https://www.transportandlogisticsme.com/smart-sea-freight/dcsa-establishes-iot-standards-for-container-connectivity> (Accessed: 20/5/2024).

**Trauer, J., Schweigert-Recksiek, S., Engel, C., Spreitzer, K. and Zimmermann, M.** (2020) What is a digital twin? – Definitions and insights from an industrial case study in technical product development. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, pp. 757–766. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.15>.

**Tremblay, M.** (2020) The Digital Twin: The benefits of taking an incremental journey. *The Maritime Executive*, 3 Nov. Available at: <https://maritime-executive.com/editorials/the-digital-twin-the-benefits-of-taking-an-incremental-journey> (Accessed: 5 Ιουνίου 2022).

**Troupiotis-Kapeliaris, A., Zygouras, N., Kaliorakis, M., Mouzakitidis, S., Tsapelas, G., Artikis, A., Chondrodima, E., Theodoridis, Y. & Zisis, D.** (2022) Data driven digital twins for the maritime domain. *Progress in Marine Science and Technology*, 6, pp. 744–751. [doi:10.3233/PMST220087](https://doi.org/10.3233/PMST220087).

**van der Valk, H., Haße, H., Möller, F., Arbter, M., Henning, J.-L. & Otto, B.** (2020) A taxonomy of digital twins. In: *Proceedings of the 26th Americas Conference on Information Systems (AMCIS 2020)*, Salt Lake City, USA. Available at: [https://aisel.aisnet.org/amcis2020/org\\_transformation\\_is/org\\_transformation\\_is/4](https://aisel.aisnet.org/amcis2020/org_transformation_is/org_transformation_is/4) (Accessed: 20/2/2022).

**van der Valk, H., Haße, H., Möller, F. and Otto, B.** (2022) Archetypes of digital twins. *Business & Information Systems Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12599-021-00727-7>.

**Van Os, J.** (2018) The Digital Twin throughout the Lifecycle. In: *Proceedings of the 17th Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT'18)*, Pavone, Italy, 14–16 May 2018.

**Vasanthan, C. and Nguyen, D.T.** (2021) Combining Supervised Learning and Digital Twin for Autonomous Path-planning. *IFAC-PapersOnLine*, 54(16), pp. 7–15. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.066>.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**Vasilikis, N., Geertsma, R. and Coraddu, A.** (2023) A digital twin approach for maritime carbon intensity evaluation accounting for operational and environmental uncertainty. *Ocean Engineering*, 288, p. 115927. [doi:10.1016/j.oceaneng.2023.115927](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115927).

**Veracity by DNV** (2023) *ISO19847/ISO19848 Data Standards*. Available at: <https://developer.veracity.com/docs/section/datastandards/iso19847iso19848> (Accessed: 5 Ιανουαρίου 2026).

**VesselAI** (n.d.) *About VesselAI*. Available at: <https://vessel-ai.eu/index.html#home> (Accessed: 25 Ιανουαρίου 2026).

**Voas, J., Mell, P., Laplante, P. and Piroumian, V.** (2025) Security and trust considerations for digital twin technology. *NIST Internal Report (IR) 8356*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8356>.

**Voith, A.** (2025) *Integrated Simulation System Boosts Safety and Efficiency in Offshore Drilling*. Kongsberg Maritime, November 2025. Available at: [https://www.kongsberg.com/maritime/feature\\_articles/2025/11/integrated-simulation-system-boosts-safety-and-efficiency-in-offshore-drilling/](https://www.kongsberg.com/maritime/feature_articles/2025/11/integrated-simulation-system-boosts-safety-and-efficiency-in-offshore-drilling/) (Accessed 4 Ιανουαρίου 2026).

**Voorspuij, J., Schröder, M. and Becha, H.** (2020) Smart Container Project status update. *UN/CEFACT Forum 35th*, Geneva, Switzerland, October 2020. Available at: [https://unece.org/fileadmin/DAM/cefact/cf\\_forums/2020\\_October\\_Geneva/PPTs/8Oct\\_06-T-L-JVoorspuij-SmartContainer.pdf](https://unece.org/fileadmin/DAM/cefact/cf_forums/2020_October_Geneva/PPTs/8Oct_06-T-L-JVoorspuij-SmartContainer.pdf) (Accessed: 20/5/2024).

**Wang Z.** (2020) Digital Twin Technology. *Industry 4.0 - Impact on Intelligent Logistics and Manufacturing*. *IntechOpen*. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80974>.

**Wang, J., Li, X., Wang, P. & Liu, Q.** (2022) Bibliometric analysis of digital twin literature: a review of influencing factors and conceptual structure. *Technology Analysis & Strategic Management*, 36(1), pp. 166–180. [doi:10.1080/09537325.2022.2026320](https://doi.org/10.1080/09537325.2022.2026320).

**Waqas, M., Strandberg, P.E., Furunäs-Åkesson, J., Mubeen, S. and Ashjaei, M.** (2025) Bridging Legacy and Modular Automation Systems via Containerization. Master's thesis. *Mälardalen University*. Available at: <https://mdh.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1964679> (Accessed: 15 Ιανουαρίου 2026).

**Wärtsilä** (2026) *Wärtsilä R&D Simulator*. Available at: <https://www.wartsila.com/marine/products/simulation-and-training/navigational-simulators/r-and-d-simulator> (Accessed 23 January 2026).

**Wright, L. and Davidson, S.** (2020) How to tell the difference between a model and a digital twin. *Advanced Modeling and Simulation in Engineering Sciences*, 7, Article number 13. [doi:10.1186/s40323-020-00147-4](https://doi.org/10.1186/s40323-020-00147-4).

**Wu, C., Zhou, Y., Pessoa, M., Peng, Q. and Tan, R.** (2020) Conceptual digital twin modeling based on an integrated five-dimensional framework and TRIZ function model. *Journal of Manufacturing Systems*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.006>.



“Ιωάννα Δελή”,  
“ Ψηφιακό Δίδυμο Πλοίου: Σκοπός, Προκλήσεις,  
Εφαρμογές και Προοπτικές ”

**Xiao, G., Pan, L. and Lai, F.** (2025) Application, opportunities, and challenges of digital technologies in the decarbonizing shipping industry: a bibliometric analysis. *Frontiers in Marine Science*, 12, p. 1523267. Available at: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2025.1523267/full> (Accessed: 25 Νοεμβρίου 2025).

**Yang, W., Bao, X., Zheng, Y., Zhang, L., Zhang, Z., Zhang, Z. and Li, L.** (2024) A digital twin framework for large comprehensive ports and a case study of Qingdao Port. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 131(11-12), pp. 5571–5588.

**Yao, J.-F., Yang, Y., Wang, X.-C. and Zhang, X.-P.** (2023) Systematic review of digital twin technology and applications. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 6, 10. <https://doi.org/10.1186/s42492-023-00137-4>.

**Zakharov, L.A. and Derksen, L.A.** (2020) Hardware and software infrastructure of digital twin technology. *KnE Engineering*, 5(3), pp. 29–35. <https://doi.org/10.18502/keg.v5i3.6754>.

**Zhang, M., Tao, F., Huang, B., Liu, A., Wang, L., Anwer, N. and Nee, A.Y.C.** (2022) Digital twin data: methods and key technologies. *Digital Twin*, 1, p.2. [doi:10.12688/digitaltwin.17467.2](https://doi.org/10.12688/digitaltwin.17467.2).

**Zheng, Y., Yang, S. & Cheng, H.** (2018) An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), pp. 1141–1153. [doi: 10.1007/s12652-018-0911-3](https://doi.org/10.1007/s12652-018-0911-3).

**Zhou, S. W., Wu, W., Zhang, T. & Zhang, Q. Y.** (2021) Digital twin technical system for marine power systems. *Chinese Journal of Ship Research*, 16(2), pp. 151–156. [doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01858](https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01858).

**Zhou, Z., Zhang, C., Xiong, C., Chen, F. and Yang, T.** (2024) Digital Twin-Enabled Smart Maritime Logistics Management in the Context of Industry 5.0. *IEEE Access*, 12, pp. 13745–13760. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/10380310/10401169.pdf> (Accessed: 25 Νοεμβρίου 2025).

**Zhu, M., Calderon, C., Ford, A., Robson, C. and Jin, J.** (2025) Digital Twin for resilience and sustainability assessment of port facility *Sustainable and Resilient Infrastructure*, pp. 1–34. Available at: <https://doi.org/10.1080/23789689.2025.2526928>.