



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
& ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών
των Πολιτικών Μηχανικών**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΛΕΠΙΔΑΣ

Επιβλέπων : ΕΥΓΕΝΙΑ ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Ε.Δι.Π., ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος 2024

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών
των Πολιτικών Μηχανικών**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΛΕΠΙΔΑΣ

Επιβλέπων : ΕΥΓΕΝΙΑ ΑΔΑΜΟΠΟΥΛΟΥ

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Ε.ΔΙ.Π., ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Μαΐου 2024.

Αδαμοπούλου Ευγενία

Δεμέστιχας Κωνσταντίνος

Συκάς Ευστάθιος

Ε.ΔΙ.Π. Ε.Μ.Π.

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάϊος 2024

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ Ι. ΛΕΠΙΔΑΣ

Διπλωματούχος μεταπτυχιακού προγράμματος ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ της
σχολής Ηλεκτρολόγων και Μηχανικών Υπολογιστών

Copyright © Αθανάσιος-Χρήστος Λεπίδας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Υπογραφή

Λεπίδας Αθανάσιος – Χρήστος,

Αθήνα, 2024

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι τηλεπικοινωνίες αποτελούν κρίσιμο κομμάτι της εποχής και αντικείμενο έρευνας. Οι κυριότερες τάσεις του κλάδου των τηλεπικοινωνιών είναι το 5G, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η Τεχνητή Νοημοσύνη & Μηχανική Μάθηση (AI & ML) και τα Ψηφιακά Δίδυμα (ΨΔ). Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση των ΨΔ σε έργα Πολιτικών Μηχανικών. Η αρχική ιδέα του ΨΔ ανήκει στον Δρ. Grieves, ενώ στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τα ΨΔ ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους. Οι ερευνητές κατατάσσουν τα ΨΔ σε τύπους ανάλογα με τον κύκλο ζωής του προϊόντος ή με το πεδίο εφαρμογής. Τα ΨΔ σταδιακά άρχισαν να χρησιμοποιούνται από την βιομηχανία καθώς και σε πολλούς άλλους κλάδους. Στον Κατασκευαστικό Κλάδο η έρευνα για τα ΨΔ βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και υπάρχει έντονη συζήτηση που αφορά στη σχέση μεταξύ των ΨΔ, της Μοντελεποίησης Κτιριακών Πληροφοριών (BIM) και τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (CPS). Όσον αφορά το BIM είναι τρεις οι βασικές κατανοήσεις που το συσχετίζουν με τα ΨΔ. Αντίστοιχα, τα ΨΔ και τα CPS σχετίζονται με την ίδια έννοια, ενώ σε άλλες έχουν δηλωθεί ότι είναι δύο σχετικές αλλά εντελώς ξεχωριστές έννοιες. Τα Κατασκευαστικά ΨΔ ορίζονται ως ένας τρόπος για τη διαχείριση της κατασκευής, που αξιοποιεί δεδομένα και τεχνολογίες για την ανάλυση και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της παραγωγής Σε υφιστάμενες κατασκευές, οι μέθοδοι δημιουργίας του Γεωμετρικού ΨΔ χωρίζονται σε από κάτω προς τα πάνω και από πάνω προς τα κάτω. Το Ηνωμένο Βασίλειο πρότεινε την έννοια του "Εθνικού Ψηφιακού Διδύμου". Η έννοια του "εργοστασίου ψηφιακών δίδυμων" εισήχθη ώστε, να γίνει κατανοητό το τι αναμένεται κατά την εφαρμογή ΨΔ στην πράξη. Μια σύγχρονη τάση του Κατασκευαστικού Κλάδου είναι ο σχεδιασμός και η δημιουργία Έξυπνων Κτιρίων και Έξυπνων Πόλεων. Στη διαδικασία αυτή, η χρήση των ΨΔ κρίνεται αναγκαία καθώς διευκολύνουν τόσο στην ανάπτυξη όσο και στην παρακολούθηση και λειτουργία των παραπάνω. Γενικότερα, η χρήση των ΨΔ έχει πολλά πλεονεκτήματα. Ωστόσο, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση για να καθιερωθεί η εφαρμογή τους στην ευρύτερη αγορά.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ

Τηλεπικοινωνίες, Ψηφιακά Δίδυμα, IoT, BIM, CPS, Κατασκευαστικός Κλάδος, Τεχνητή Νοημοσύνη, Έξυπνες Πόλεις

ABSTRACT

Telecommunications is a critical part of the times and a subject of research. The main trends in the telecommunication industry are 5G, Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence & Machine Learning (AI & ML) and Digital Twins (DT). The purpose of this thesis is to investigate DT in Civil Engineering projects. The original concept of DT belongs to Dr. Grieves, and there are many definitions of DT in the literature depending on their scope. Researchers classify DT into types according to the product life cycle or scope of application. DTs have gradually started to be used by industry as well as in many other sectors. In the Construction Industry, the research on DT is still at an early stage and there is an intense debate concerning the relationship between DT, Building Information Modelling (BIM) and Cyber-Physical Systems (CPS). As far as BIM is concerned, there are three main understandings that relate it to DT. Similarly, DT and CPS are associated with the same concept, while others have stated that they are two related but completely separate concepts. Construction DT is defined as a way to manage construction that utilizes data and technologies to analyze and optimize design and production. In existing structures, the methods of creating Geometric DT are divided into bottom-up and top-down. The UK has proposed the concept of the 'National Digital Twin'. The concept of the "Digital Twin Factory" was introduced in order to, understand what is expected when applying DT in practice. A current trend in the Construction Industry is the design and creation of Smart Buildings and Smart Cities. In this process, the use of DT is deemed necessary as it facilitates both the development and the monitoring and operation of the above. More generally, the use of DT has many advantages. However, further investigation is needed to establish their application in the wider market.

KEY WORDS

Telecommunications, Digital Twins, IoT, BIM, CPS, Construction Industry, Artificial Intelligence, Smart Cities

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα Αδαμοπούλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε και για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν, και με βοήθησαν να ολοκληρώσω τις μεταπτυχιακές μου σπουδές.

Πίνακας Περιεχομένων

Περιεχόμενα Σχημάτων.....	11
Περιεχόμενα Πινάκων.....	13
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	14
Ελληνικές Ορολογίες.....	14
Αγγλικές Ορολογίες.....	14
1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Τηλεπικοινωνίες.....	16
1.1. Δομή της Εργασίας.....	16
1.2. Βασικές Έννοιες Τηλεπικοινωνιών.....	16
1.2.1. Ορισμός Τηλεπικοινωνιών.....	17
1.2.2. Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα.....	18
1.2.3. Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο.....	19
1.3. Ιστορική Αναδρομή.....	21
1.3.1. Αρχαία συστήματα και οπτικός τηλεγράφος.....	22
1.3.2. Ηλεκτρικός τηλεγράφος.....	22
1.3.3. Τηλέφωνο.....	22
1.3.4. Ράδιο και τηλεόραση.....	22
1.3.5. Βιντεοτηλεφωνία.....	23
1.3.6. Δορυφόροι.....	23
1.3.7. Δίκτυα Υπολογιστών και το Διαδίκτυο.....	24
1.3.8. Οι τηλεπικοινωνίες σήμερα.....	25
1.4. Σύγχρονες Τάσεις των Τηλεπικοινωνιών.....	25
1.4.1. 5G.....	26
1.4.2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων / IoT (Internet of Things).....	28

1.4.3.	Τεχνητή Νοημοσύνη & Μηχανική Μάθηση / AI & ML (Artificial Intelligence & Machine Learning).....	31
1.4.4.	Υπολογιστική Νέφους / Cloud Computing.....	33
1.4.5.	Κυβερνοασφάλεια / Cyber Security	33
1.4.6.	Ψηφιακά Δίδυμα στις Τηλεπικοινωνίες.....	34
1.5.	Σκοπός.....	34
2ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Ψηφιακά Δίδυμα.....	36
2.1.	Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin / DT).....	36
2.2.	Πλεονεκτήματα Ψηφιακών Διδύμων	44
2.3.	Τύποι Ψηφιακών Διδύμων.....	45
2.4.	Πεδία εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων.....	48
3ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Ψηφιακά Δίδυμα, BIM & CPS.....	51
3.1.	Εισαγωγή.....	51
3.2.	BIM & Ψηφιακά Δίδυμα	51
3.2.1.	Τα ΨΔ ως συνέχεια του BIM.....	52
3.2.2.	Τα ΨΔ και το BIM ως ξεχωριστές έννοιες	53
3.2.3.	Τα ΨΔ και το BIM ως συμπληρωματικές έννοιες	54
3.3.	CPS & Ψηφιακά Δίδυμα.....	54
3.4.	Σύγκριση των Ψηφιακών Διδύμων με το BIM και τα CPS.....	55
4ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Ψηφιακά Δίδυμα στον Κατασκευαστικό Κλάδο	59
4.1.	Εισαγωγή.....	59
4.2.	Δημιουργία κατασκευαστικού ΨΔ.....	60
4.2.1.	Μέθοδοι δημιουργίας.....	61
4.2.2.	Δημιουργία ΨΔ σε υφιστάμενη κατασκευή	62
4.3.	Εφαρμογές ΨΔ στον Κατασκευαστικό Κλάδο	63

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

4.3.1.	ΨΔ Φυσικών Μερών / Physical Parts DT	64
4.3.2.	Υπηρεσίες ΨΔ / DT Services	65
4.4.	Εθνικό Ψηφιακό Δίδυμο / National Digital Twin	70
4.5.	Εργοστάσιο Ψηφιακών Διδύμων / Digital Twin Factory	73
5ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Έξυπνα Κτίρια & Έξυπνες Πόλεις.....	77
5.1.	Εισαγωγή	77
5.1.1.	Έξυπνα Κτίρια	77
5.1.2.	Έξυπνες Πόλεις.....	78
5.2.	Τα Ψηφιακά Δίδυμα Έξυπνης Πόλης.....	81
5.3.	Ο ρόλος των Τηλεπικοινωνιών στα ΨΔ Έξυπνης Πόλης.....	84
5.4.	Σχεδιασμός Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης	90
5.5.	Εφαρμογές Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης.....	94
5.5.1.	Αστικός Σχεδιασμός.....	95
5.5.2.	Διαχείριση Ενέργειας	98
5.5.3.	Διαχείριση Αποβλήτων	99
5.5.4.	Σύστημα Δημόσιας Υγείας	100
5.5.5.	Διασφάλιση Ποιότητας Τροφίμων και Νερού.....	101
5.5.6.	Διαχείριση και Παρακολούθηση Υποδομών	102
5.5.7.	Διαχείριση Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης	103
5.6.	Προσομοίωση με χρήση Ψηφιακών Διδύμων	104
5.6.1.	Προσομοίωση Πλημμύρας.....	105
5.6.2.	Προσομοίωση Ανέμου.....	106
5.6.3.	Προσομοίωση Ηλιακού Φωτός	106
6ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Συμπεράσματα	108
6.1.	Ανακεφαλαίωση Διπλωματικής	108

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

6.2.	Συμπεράσματα.....	110
6.3.	Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα	113
7ο	ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Βιβλιογραφία	114
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : Το Ψηφιακό Δίδυμο της γέφυρας Clifton.....	124

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1.1 : Βασικά μέρη ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, www.polytechnichub.com , 2020.....	18
Σχήμα 1.2 : LAN vs MAN vs WAN, Networking and Telecommunications, 2009	19
Σχήμα 1.3 : Βασικές τοπολογίες δικτύων, ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, 2020	20
Σχήμα 1.4 : Ενσύρματα Μέσα Μετάδοσης, Networking and Telecommunications, 2009	21
Σχήμα 1.5 : Οι κυριότερες τάσεις των τηλεπικοινωνιών, StartUs Insights, 2023	26
Σχήμα 1.6 : Η εξέλιξη των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας, Nadeem et al., 2020.....	28
Σχήμα 1.7 : Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας IoT, Abir et al., 2021	29
Σχήμα 1.8 : Συσχέτιση ΨΔ και άλλων τεχνολογιών, Rathore et al., 2020	34
Σχήμα 1.9 : Αριθμός δημοσιεύσεων για τα ΨΔ συναρτήσει του χρόνου, Singh et al., 2021 ..	35
Σχήμα 2.1 : Κλασική προσέγγιση ΨΔ (3D – DT), Grieves, 2014	43
Σχήμα 2.2 : Διευρυμένη προσέγγιση ΨΔ (5D – DT), Tao et al., 2019.....	43
Σχήμα 2.3 : Κύκλος ζωής προϊόντος σε τέσσερις φάσεις, Grieves, 2023	45
Σχήμα 2.4 : Τύποι ΨΔ που εξαρτώνται από τον κύκλο ζωής του προϊόντος , Grieves, 2023 .	46
Σχήμα 2.5 : Εφαρμογή των τύπων ΨΔ στις φάσεις του κύκλου ζωής προϊόντος , Grieves, 2023	47
Σχήμα 2.6 : Τύποι ΨΔ στον τομέα της παραγωγής, Authena, 2022	48
Σχήμα 2.7 : Πεδία εφαρμογής ΨΔ, Qi et al., 2021	49
Σχήμα 3.1 : Εξελικτική προσέγγιση τριών επιπέδων για την ανάπτυξη ΨΔ, Boje et al., 2020	53
Σχήμα 3.2 : Βασικά μέρη ενός ΨΔ για κτήρια, Khajavi et al., 2019	54
Σχήμα 3.3 : Συσχέτιση μεταξύ των ΨΔ, CPS και IoT, Lu et al., 2020	55
Σχήμα 4.1 : Εφαρμογές των ΨΔ στον Κατασκευαστικό Κλάδο, Jiang et al., 2021.....	64
Σχήμα 4.2 : Η διασύνδεση των διάφορων ΨΔ, CDBB, 2022.....	70
Σχήμα 4.3 : Οι αρχές Gemini (The Gemini Principles), CDBB, 2022	71
Σχήμα 4.4 : Η ιδέα της “Ψηφιακά Δομημένης Βρετανίας”, CDBB, 2022.....	72
Σχήμα 4.5 : Αρθρωτή διαδικασία ανάπτυξης ενός ΨΔ, Boje et al., 2021	74
Σχήμα 4.6 : Το “Εργοστάσιο Ψηφιακού Διδύμου”, Boje et al., 2021	75
Σχήμα 5.1 : Συστατικά στοιχεία ενός Έξυπνου Κτιρίου, Qolomany et al., 2019.....	78

Σχήμα 5.2 : Βασικά χαρακτηριστικά μίας Έξυπνης Πόλης, Longzhi et al, 2018.....	80
Σχήμα 5.3 : Τα Ψηφιακά Δίδυμα ως θεμέλια μίας Έξυπνης Πόλης, Grubel et al., 2022	82
Σχήμα 5.4 : Τα τεχνολογικά μέσα και οι λειτουργίες ενός ΨΔ Έξυπνης Πόλης, Huawei, 2020	84
Σχήμα Π.1 : Η διαδικασία δημιουργίας ενός Ψ.Δ. μιας υφιστάμενης υποδομής, Prengolato et al., 2022	126
Σχήμα Π.2 : Οι τοποθετημένοι αισθητήρες στην κρεμαστή γέφυρα Clifton, Prengolato et al., 2022.....	127
Σχήμα Π.3 : Η διαδικασία δημιουργίας του Ψ.Δ. της γέφυρας Clifton, Prengolato et al., 2022	127

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Διάφοροι ορισμοί για τα ΨΔ από την βιβλιογραφία	37
Πίνακας 3.1 : Σύγκριση ΨΔ, BIM και CPS ως προς τα συστατικά τους μέρη	56
Πίνακας 3.2 : Συνοπτική σύγκριση των ΨΔ, του BIM και των CPS.....	57
Πίνακας 4.1 : Οι κατηγορίες των ΨΔ Φυσικών Μερών και το στάδιο του κύκλου ζωής του έργου	65
Πίνακας 5.1 : Οι σημαντικότερες τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε μία Έξυπνη Πόλη.....	88

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

Ελληνικές Ορολογίες

ΨΔ : Ψηφιακό Δίδυμο

TN : Τεχνητή Νοημοσύνη

MM : Μηχανική Μάθηση

ΠΨΔ : Πρότυπο Ψηφιακό Δίδυμο

ΣτΨΔ : Στιγμιότυπο Ψηφιακό Δίδυμο

ΣΨΔ : Συνολικό Ψηφιακό Δίδυμο

ΚΨΔ : Κατασκευαστικό Ψηφιακό Δίδυμο

ΓΨΔ : Γεωμετρικό Ψηφιακό Δίδυμο

ΤΠΕ : Τεχνολογίες Πληροφοριών και Επικοινωνιών

Αγγλικές Ορολογίες

DT: Digital Twin

DTP: Digital Twin Prototype

DTI: Digital Twin Instance

DTA: Digital Twin Aggregate

NDT: National Digital Twin

CDT: Construction Digital Twin

DTF: Digital Twin Factory

AECO: Architecture, Engineering, Construction & Operations

BIM: Building Information Model

CPS: Cyber Physical Systems

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

IMF: International Management Framework

GIS: Geographical Information System

HVAC: Heating, Vendilation & Air Condition

PLM: Product Lifecycle Management

ICT: Information and Communications Technologies

ITU: International Telecommunicatios Union

TCP: Transmission Control Protocol

IP: Internet Protocol

www: World Wide Web

LAN: Local Area Network

MAN: Metropolitan Area Network

WAN: Wide Area Network

IoT: Internet of Things

5G: Fifth Generation

AI: Artificial Intelligence

ML: Machine Learning

VR: Virtual Reality

AR: Augmented Reality

C – ITS: Cooperative – Intelligent Transport Systems

1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Τηλεπικοινωνίες

1.1. Δομή της Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η έρευνα για τα Ψηφιακά Δίδυμα (ΨΔ) και τον τρόπο που τα χρησιμοποιούν οι Πολιτικοί Μηχανικοί στα έργα τους, αλλά και ο ρόλος που κατέχουν οι τηλεπικοινωνίες στη δημιουργία και τη λειτουργία τους. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές έννοιες και τεχνολογίες των Τηλεπικοινωνιών, αφού αυτές αποτελούν βασικό κομμάτι για τη δημιουργία και την λειτουργία των ΨΔ. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση για την έννοια του ΨΔ. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η σχέση που έχουν τα ΨΔ με άλλες παρόμοιες τεχνολογίες που χρησιμοποιεί η κοινότητα των Αρχιτεκτόνων και Πολιτικών Μηχανικών. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους τρόπους δημιουργίας και στις εφαρμογές των ΨΔ στον Κατασκευαστικό Κλάδο. Παρουσιάζονται επίσης οι έννοιες του "Εθνικού Ψηφιακού Διδύμου" και του "Εργοστασίου Ψηφιακών Δίδυμων". Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα ΨΔ Έξυπνης Πόλης, ο ρόλος των τηλεπικοινωνιών, ο τρόπος σχεδιασμού τους αλλά και οι εφαρμογές τους στα πλαίσια λειτουργίας μίας Έξυπνης Πόλης. Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα. Τέλος στο παράρτημα γίνεται αναφορά σε μία μεθοδολογία δημιουργίας του ΨΔ της γέφυρας του Clifton.

1.2. Βασικές Έννοιες Τηλεπικοινωνιών

Η σύγχρονη εποχή είναι ιδιαίτερα συναρπαστική για τους επιστήμονες και μηχανικούς που ασχολούνται με την ανάπτυξη και αξιοποίηση των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών ή ΤΠΕ (Information and Communications Technologies / ICT). Ο όρος "Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών" αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή, την επεξεργασία, την αποθήκευση, τη διαμοίραση και τη μετάδοση πληροφοριών, ενώ διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διευκόλυνση της επικοινωνίας μεταξύ ανθρώπων και συσκευών. Οι ΤΠΕ διεισδύουν ολοένα και περισσότερο στη καθημερινή ζωή. Υπολογιστικές συσκευές που συνδέονται σε τοπικά δίκτυα ή στο Διαδίκτυο, ενσωματώνονται στις οικιακές συσκευές και στις υποδομές των "Έξυπνων Πόλεων" (smart cities). Επίσης, οι περισσότερες παραγωγικές εργασίες της βιομηχανίας

γίνονται με τη συμβολή των ΤΠΕ, ενώ διαρκώς επεκτείνουν την παρουσία τους στην υποστήριξη της διοίκησης των επιχειρήσεων αλλά και στους τομείς της πρωτογενούς παραγωγής (Δρόσος, 2015).

Η έννοια της επικοινωνίας είναι ευρεία και σύνθετη, καθώς έχει διαστάσεις σε όλα τα επίπεδα που συναντώνται στην ανθρώπινη φύση, όπως για παράδειγμα κοινωνικά, παιδαγωγικά, βιολογικά, ψυχολογικά. Κάθε φορά που εκφράζουμε μια ιδέα ή θέλουμε να μεταδώσουμε μια πληροφορία μεταξύ μας, επικοινωνούμε. Επικοινωνία, λοιπόν, είναι όλες εκείνες οι διαδικασίες που αναμειγνύονται στη μετάδοση της πληροφορίας από τον αποστολέα προς τον παραλήπτη. Οι επικοινωνίες που συμβαίνουν, όταν οι συμμετέχοντες βρίσκονται σε απομακρυσμένα σημεία αποκαλούνται τηλεπικοινωνίες, και οι εφευρέσεις σε αυτό το χώρο επιτρέπουν στους ανθρώπους όλου του κόσμου να επικοινωνούν μεταξύ τους (Δρόσος, 2015).

Οι τηλεπικοινωνίες (Telecommunications / Telecom) αποτελούν κρίσιμο και απαραίτητο κομμάτι της σημερινής εποχής, αφού καθιστούν εφικτή την επικοινωνία και τη μεταφορά και ανταλλαγή πληροφοριών σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι τηλεπικοινωνίες εδώ και πολλά χρόνια αποτελούν αντικείμενο επιστημονικής και βιομηχανικής έρευνας και καλύπτουν μια ευρεία γκάμα τεχνολογιών και μέσων, συμπεριλαμβανομένων των ενσύρματων και ασύρματων επικοινωνιακών δικτύων, των δορυφορικών συστημάτων, των οπτικών ινών και της οπτικής επικοινωνίας, της τηλεόρασης και του ραδιοφώνου, των τηλεφωνικών δικτύων, του Διαδικτύου και πολλών άλλων. Παρακάτω αναλύονται οι σημαντικότερες έννοιες που αφορούν τις τηλεπικοινωνίες.

1.2.1. Ορισμός Τηλεπικοινωνιών

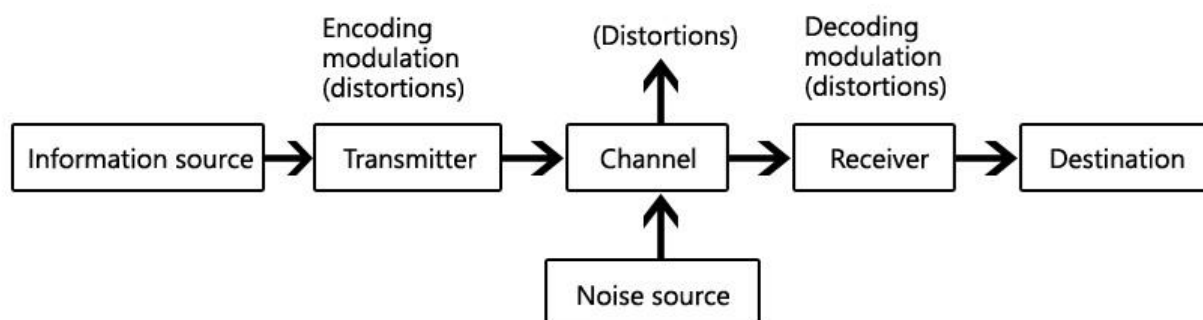
Στο βιβλίο «The worldwide history of telecommunications» του A. Huurdeman αναφέρει ότι η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union / ITU) αναγνώρισε επίσημα τον όρο τηλεπικοινωνιών το 1932 και τον όρισε ως εξής: «κάθε τηλεγραφική ή τηλεφωνική επικοινωνία σημαδιών, σημάτων, γραφών, εικόνων και ήχου οποιασδήποτε φύσης, μέσω καλωδίου, ραδιοφώνου ή άλλου συστήματος ή διαδικασίες ηλεκτρικής ή οπτικής μετάδοσης» Επί του παρόντος, η ITU ορίζει τις τηλεπικοινωνίες ως «Κάθε μετάδοση, εκπομπή ή λήψη σημάτων, σημαδιών, γραπτών, εικόνων και ήχων ή πληροφοριών οποιουδήποτε είδους μέσω καλωδίου, ραδιοφωνικών, οπτικών ή άλλων

ηλεκτρομαγνητικών συστημάτων» (Huurdean, 2003). Η διαδικασία αυτή συμπεριλαμβάνει τη μετάδοση, την αναμετάδοση και τη λήψη πληροφορίας.

1.2.2. Τηλεπικοινωνιακό Σύστημα

Ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα αναφέρεται σε μια δομή ή οργάνωση που επιτρέπει τη μεταφορά πληροφοριών από ένα σημείο σε ένα άλλο μέσω της χρήσης τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών. Ένα τυπικό τηλεπικοινωνιακό σύστημα περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία (Σχήμα 1.1) :

- i. Πηγή Πληροφοριών (Source) : Είναι το σημείο όπου παράγονται οι πληροφορίες που θέλουν να μεταδοθούν.
- ii. Πομπός (Transmitter) : Αναλαμβάνει τη μετατροπή του σήματος πληροφορίας σε μία μορφή που είναι κατάλληλη για μετάδοση μέσω του τηλεπικοινωνιακού καναλιού.
- iii. Κανάλι Μετάδοσης (Transmission Channel) : Είναι το μέσο μέσω του οποίου το σήμα μεταδίδεται από την πηγή στον προορισμό.
- iv. Δέκτης (Receiver) : Είναι το σημείο που λαμβάνει το σήμα και το μετατρέπει πίσω στη μορφή πληροφοριών που μπορούν να κατανοηθούν ή να χρησιμοποιηθούν.
- v. Προορισμός (Destination) : Είναι το σημείο όπου φτάνουν οι μεταφερόμενες πληροφορίες.
- vi. Θόρυβος (Noise) : Είναι κάθε μη επιθυμητή παρεμβολή ή διαταραχή που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα της επικοινωνίας και μπορεί να προκαλέσει παραμόρφωση, απώλεια δεδομένων, ή μειωμένη απόδοση στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα.



Σχήμα 1.1 : Βασικά μέρη ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος, www.polytechnichub.com, 2020

1.2.3. Τηλεπικοινωνιακό Δίκτυο

Ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο είναι μια συλλογή κόμβων (nodes) και συνδέσεων (links) μεταξύ συσκευών που χρησιμοποιούνται για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας. Οι κόμβοι μπορεί να είναι τηλέφωνα, υπολογιστές ή άλλες συσκευές και οι συνδέσεις μπορεί να είναι είτε ενσύρματες ή ασύρματες συνδέσεις. Παραδείγματα τηλεπικοινωνιακών δικτύων είναι τα δίκτυα υπολογιστών, το Διαδίκτυο, το δημόσιο τηλεφωνικό δίκτυο (Public Telephone Network / PTN), το παγκόσμιο δίκτυο Telex, το αεροναυτικό δίκτυο και τα ασύρματα ραδιοδίκτυα των παρόχων τηλεπικοινωνιών κινητής τηλεφωνίας (Wikipedia).

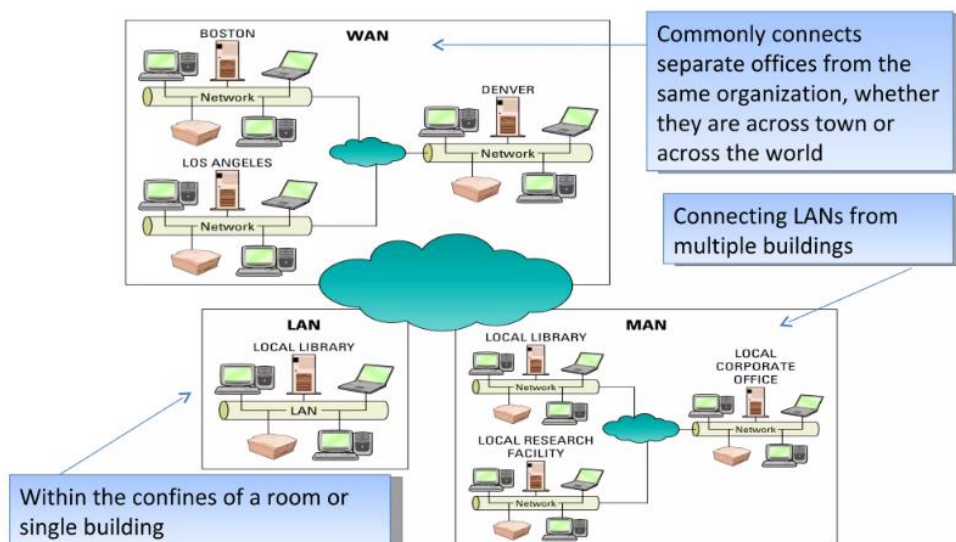
Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός δικτύου είναι τα εξής (Networking And Telecommunications, 2009) :

1. Τύποι Δικτύων :

Ανάλογα με την γεωγραφική κάλυψη που παρέχουν τα δίκτυα (Σχήμα 1.2) χωρίζονται σε :

- i. Τοπικά Δίκτυα / Local Area Networks (LAN)
- ii. Μητροπολιτικά Δίκτυα / Metropolitan Area Networks (MAN)
- iii. Δίκτυα Ευρείας Κάλυψης / Wide Area Networks (WAN)

LANs, MANs, and WANs Illustrated



Σχήμα 1.2 : LAN vs MAN vs WAN, Networking and Telecommunications, 2009

2. Αρχιτεκτονική Δικτύων :

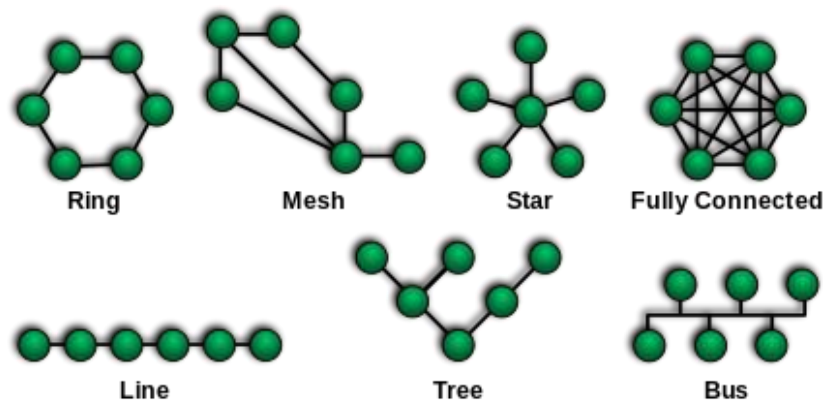
Η αρχιτεκτονική δικτύου αναφέρεται στις λεπτομέρειες υλοποίησης της διασύνδεσης, και στην τοπολογία δικτύου, δηλαδή τον τρόπο αυτό διασύνδεσης ώστε να πραγματοποιείται η ανταλλαγή δεδομένων και η επικοινωνία των υπολογιστών.

- i. Ομότιμοι Σταθμοί / Peer to Peer (P2P)
- ii. Πελάτης – Εξυπηρετητής / Client - Server

3. Τοπολογία Δικτύων :

Είναι η διάταξη των διαφόρων στοιχείων (μέσα σύνδεσης, κόμβοι, κλπ). Οι βασικές τοπολογίες είναι οι εξής (Σχήμα 1.3) :

- i. Δια σημειακή / Point - to - Point
- ii. Διαύλου / Bus
- iii. Αστέρα / Star
- iv. Δακτυλίου / Ring
- v. Κατανεμημένη / Mesh
- vi. Γραμμική / Line
- vii. Δέντρου / Tree



Σχήμα 1.3 : Βασικές τοπολογίες δικτύων, ΒΙΚΙΠΑΙΔΕΙΑ, 2020

4. Πρωτόκολλα Δικτύων :

Είναι ένα πρότυπο που καθορίζει τη μορφή των δεδομένων καθώς και τους κανόνες μετάδοσης. Μερικά από τα πιο γνωστά πρωτόκολλα δικτύων είναι τα TCP, IP, HTTP & HTTPS, DNS, Ethernet, Wi – Fi, κ.α..

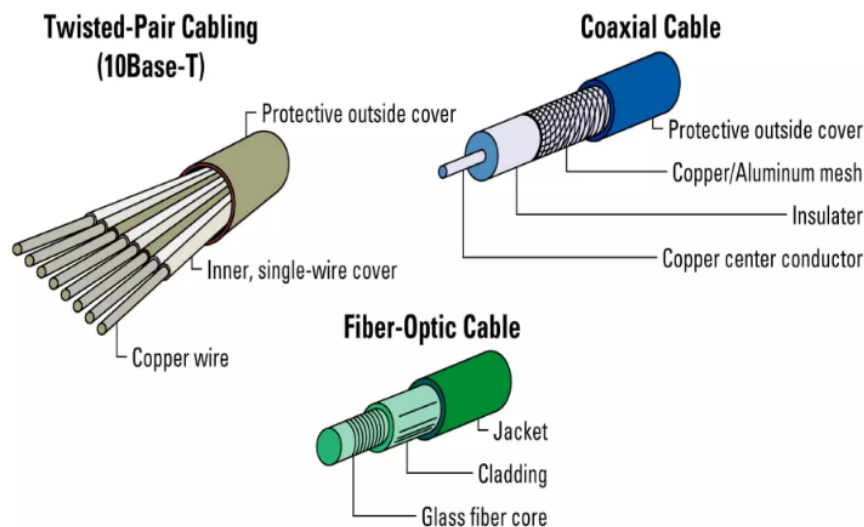
5. Μέσα Μετάδοσης :

Είναι τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την μετάδοση του σήματος στα δίκτυα.

Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες :

- i. Ενσύρματα / Wired Media (Σχήμα 1.4)
- ii. Ασύρματα / Wireless Media

Wire Media



Σχήμα 1.4 : Ενσύρματα Μέσα Μετάδοσης, *Networking and Telecommunications*, 2009

1.3. Ιστορική Αναδρομή

Από την αρχή της ανθρώπινης ύπαρξης αναπτύχθηκαν διάφορες μορφές τηλεπικοινωνιών καθώς ήταν απαραίτητη από τότε η ανάγκη για επικοινωνία από πολύ μακριά και στο λιγότερο δυνατό χρόνο. Κάθε εποχή χαρακτηρίστηκε από τους τρόπους που συντελούνταν οι τηλεπικοινωνίες. Τα σήματα καπνού, οι ήχοι των τυμπάνων και της καμπάνας και το άναμμα φωτιάς ήταν μερικοί από τους βασικούς τρόπους μεταφοράς της πληροφορίας σε κάποιες εποχές από τα προϊστορικά χρόνια μέχρι το 18ο αιώνα μ.Χ. με μικρές διαφορές και φυσικά κάθε φορά πιο εξελιγμένοι από τις προηγούμενες ανάλογα την εποχή, το λαό, τα μέσα τις ανάγκες και τους σκοπούς. Οι τρόποι αυτοί της επικοινωνίας όμως δεν ήταν ακριβείς ούτε ήταν βέβαιη η επιτυχία τους. Επιπρόσθετα η ταχύτητα μεταφοράς της πληροφορίας ήταν μικρή, ο όγκος της πληροφορίας ελάχιστος και η ασφάλειά της ελάχιστη. Αυτές οι μορφές επικοινωνίας διατηρήθηκαν μέχρι την εμφάνιση του ηλεκτρισμού. Τότε έγιναν τα πρώτα σοβαρά βήματα με

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

το τηλέφωνο και τον τηλεγράφο, για να φθάσουμε στην σημερινή μορφή της ψηφιακής τεχνολογίας, οπότε και η καθημερινή εξέλιξη στις τεχνικές των τηλεπικοινωνιών είναι αλματώδης και απρόβλεπτη (Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες, 2006). Στις επόμενες υποπαραγράφους παρατίθενται τα κυριότερα σημεία από την ιστορική αναδρομή σχετικά με την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών (Δρόσος, 2015 / Scholarly Community Encyclopedia).

1.3.1. Αρχαία συστήματα και οπτικός τηλεγράφος

Οι πρώιμες μορφές τηλεπικοινωνίας περιλάμβαναν σήματα καπνού, ηχητικά σήματα (τύμπανα), περιστέρια για μεταφορά μηνυμάτων και σεμαφόρα συστήματα. Κατά τον Μεσαίωνα, αλυσίδες φάρων χρησιμοποιούνταν συνήθως σε κορυφές λόφων ως μέσο αναμετάδοσης σήματος. Κατά τον Μεσαίωνα, αλυσίδες φάρων χρησιμοποιούνταν συνήθως σε κορυφές λόφων ως μέσο αναμετάδοσης σήματος.

1.3.2. Ηλεκτρικός τηλεγράφος

Ο πρώτος τηλεγράφος κατασκευάστηκε από τον Francis Ronalds το 1816 και χρησιμοποιούσε στατικό ηλεκτρισμό. Ο Charles Wheatstone και ο William Fothergill Cooke κατασκεύασαν έναν τηλεγράφο πέντε βελόνων και έξι καλωδίων τηλεγράφο εμπορικής χρήσης το 1838. Ο Samuel Morse ανέπτυξε τη δική του εκδοχή ηλεκτρικού τηλεγράφου το 1837 και μαζί με τον Άλφρεντ Βέλ δημιούργησαν το κώδικα Μορς, ο οποίος πλεονεκτούσε σε σχέση με το περίπλοκο σύστημα του Wheatstone, καθώς απαιτούσε μόνο δυο καλώδια.

1.3.3. Τηλέφωνο

Το ηλεκτρικό τηλέφωνο εφευρέθηκε το 1870 από τον Alexander Graham Bell. Βασιζόταν στην χρήση αρμονικών πολυσηματικών τηλεγράφων. Το 1880 ο Bell και ο Charles Sumner Tainter πραγματοποίησαν την πρώτη ασύρματη τηλεφωνική κλήση στον κόσμο μέσω διαμορφωμένων ακτινών φωτός που προβάλλονται από φωτόφωνα.

1.3.4. Ράδιο και τηλεόραση

Για αρκετά χρόνια, αρχής γενομένης από το 1894, ο Ιταλός εφευρέτης Guglielmo Marconi εργάστηκε για την προσαρμογή του νεοανακαλυφθέντος φαινομένου των ραδιοκυμάτων στις τηλεπικοινωνίες, κατασκευάζοντας το πρώτο σύστημα ασύρματης τηλεγραφίας με τη χρήση

τους. Οι ραδιοφωνικές εκπομπές με Διανόρφωση Πλάτους (Amplitude Modulation / AM) ξεκίνησαν τη δεκαετία του 1920 ενώ η ανάπτυξη της στερεοφωνικής ραδιοφωνικής μετάδοσης με Διαμόρφωση Συχνότητας (Frequency Modulation / FM) ξεκίνησε τη δεκαετία του 1930 στις Ηνωμένες Πολιτείες και τη δεκαετία του 1940 στο Ηνωμένο Βασίλειο, εκτοπίζοντας την AM ως το κυρίαρχο εμπορικό πρότυπο τη δεκαετία του 1970.

Για το μεγαλύτερο μέρος του 20ού αιώνα, οι τηλεοράσεις εξαρτώνταν από τη λυχνία καθοδικών ακτίνων (Cathode Ray Tube / CRT) που εφευρέθηκε από τον Karl Braun. Ορισμένοι από τους σημαντικότερους ερευνητές είναι οι Kenjiro Takayanagi, Philo Farnsworth, Kalman Tihanyi και Vladimir Zworykin. Το 1925, ο John Logie Baird έκανε την πρώτη επίδειξη μετάδοσης κινούμενων εικόνων. Η συσκευή του Baird βασιζόταν στον δίσκο Nipkow και έτσι έγινε γνωστή ως μηχανική τηλεόραση. Αποτελούσε τη βάση των πειραματικών εκπομπών που έκανε το British Broadcasting Corporation (BBC) από το 1929. Αργότερα μεταπήδησε από τη μηχανική τηλεόραση και έγινε πρωτοπόρος της έγχρωμης τηλεόρασης με τη χρήση λυχνιών καθοδικών ακτίνων.

1.3.5. Βιντεοτηλεφωνία

Η βιντεοτηλεφωνία επέτρεψε τη χρήση ζωντανού βίντεο μαζί με φωνή στις τηλεπικοινωνίες. Η ανάπτυξη της αυτής της τεχνολογίας ξεκίνησε για πρώτη φορά στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1920, από τον John Logie Baird και τα εργαστήρια Bell της AT&T, και εξελίχθηκε από εντατική έρευνα και πειραματισμό σε διάφορους τομείς των τηλεπικοινωνιών, όπως τον τηλεγράφο, το τηλέφωνο, το ραδιόφωνο και την τηλεόραση. Η βιντεοτηλεφωνία αναπτύχθηκε παράλληλα με τα συμβατικά τηλεφωνικά συστήματα φωνής. Μόνο στα τέλη του 20ού αιώνα, με την εμφάνιση ισχυρών κωδικοποιητών βίντεο και ευρυζωνικών συνδέσεων υψηλής ταχύτητας, έγινε μια πρακτική τεχνολογία για τακτική χρήση. Με τις ραγδαίες βελτιώσεις και τη δημοτικότητα του Διαδικτύου, έγινε ευρέως διαδεδομένη μέσω της χρήσης των τηλεδιασκέψεων και της τηλεργασίας.

1.3.6. Δορυφόροι

Ο Telstar ήταν ο πρώτος δορυφόρος επικοινωνιών που κατασκευάστηκε για εμπορική χρήση. Ανήκε στην AT&T ως μέρος μιας πολυεθνικής συμφωνίας μεταξύ της AT&T, των Bell Telephone Laboratories, της NASA, του βρετανικού Γενικού Ταχυδρομείου και του γαλλικού

Εθνικού Ταχυδρομείου για την ανάπτυξη των δορυφορικών επικοινωνιών. Εκτοξεύθηκε από τη NASA στις 10 Ιουλίου του 1962, και ήταν η πρώτη διαστημική εκτόξευση που χρηματοδοτήθηκε από ιδιώτες. Η πρώτη και ιστορικά σημαντικότερη εφαρμογή των επικοινωνιακών δορυφόρων ήταν η διηπειρωτική υπεραστική τηλεφωνία. Το τηλεφωνικό δίκτυο μεταδίδει τις κλήσεις από τα σταθερά τηλέφωνα σε έναν επίγειο σταθμό, όπου στη συνέχεια μεταδίδονται σε ένα δορυφορικό πιάτο λήψης μέσω ενός δορυφόρου σε γήινη τροχιά. Αφού καθιερώθηκε η εμπορική υπεραστική τηλεφωνική υπηρεσία μέσω επικοινωνιακών δορυφόρων, ένα πλήθος άλλων εμπορικών τηλεπικοινωνιών προσαρμόστηκαν επίσης σε παρόμοιους δορυφόρους από το 1979, συμπεριλαμβανομένων των κινητών δορυφορικών τηλεφώνων, του δορυφορικού ραδιοφώνου, της δορυφορικής τηλεόρασης και της δορυφορικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο. Η πρώτη προσαρμογή για τις περισσότερες τέτοιες υπηρεσίες έγινε τη δεκαετία του 1990.

1.3.7. Δίκτυα Υπολογιστών και το Διαδίκτυο

Οι πρώτες εξελίξεις στα δίκτυα υπολογιστών μπορούν να εντοπιστούν στη δεκαετία του 1950, όταν πρωτοεμφανίστηκαν οι κεντρικοί υπολογιστές. Το ARPANET στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Και ήταν το πρώτο δίκτυο που χρησιμοποίησε την μεταγωγή πακέτων, μια θεμελιώδη έννοια της σύγχρονης δικτύωσης. Το ARPANET έθεσε τα θεμέλια για την ανάπτυξη του Διαδικτύου. Στη δεκαετία του 1970 αναπτύχθηκε το Ethernet, μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνολογία LAN (Local Area Network) ενώ παράλληλα, εισήχθησαν το Πρωτόκολλο Ελέγχου Μετάδοσης (Transmission Control Protocol / TCP) και το Πρωτόκολλο Διαδικτύου (Internet Protocol / IP), που αποτέλεσαν τη βάση για τη σύγχρονη σουίτα πρωτοκόλλων Διαδικτύου (TCP/IP). Τη δεκαετία του 1990 εισήχθη ο Παγκόσμιος Ιστός (World Wide Web / WWW) και από τότε παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση της εμπορικής χρήσης του Διαδικτύου. Η δεκαετία του 2000 σηματοδότησε την ευρεία υιοθέτηση των ευρυζωνικών συνδέσεων στο Διαδίκτυο, προσφέροντας υψηλότερες ταχύτητες και βελτιωμένη προσβασιμότητα. Οι ασύρματες τεχνολογίες, όπως το Wi-Fi, επικράτησαν, επιτρέποντας στους χρήστες να συνδέονται σε δίκτυα χωρίς φυσικά καλώδια.

1.3.8. Οι τηλεπικοινωνίες σήμερα

Οι τηλεπικοινωνίες σήμερα χρησιμοποιούν μια ποικιλία είτε υπάρχουσων τεχνολογιών που εξελίσσονται ή καινούργιων που αναπτύσσονται, για να καλύψουν τις αυξανόμενες απαιτήσεις. Η ευρεία υιοθέτηση του διαδικτύου υψηλής ταχύτητας (Broadband) διευκολύνει την πρόσβαση σε γρηγορότερες και πιο αξιόπιστες συνδέσεις στο διαδίκτυο, προωθώντας την ανάπτυξη διαδικτυακών υπηρεσιών, ροής πολυμέσων και ηλεκτρονικού εμπορίου. Η τεχνολογία VoIP (Voice over Internet Protocol) επιτρέπει στις φωνητικές κλήσεις να μεταδίδονται μέσω του διαδικτύου αντί για τις παραδοσιακές τηλεφωνικές γραμμές. Υπηρεσίες όπως Skype, WhatsApp και Zoom έχουν γίνει δημοφιλείς εναλλακτικές για τις παραδοσιακές τηλεφωνικές κλήσεις, προσφέροντας χαμηλότερο κόστος και επιπλέον χαρακτηριστικά. Οι προηγμένες τεχνολογίες δορυφόρου βελτιώνουν την ταχύτητα, την κάλυψη και την αξιοπιστία των υπηρεσιών επικοινωνίας και παίζουν κρίσιμο ρόλο στην παροχή σύνδεσης σε απομακρυσμένες περιοχές. Στα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας μετάβαση από το 2G στο 3G και στη συνέχεια στα 4G και 5G έχει φέρει γρηγορότερες ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων, μικρότερες καθυστερήσεις και μεγαλύτερη χωρητικότητα. Η ανάπτυξη των δικτύων οπτικών ινών έχει αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα, το εύρος κάλυψης και τη χωρητικότητα σε σχέση με το υπάρχοντα δίκτυα. Τέλος η ανάπτυξη των Έξυπνων Τηλεφώνων και γενικότερα Συσκευών έχει μετασηματίσει τον τρόπο που οι άνθρωποι επικοινωνούν, έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες και αλληλεπιδρούν με την τεχνολογία, διότι συνδυάζουν τηλεφωνία με υπολογιστική ισχύ, σύνδεση στο διαδίκτυο και μια ευρεία γκάμα εφαρμογών.

1.4. Σύγχρονες Τάσεις των Τηλεπικοινωνιών

Σήμερα, οι τηλεπικοινωνίες είναι ένας τεράστιος κλάδος των ΤΠΕ, που περιλαμβάνει τα πάντα, από την παραδοσιακή φωνητική επικοινωνία έως τη μετάδοση δεδομένων και τις κινητές εφαρμογές. Ολοένα και περισσότερος κόσμος χρησιμοποιεί προϊόντα και υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών προκειμένου να καλύψει τις ανάγκες του. Σύμφωνα με την αναφορά της Statista, η παγκόσμια αγορά τηλεπικοινωνιών αναμένεται να φτάσει τα 1,4 τρισεκατομμύρια δολάρια μέχρι το 2025. Σημαντικό ρόλο για την ανάπτυξη και την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών έχει η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος της εποχής και ο έντονος ανταγωνισμός μεταξύ των εταιριών, που καινοτομούν προσπαθώντας να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

καταναλωτών (StartUs Insights, 2023). Διαρκώς αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών, ενώ ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες επεκτείνονται και χρησιμοποιούνται από τον κλάδο με σκοπό να βελτιώνουν τις υπηρεσίες και τις δυνατότητες του.

Με μια γρήγορη αναζήτηση στο διαδίκτυο είναι εύκολο να διαπιστώσει κανείς τις τεχνολογικές τάσεις που θα αποτελέσουν το μέλλον του κλάδου των τηλεπικοινωνιών (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5 : Οι κυριότερες τάσεις των τηλεπικοινωνιών, StartUs Insights, 2023

1.4.1. 5G

Τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (Cellular Networks) είναι υποδομές επικοινωνιών που επιτρέπουν την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ κινητών τηλεφώνων, ταμπλετ, φορητών υπολογιστών και άλλων συσκευών μέσω ραδιοκυμάτων. Πρωτοεμφανίστηκαν στα τέλη του 20^{ου} αιώνα προσφέροντας αμφίδρομη επικοινωνία χρησιμοποιώντας αναλογικό σήμα (1G), και από τότε εξελίσσονται διαρκώς (Σχήμα 1.6). Το "5G" αποτελεί την πέμπτη γενιά (5th Generation) των δικτύων κινητής τηλεφωνίας και προσφέρει αρκετές τεχνολογικές βελτιώσεις σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές (Nadeem et al., 2020).

Τα βασικά χαρακτηριστικά του 5G είναι τα εξής :

Αυξημένη ταχύτητα : προσφέρει σημαντικά υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων από τις προηγούμενες γενιές, με μέγιστες ταχύτητες που φτάνουν τα 10 Gbps. Αυτό επιτρέπει ταχύτερες λήψεις, απρόσκοπτη ροή περιεχομένου υψηλής ευκρίνειας και αλληλεπιδράσεις σε πραγματικό χρόνο με χαμηλή καθυστέρηση.

Χαμηλή καθυστέρηση : το 5G μειώνει την καθυστέρηση του δικτύου σε μόλις 1 ms, παρέχοντας σχεδόν άμεση επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις.

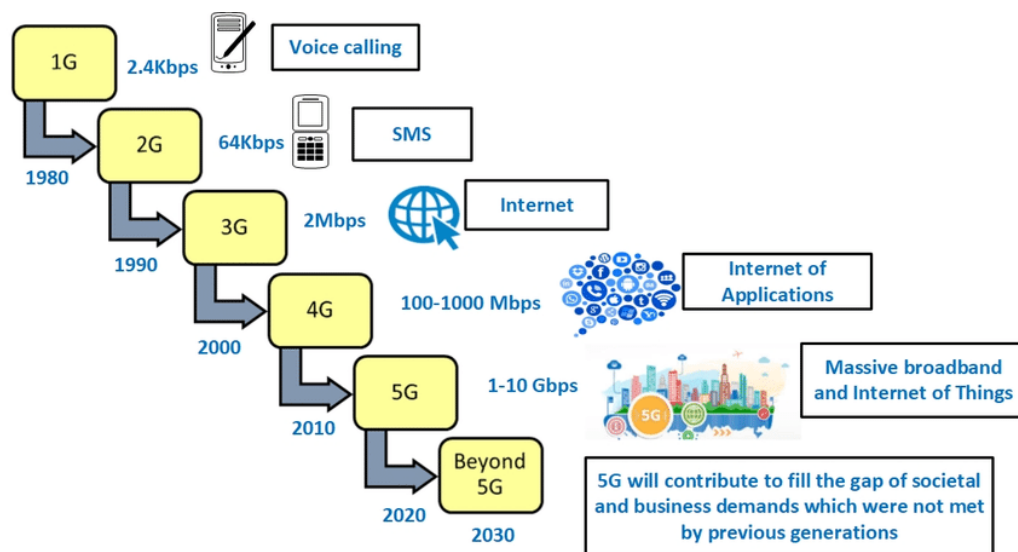
Υψηλή χωρητικότητα : υποστηρίζει τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων συσκευών ταυτόχρονα, επειδή μπορεί να χρησιμοποιεί προηγμένες ζώνες συχνοτήτων, όπως των χιλιοστομετρικών κυμάτων υψηλότερης συχνότητας, για να αυξήσει τη χωρητικότητα του δικτύου και να φιλοξενήσει τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών του IoT.

Βελτιωμένη κάλυψη : Τα δίκτυα 5G χρησιμοποιούν διάφορες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των μικρών κυψελών, του μαζικού MIMO / Multiple Input Multiple Output και της διαμόρφωσης δέσμης, για τη βελτίωση της κάλυψης και της ισχύος του σήματος επιτρέποντας την αξιόπιστη συνδεσιμότητα ακόμη και σε πολυσύχναστες και απομακρυσμένες τοποθεσίες.

Τεμαχισμός δικτύου : εισάγει την έννοια του “network slicing”, η οποία επιτρέπει στους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων να δημιουργούν πολλαπλά εικονικά δίκτυα μέσα σε μια ενιαία φυσική υποδομή. Κάθε “φέτα” δικτύου μπορεί να προσαρμοστεί ώστε να ανταποκρίνεται στις ειδικές απαιτήσεις διαφορετικών εφαρμογών, κλάδων ή ομάδων χρηστών.

Βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση : είναι πιο ενεργειακά αποδοτικές σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές μέσω της βελτιστοποιημένης αρχιτεκτονικής δικτύου, της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας του εξοπλισμού δικτύου και της ευφυούς διαχείρισης του δικτύου.

Ενεργοποίηση αναδυόμενων τεχνολογιών : Το 5G αναμένεται να αποτελέσει βασικό παράγοντα που θα επιτρέψει την ανάπτυξη αναδυόμενων τεχνολογιών (πχ αυτόνομα οχήματα, AR, VR, έξυπνες πόλεις, κλπ.) εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων, της χαμηλής καθυστέρησης και της μαζικής συνδεσιμότητας των δικτύων 5G που μπορούν να υποστηρίξουν τις απαιτήσεις αυτών των προηγμένων εφαρμογών.



Σχήμα 1.6 : Η εξέλιξη των Δικτύων Κινητής Τηλεφωνίας, Nadeem et al., 2020

1.4.2. Διαδίκτυο των Πραγμάτων / IoT (Internet of Things)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ή IoT αναφέρεται σε ένα δίκτυο συσκευών, αντικειμένων και συστημάτων που είναι συνδεδεμένα στο διαδίκτυο και μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους. Κάθε συσκευή ή αντικείμενο που συμμετέχει στο IoT είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες, επεξεργαστές και συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο, επιτρέποντας τη συλλογή, την ανταλλαγή και ανάλυση δεδομένων και τη συνεργασία με άλλες συσκευές χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία έξυπνων περιβαλλόντων και εφαρμογών με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης, της αποδοτικότητας και της καθημερινής ζωής.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας του IoT είναι τα εξής (Σχήμα 1.7) (Abir et al., 2021) :

- i. Αισθητήρες : Οι συσκευές διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες που μπορούν να μετρούν διάφορες παραμέτρους
- ii. Συνδεσιμότητα : Οι συσκευές είναι συνδεδεμένες σε δίκτυα που επιτρέπουν τη μεταξύ τους επικοινωνία.
- iii. Νοημοσύνη : Οι συσκευές του συστήματος χρησιμοποιούν ΑΙ για να επεξεργάζονται τα δεδομένα που συλλέγουν και να λαμβάνουν αποφάσεις αυτόματα.
- iv. Ασφάλεια : Λόγω του μεγάλου αριθμού συσκευών που συνδέονται είναι πολύ σημαντική η εξασφάλιση της ιδιωτικότητας και προστασίας από κακόβουλες επιθέσεις.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

- v. Επεκτασιμότητα : Η δυνατότητα του συστήματος να αυξάνεται και να προσαρμόζεται για να υποστηρίζει μεγαλύτερο αριθμό συσκευών, λειτουργιών και εφαρμογών.
- vi. Ετερογένεια : Αναφέρεται στην ποικιλία και τη διαφορετικότητα των συσκευών, των πρωτοκόλλων επικοινωνίας, των πλατφορμών και των τεχνολογιών που συμμετέχουν στο σύστημα IoT.
- vii. Δυναμική Φύση : Αναφέρεται στη συνεχή εξέλιξη, προσαρμογή και αλληλεπίδραση των συσκευών, των δικτύων και των συστημάτων IoT με το περιβάλλον τους.
- viii. Ενεργειακή απόδοση : Αναφέρεται στην προσπάθεια βελτιστοποίησης της κατανάλωσης ενέργειας από τις συσκευές και τα συστήματα που συνδέονται στο IoT.



Σχήμα 1.7 : Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας IoT, Abir et al., 2021

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και ο τομέας των τηλεπικοινωνιών συνδέονται στενά, καθώς η επιτυχία του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές για :

- i. τη Συνδεσιμότητα : οι συσκευές του IoT χρειάζονται μέσα επικοινωνίας, όπως ασύρματες τεχνολογίες (πχ Wi-Fi, Bluetooth, κλπ.) ή δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (3G, 4G, 5G) για να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν δεδομένα.

- ii. την Επεξεργασία Δεδομένων : τα δεδομένα από τις συσκευές IoT μεταφέρονται σε κεντρικά σημεία επεξεργασίας με σκοπό να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές όπως ανάλυση, πρόβλεψη, και λήψη αποφάσεων.
- iii. την Ασφάλεια των Δεδομένων : οι τηλεπικοινωνιακές υποδομές παρέχουν την δυνατότητα ασφαλούς μεταφοράς ευαίσθητων δεδομένων που συλλέγονται.
- iv. την Απομακρυσμένη Διαχείριση : η χρήση των υποδομών επιτρέπει της εξ αποστάσεως διαχείριση των συσκευών του IoT, και την αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων λειτουργίας τους, όταν αυτό είναι εφικτό.

Ο ρόλος του IoT στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών είναι ιδιαίτερα σημαντικός , αφού συμβάλλει στο μετασχηματισμό και τη βελτίωση των σύγχρονων δικτύων επικοινωνίας. Μερικά από τα στοιχεία που τονίζουν τη σημασία του είναι τα παρακάτω (Abdugafur et al., 2024) :

- Μαζική σύνδεση συσκευών: Το IoT παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης δισεκατομμυρίων συσκευών σε δίκτυα επικοινωνίας. Αυτό περιλαμβάνει έξυπνες συσκευές, αισθητήρες, ιατρικές συσκευές, έξυπνες πόλεις και άλλα.
- Ανάπτυξη της τεχνολογίας 5G: Το 5G, η πέμπτη γενιά κινητών δικτύων, είναι ένας κύριος παράγοντας για να υποστηρίξει το IoT.
- Ασφάλεια και ιδιωτικότητα: Οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών πρέπει να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν αποτελεσματικά μέτρα για την προστασία των δικτύων από κυβερνοεπιθέσεις και διαρροές πληροφοριών.
- Βελτιστοποίηση δικτύων και πόρων: Το IoT παρέχει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την πιο αποδοτική διαχείριση δικτύων και πόρων. Οι φορείς τηλεπικοινωνιών μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ανάλυση δεδομένων IoT για την βελτιστοποίηση της κίνησης, τη διαχείριση του εύρους ζώνης και την πρόληψη των διακοπών του δικτύου.
- Ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων: Το IoT δημιουργεί νέες ευκαιρίες για τις εταιρείες τηλεπικοινωνιών όσον αφορά τα επιχειρηματικά μοντέλα. Η παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών επικοινωνίας για διάφορους τομείς, όπως η υγεία, οι μεταφορές και η γεωργία, είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας.

- Ανάπτυξη Έξυπνων Πόλεων : Το IoT παίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, όπου αισθητήρες και συσκευές συλλέγουν δεδομένα για τη βελτίωση της διαχείρισης της αστικής υποδομής.
- Προηγμένες υπηρεσίες για τους τελικούς χρήστες: Το IoT καθιστά δυνατή την παροχή καινοτόμων και εξατομικευμένων υπηρεσιών στους τελικούς χρήστες, οι οποίες απαιτούν υποστήριξη από σύγχρονα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Επομένως, το IoT έχει βαθύ αντίκτυπο στις τηλεπικοινωνίες, απαιτώντας την εξέλιξή τους και την μοντερνοποίησή τους για να υποστηρίξουν αποτελεσματικά τις νέες ευκαιρίες και προκλήσεις που παρουσιάζει αυτή η τεχνολογία.

1.4.3. Τεχνητή Νοημοσύνη & Μηχανική Μάθηση / AI & ML (Artificial Intelligence & Machine Learning)

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) αναφέρεται στη δημιουργία ηλεκτρονικών συστημάτων ή προγραμμάτων που μπορούν να εκτελούν εργασίες που απαιτούν ευφυΐα, συνήθως έτσι ώστε να μιμούνται την ανθρώπινη νοημοσύνη. Ο στόχος της AI είναι να δημιουργήσει συστήματα που μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις, να εκτελούν εργασίες, και να επιλύουν προβλήματα. Για τον σκοπό αυτό, οι ερευνητές έχουν προσαρμόσει και ενσωματώσει ένα ευρύ φάσμα τεχνικών, αλγορίθμων και προσεγγίσεων, συμπεριλαμβανομένων της μαθηματικής βελτιστοποίησης, της τυπικής λογικής, των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και των μεθόδων που βασίζονται στη στατιστική, την επιχειρησιακή έρευνα και τα οικονομικά. Αντλεί επίσης από την ψυχολογία, τη γλωσσολογία, τη φιλοσοφία, τη νευροεπιστήμη και πολλά άλλα πεδία.

Η Μηχανική Μάθηση (ML) είναι η ικανότητα των προγραμμάτων και του λογισμικού να μπορούν να εκπαιδεύονται και να βελτιώσουν την απόδοσή τους σε μια δεδομένη εργασία αυτόματα προσπαθώντας να μιμηθούν την ανθρώπινη δραστηριότητα. Αποτελεί κλάδο της Τεχνητής Νοημοσύνης από την αρχή και βασίζεται στην αρχή της μάθησης μέσω παραδείγματος. Υπάρχουν διάφορα είδη ML (Taye, 2023) :

- i. Η μάθηση χωρίς επίβλεψη (Unsupervised) αναλύει μια ροή δεδομένων και βρίσκει μοτίβα και κάνει προβλέψεις χωρίς καμία άλλη καθοδήγηση.

- ii. Η μάθηση με επίβλεψη (Supervised) απαιτεί πρώτα έναν άνθρωπο να επισημάνει τα δεδομένα εισόδου.
- iii. Η μάθηση με ήμι-επίβλεψη (Semi-Supervised) χρησιμοποιεί μια τεράστια ποσότητα δεδομένων εισόδου, μερικά από τα οποία εισάγονται από έναν άνθρωπο, ενώ τα υπόλοιπα αναλύονται αυτόματα, και αποτελεί ένα ενδιάμεσο είδος της επιβλεπόμενης και της μη επιβλεπόμενης μάθησης.
- iv. Στην ενισχυτική μάθηση (Reinforcement) ανταμείβεται για τις καλές απαντήσεις και τιμωρείται για τις κακές.
- v. Η βαθιά μάθηση (Deep) είναι ένας τύπος μηχανικής μάθησης που εκτελεί εισόδους μέσω βιολογικά εμπνευσμένων τεχνητών νευρωνικών δικτύων για όλους αυτούς τους τύπους μάθησης.

Η Τεχνητή Νοημοσύνη και η Μηχανική Μάθηση υιοθετούνται γρήγορα από τον τομέα των τηλεπικοινωνιών, κάτι που επιταχύνει αυτή την ανάπτυξη του και αναμένεται να συνεχιστεί. Μπορούν να προσδιοριστούν αρκετές περιπτώσεις χρήσης της ΑΙ και της ΜΛ στη βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών και των δικτύων. Οι κυριότερες είναι οι εξής (Slimani et al., 2024) :

- Η βελτίωση της παροχής υπηρεσιών στη βιομηχανία της τηλεπικοινωνίας γίνεται δυνατή μέσω της προβλεπτικής ανάλυσης , η οποία αναλύει μεγάλες ποσότητες δεδομένων χρησιμοποιώντας πολύπλοκους αλγόριθμους και μεθόδους ΑΙ και ΜΛ για να κάνει προβλέψεις για το μέλλον βασισμένες σε ιστορικά δεδομένα.
- Οι Πάροχοι Υπηρεσιών Επικοινωνίας (Communications Service Providers / CSPs) μπορούν να χρησιμοποιήσουν την ΑΙ και ΜΛ για να προβλέπουν και να αποτρέπουν αποτυχίες και βλάβες στις υποδομές επικοινωνιών. Αναμένονται βραχυπρόθεσμες βελτιώσεις τόσο στην έρευνα αιτίας όσο και στην πρόβλεψη προβλημάτων από την αυξημένη αυτοματοποίηση. Στο μακροπρόθεσμο, αυτές οι τεχνολογίες θα υποστηρίξουν ευρύτερους στρατηγικούς στόχους, όπως η ανάπτυξη νέων εμπειριών καταναλωτών και η αποτελεσματική διαχείριση των αυξανόμενων απαιτήσεων.
- Χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες ανάλυσης της ΑΙ και της ΜΛ, η τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία καταπολεμά τα φαινόμενα απάτης, όπως η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση στο

δίκτυο και οι πλαστοί λογαριασμοί. Αυτά μπορούν να μειωθούν σημαντικά με τη βοήθεια της τεχνητής νοημοσύνης και την ικανότητα των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης να ανιχνεύουν ανωμαλίες σε πραγματικό χρόνο. Μόλις το σύστημα ανιχνεύσει απάτη, μπορεί αυτόματα να αρνηθεί την πρόσβαση στον δράστη, περιορίζοντας την ζημιά.

- Οι CSPs εξυπηρετούν εκατομμύρια συναλλαγές κάθε μέρα, που είναι επιρρεπείς σε ανθρώπινα λάθη. Το βασισμένο σε AI Robotic Process Automation (RPA) είναι ένα είδος λογισμικού που χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση διαφόρων αυτών επιχειρηματικών διαδικασιών και μειώνει τα λάθη και τον χρόνο εκτέλεσης.
- Οι πλατφόρμες συνομιλίας AI (Chatbots) είναι ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιείται η AI και η ML από την τηλεπικοινωνιακή βιομηχανία. Αυτοματοποιούν αιτήματα για βοήθεια στη ρύθμιση, τη διαμόρφωση, την επίλυση απλών προβλημάτων και τη συνήθη συντήρηση.

1.4.4. Υπολογιστική Νέφος / Cloud Computing

Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει στους χρήστες να έχουν πρόσβαση και να χρησιμοποιούν υπολογιστικούς πόρους (πχ διακομιστές, αποθηκευτικούς χώρους, βάσεις δεδομένων, δικτύωση, λογισμικό, AI κλπ.) μέσω του διαδικτύου, το οποίο συχνά αναφέρεται ως "νέφος". Αντί να κατέχουν και να συντηρούν φυσικό υλικό και υποδομές, οι χρήστες μπορούν να αξιοποιούν υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους που παρέχονται από τρίτους παρόχους. Οι υπηρεσίες αυτές φιλοξενούνται σε κέντρα δεδομένων και είναι προσβάσιμες εξ αποστάσεως μέσω του διαδικτύου. Το υπολογιστικό νέφος έχει αναδειχθεί ως μια σημαντική τάση στις τηλεπικοινωνίες. Προσφέρει μια πιο ευέλικτη, ασφαλέστερη και επεκτάσιμη επιλογή στις επιχειρήσεις, διότι με μια υποδομή που βασίζεται στο νέφος, μπορούν να επεκτείνουν και να συρρικνώσουν τους πόρους του νέφους τους ανάλογα με τη ζήτηση επιτυγχάνοντας καλύτερη οικονομική απόδοση και εμπειρία των καταναλωτών (StartUs Insights, 2023).

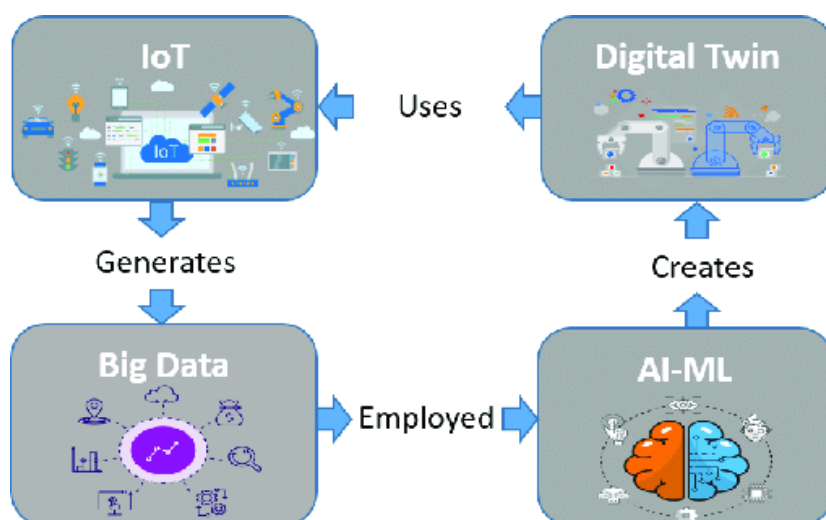
1.4.5. Κυβερνοασφάλεια / Cyber Security

Οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών διαχειρίζονται μεγάλες ποσότητες ευαίσθητων δεδομένων που αποτελούν στόχο κυβερνοεπιθέσεων. Ως εκ τούτου, η ασφάλεια αποτελεί μια εξέχουσα τάση στον κλάδο των τηλεπικοινωνιών. Γίνονται ενέργειες τόσο για την πρόληψη, όσο και

διαδικασίες αντιμετώπισης και ανάκτησης. Πολλές εταιρείες τηλεπικοινωνιών έχουν ξεκινήσει να πειραματίζονται με ολιστικές προσεγγίσεις στην κυβερνοασφάλεια. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι μια αρχιτεκτονική πλέγματος, όπου τα δεδομένα κατανέμονται σε αυτή και κάθε συσκευή έχει τη δική της περίμετρο ασφαλείας. Συνοψίζοντας, οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών θα επικεντρωθούν στην αναβάθμιση της κυβερνοασφάλειας για τα τηλεπικοινωνιακά τους δεδομένα τα επόμενα, καθώς οι απειλές αυξάνονται συνεχώς (StartUs Insights, 2023).

1.4.6. Ψηφιακά Δίδυμα στις Τηλεπικοινωνίες

Τα Ψηφιακά Δίδυμα αποτελούν επίσης μια πολύ σημαντική πτυχή των τηλεπικοινωνιών σήμερα, καθώς είναι απαραίτητες πολλές από αυτές τις τεχνολογίες για την δημιουργία και την λειτουργία τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8 (Rathore, 2020). Περισσότερα για ΨΔ παρατίθενται στα επόμενα κεφάλαια.



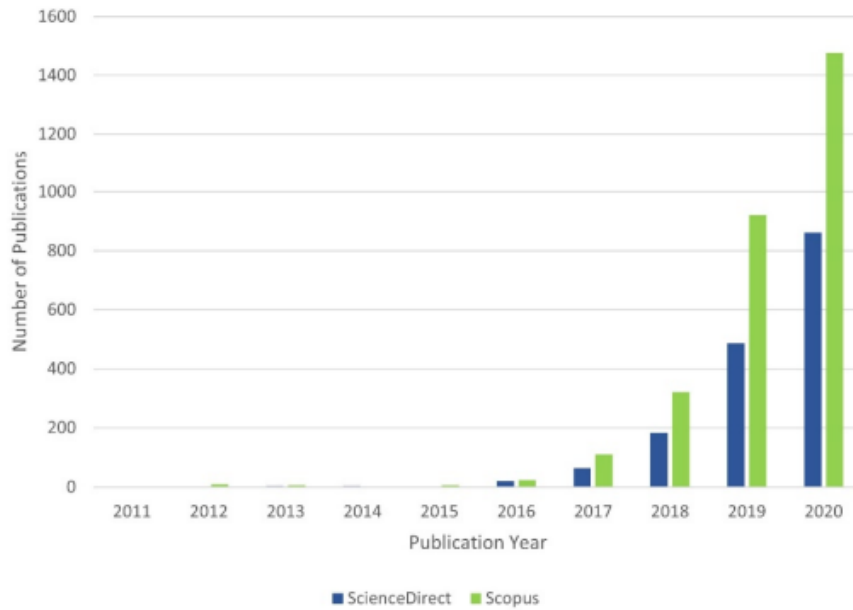
Σχήμα 1.8 : Συσχέτιση ΨΔ και άλλων τεχνολογιών, Rathore et al., 2020

1.5. Σκοπός

Τα τελευταία χρόνια τα ΨΔ αποτελούν μια από τις πιο αναπτυσσόμενες τεχνολογικές τάσεις. Όλο και περισσότεροι ερευνητές άρχισαν να εστιάζουν την έρευνά τους στα ΨΔ. Το Σχήμα 1.9 δείχνει την εκθετική αύξηση του ο αριθμού των δημοσιεύσεων σε δύο μεγάλους ιστότοπους με επιστημονικές δημοσιεύσεις (στο Scopus και στο ScienceDirect) το 2011 έως το 2020 (Singh et al., 2021). Η αύξηση των δημοσιεύσεων είναι αρκετά πρόσφατη, δηλαδή, από το 2016 και μετά. Από την πλευρά της η βιομηχανία προβλέπεται να αυξήσει τις δαπάνες για τα

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

ΨΔ από 4,6 δισεκατομμύρια δολάρια το 2022 σε 33,9 δισεκατομμύρια δολάρια το 2030 με Σύνθετο Ετήσιο Ρυθμό Ανάπτυξης 28% (CAGR), σύμφωνα με μελέτη της *ABI Research*. Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η έρευνα για την εφαρμογή ΨΔ σε έργα Πολιτικών Μηχανικών και Αρχιτεκτόνων Μηχανικών και πως αυτά μπορούν να βοηθήσουν στην εξέλιξη του επαγγέλματός τους.



Σχήμα 1.9 : Αριθμός δημοσιεύσεων για τα ΨΔ συναρτήσει του χρόνου, Singh et al., 2021

2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Ψηφιακά Δίδυμα

2.1. Η έννοια του Ψηφιακού Διδύμου (Digital Twin / DT)

Η αρχική ιδέα του Ψηφιακού Διδύμου (ΨΔ) ανήκει στον καθηγητή του Πανεπιστημίου του Μίσιγκαν Dr. Grieves, ο οποίος το 2002 στα πλαίσια του μαθήματος “Διαχείριση Κύκλου Ζωής Προϊόντος” (Product Lifecycle Management / PLM) εισήγαγε την έννοια του “Εννοιολογικού Ιδεώδους για Διαχείριση Κύκλου Ζωής Προϊόντος” (“Conceptual Ideal for PLM”). Το 2005, ο Dr. Grieves προέκτεινε περαιτέρω την ιδέα ότι το ΨΔ είναι μια απεικόνιση μεταξύ δύο χώρων και ονόμασε αρχικά την έννοια αυτή ως “Μοντέλο Κατοπτρικών Χώρων” (“Mirrored Spaces Model”) (Grieves, 2005), ενώ το 2006 το μετονόμασε ως “Μοντέλο Κατοπτρικών Πληροφοριών (“Information Mirrored Model”), πριν πάρει την τελική της ονομασία ως “Ψηφιακό Δίδυμο” (“Digital Twin”) το 2011 (Grieves, 2011). Λίγα χρόνια αργότερα, ο Grieves ορίζει το ΨΔ ως “ένα σύνολο εικονικών δομών πληροφορίας που περιγράφουν πλήρως ένα δυνητικό ή πραγματικό φυσικό προϊόν από το μικροατομικό επίπεδο έως το μακρογεωμετρικό επίπεδο” (Grieves & Vickers, 2016).

Ο τομέας της Αεροδιαστημικής Μηχανικής εξελίχθηκε σε έναν από τους σημαντικότερους ερευνητικούς κλάδους για τα ΨΔ. Το 2012 η NASA δημοσίευσε την εργασία (“The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles”) δίνοντας στα ΨΔ τον εξής ορισμό : “Ένα ΨΔ είναι μία ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολλαπλής κλίμακας, πιθανολογική προσομοίωση ενός όμοια κατασκευασμένου οχήματος ή συστήματος που χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, αισθητήρες, ιστορικά στοιχεία από το στόλο κ.λπ. για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου ιπτάμενου διδύμου του” (Glaessgen & Stargel, 2012). Σε μεταγενέστερες ερευνητικές εργασίες, που δημοσιεύθηκαν την ίδια χρονιά, εμφανίστηκαν επιπλέον εφαρμογές της έννοιας, όπως ο έλεγχος των απαιτήσεων της αποστολής (Gockel et al., 2012, E. Tuegel, 2012) και η χρήση του ΨΔ για δραστηριότητες πρόγνωσης και διάγνωσης (Reifsnider & Majumdar, 2013), οι οποίες στη συνέχεια παρέμειναν ως βασικά χαρακτηριστικά της έννοιας σε μελλοντικές εργασίες.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ακόμα πολλοί ορισμοί για τα ΨΔ που διευρύνουν το πεδίο εφαρμογής τους. Οι ορισμοί αυτοί προέρχονται τόσο από την ακαδημαϊκή κοινότητα όσο και από μεγάλες εταιρείες της βιομηχανίας οι οποίες δημιουργούν εφαρμογές και υπηρεσίες που

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

ενσωματώνουν την χρήση ΨΔ. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1) γίνεται μια προσπάθεια συλλογής μερικών από τους ορισμούς της βιβλιογραφίας.

Πίνακας 2.1 : Διάφοροι ορισμοί για τα ΨΔ από την βιβλιογραφία

Ορισμός	Αναφορές
Μια ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολυκλιμακωτή, πιθανολογική προσομοίωση ενός οχήματος ή συστήματος όπως κατασκευάστηκε, η οποία χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, ιστορικό στόλου κ.λπ. για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου ιπτάμενου διδύμου του. Το ΨΔ είναι εξαιρετικά ρεαλιστικό και μπορεί να εξετάζει ένα ή περισσότερα σημαντικά και αλληλεξαρτώμενα συστήματα οχήματος.	Glaessgen & Stargel, 2012
Εξαιρετικά ρεαλιστικό, υπολογιστικό μοντέλο της δομής ενός αεροσκάφους από «τα σπάργανα ως τα σάβανα», το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ικανότητας του αεροσκάφους να ανταποκριθεί σε τις απαιτήσεις της αποστολής.	Gockel et al., 2012
Μοντέλο της ικανότητας της δομής ενός αεροσκάφους να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της αποστολής, το οποίο περιλαμβάνει υποδείγματα των ηλεκτρονικών συστημάτων, των οργάνων ελέγχου πτήσης, του συστήματος προώθησης και άλλων υποσυστημάτων.	E. Tuegel, 2012
Συνδεδεμένο μοντέλο της πραγματικής μηχανής που λειτουργεί στην πλατφόρμα νέφους και προσομοιώνει την κατάσταση της υγείας με ολοκληρωμένη γνώση τόσο από αναλυτικούς αλγορίθμους βασισμένους σε δεδομένα όσο και από άλλες διαθέσιμες φυσικές γνώσεις.	J. Lee et al., 2013
Υπερ-υψηλής πιστότητας φυσικά μοντέλα των υλικών και των δομών που ελέγχουν τη διάρκεια ζωής ενός οχήματος.	Reifsnider & Majumdar, 2013

<p>Μια εικονική αναπαράσταση αυτού που έχει παραχθεί. Μπορούμε να συγκρίνουμε ένα εικονικό δίδυμο με τη μελέτη σχεδιασμού του για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτό που παράχθηκε σε σχέση με αυτό που σχεδιάστηκε, σφίγγοντας τον βρόχο μεταξύ σχεδιασμού και εκτέλεσης.</p>	<p>Grieves, 2014</p>
<p>Ένα παράδειγμα διαχείρισης ζωής και πιστοποίησης, όπου το μοντέλο και οι προσομοιώσεις αποτελούνται από τις καταστάσεις του οχήματος όπως κατασκευάστηκε, τα φορτία και τα περιβάλλοντα όπως βιώθηκαν, καθώς και το ιστορικό για το συγκεκριμένο όχημα, ώστε να είναι δυνατή η υψηλής πιστότητας μοντελοποίηση μεμονωμένων αεροδιαστημικών οχημάτων καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους.</p>	<p>Hochhalter et al., 2014</p>
<p>Δομικό μοντέλο υψηλής πιστότητας που ενσωματώνει βλάβες λόγω κόπωσης και αποτελεί ένα αρκετά πλήρες ψηφιακό αντίγραφο του πραγματικού δομικού συστήματος ενδιαφέροντος.</p>	<p>Bazilevs et al., 2015</p>
<p>Μια ολοκληρωμένη πολυφυσική, πολυκλιμακωτή, πιθανολογική προσομοίωση ενός προϊόντος όπως κατασκευάστηκε, η οποία χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα φυσικά μοντέλα, ενημερώσεις αισθητήρων, δεδομένα ιστορικού, κ.λπ. για να αντικατοπτρίζει τη ζωή του αντίστοιχου φυσικού του διδύμου.</p>	<p>Ríos et al., 2015</p>
<p>Πολύ ρεαλιστικά μοντέλα της τρέχουσας κατάστασης της διεργασίας και της συμπεριφοράς της σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον στον πραγματικό κόσμο.</p>	<p>Rosen et al., 2015</p>
<p>Ένα ενοποιημένο μοντέλο συστήματος που μπορεί να συντονίζει αρχιτεκτονικά, μηχανικά, ηλεκτρικά, λογισμικά, μοντέλα επαλήθευσης και άλλα μοντέλα ειδικών κλάδων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος, συνδέοντας μοντέλα σε εργαλεία πολλαπλών προμηθευτών και αποθετήρια ελεγχόμενων διαμορφώσεων.</p>	<p>Bajaj et al., 2016</p>

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Το ΨΔ αναφέρεται σε μια εικονική αναπαράσταση ενός εξαρτήματος, προϊόντος ή συστήματος που μπορεί να είναι χρήσιμη καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής της οντότητας.	Boschert & Rosen, 2016
Ψηφιακή αναπαράσταση ενός αντικειμένου του πραγματικού κόσμου με έμφαση στο ίδιο το αντικείμενο	Canedo, 2016
Ένα σύνολο εικονικών πληροφοριακών δομών που περιγράφει πλήρως ένα δυνητικό ή πραγματικό φυσικό προϊόν παραγωγής από το μικροατομικό επίπεδο έως το μακρογεωμετρικό επίπεδο.	Grieves & Vickers, 2016
Μία ολοκληρωμένη, πολυφυσική, πολυκλιμακωτή, πιθανολογική προσομοίωση ενός συστήματος όπως κατασκευάστηκε, με τη βοήθεια του ψηφιακού νήματος, η οποία χρησιμοποιεί τα καλύτερα διαθέσιμα μοντέλα, πληροφορίες αισθητήρων και δεδομένα εισόδου για να αντικατοπτρίζει και να προβλέπει δραστηριότητες/απόδοση κατά τη διάρκεια ζωής του αντίστοιχου φυσικού δίδυμου.	Kraft, 2016
Εικονικά υποκατάστατα αντικειμένων του πραγματικού κόσμου που αποτελούνται από εικονικές αναπαραστάσεις και δυνατότητες επικοινωνίας και συνθέτουν έξυπνα αντικείμενα που λειτουργούν ως ευφυείς κόμβοι στο διαδίκτυο των πραγμάτων και των υπηρεσιών.	Schluse et al., 2016
Μια εικονική αναπαράσταση ενός συστήματος παραγωγής που μπορεί να συγχρονιστεί με το σύστημα παραγωγής μέσω αισθητήρων πραγματικού χρόνου και δεδομένων που λαμβάνονται μέσω συνδεδεμένων έξυπνων συσκευών.	Negri et al., 2017
Ένα ΨΔ είναι το ψηφιακό μοντέλο μιας φυσικής συσκευής ή συστήματος που αντιπροσωπεύει όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά και τις συνδέσεις με τα εξαρτήματα που δουλεύουν.	Chen, 2017
Μια ψηφιακή εικόνα σε σχεδόν πραγματικό χρόνο ενός φυσικού αντικειμένου ή μιας διαδικασίας που συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της επιχειρηματικής απόδοσης.	Parrott & Warshaw, 2017

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Το ΨΔ μιας φυσικής οντότητας περιλαμβάνει στρώματα δεδομένων που αποτελούνται από το ίδιο το προϊόν, τις διαδικασίες και τους πόρους στο περιβάλλον όπου λειτουργεί.	Demkovich et al., 2018
Μια αντιγραφή πραγματικού φυσικού συστήματος παραγωγής στο Ψηφιακό Μοντέλο, το οποίο αξιοποιείται για τη βελτιστοποίηση του συστήματος, την παρακολούθηση, τη διάγνωση και την πρόγνωση μέσω της ενσωμάτωσης της Τεχνητής Νοημοσύνης, της μηχανικής μάθησης και της ανάλυσης λογισμικού με μεγάλους όγκους δεδομένων από φυσικά συστήματα.	Liu et al., 2018
Μια φυσική οντότητα, ένα εικονικό αντίστοιχο, μια σύνδεση μεταξύ ενός φυσικού και ενός εικονικού αντίστοιχου, δεδομένα και υπηρεσίες είναι τα συστατικά στοιχεία ενός πλήρους ΨΔ.	Tao, Cheng, et al., 2018
Μια ψηφιακή αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή συγκροτήματος που χρησιμοποιεί ολοκληρωμένες προσομοιώσεις και δεδομένα υπηρεσιών.	Vrabič et al., 2018
Μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος σε όλο τον κύκλο ζωής του, χρησιμοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να καταστεί δυνατή η κατανόηση, η μάθηση και η συλλογιστική.	IBM, 2019
Ένα εικονικό παράδειγμα ενός φυσικού συστήματος που ενημερώνεται συνεχώς με τα δεδομένα απόδοσης, συντήρησης και κατάστασης υγείας του φυσικού συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του φυσικού συστήματος.	Madni et al., 2019
Μια εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού προϊόντος ή μιας διαδικασίας, που χρησιμοποιείται για την κατανόηση και την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών απόδοσης του φυσικού ομολόγου.	Siemens, 2019
Μια πραγματική χαρτογράφηση όλων των συστατικών στοιχείων στον κύκλο ζωής του προϊόντος χρησιμοποιώντας φυσικά δεδομένα, εικονικά δεδομένα και δεδομένα αλληλεπίδρασης μεταξύ τους.	Tao et al., 2019

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

<p>Μια ψηφιακή αναπαράσταση μιας οντότητας ή ενός συστήματος του πραγματικού κόσμου. Η υλοποίηση ενός ΨΔ είναι ένα ενθυλακωμένο αντικείμενο ή μοντέλο λογισμικού που αντικατοπτρίζει ένα μοναδικό φυσικό αντικείμενο, διαδικασία, οργανισμό, πρόσωπο ή άλλη αφαίρεση. Τα δεδομένα από πολλαπλά ΨΔ μπορούν να συγκεντρωθούν για μια σύνθετη άποψη σε έναν αριθμό οντοτήτων του πραγματικού κόσμου, όπως ένας σταθμός παραγωγής ενέργειας ή μια πόλη, και των σχετικών διαδικασιών τους.</p>	<p>Gartner, 2020</p>
<p>Ένα εικονικό μοντέλο μιας διαδικασίας, ενός προϊόντος, ενός περιουσιακού στοιχείου παραγωγής ή μιας υπηρεσίας. Συνδεδεμένο με αισθητήρες και IoT μηχανές και συσκευές, σε συνδυασμό με τη μηχανική μάθηση και την προηγμένη ανάλυση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβάλλεται η κατάσταση της συσκευής σε πραγματικό χρόνο. Όταν συνδυάζεται με πληροφορίες σχεδιασμού τόσο 2D όσο και 3D, ένα ΨΔ μπορεί να απεικονίσει τον φυσικό κόσμο και να παρέχει μια μέθοδο προσομοίωσης ηλεκτρονικών, μηχανικών και συνδυασμένων αποτελεσμάτων του συστήματος.</p>	<p>Microsoft, 2020</p>
<p>Ένα ολοκληρωμένο σύστημα που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση, την παρακολούθηση, τον υπολογισμό, τη ρύθμιση και τον έλεγχο μιας διεργασίας.</p>	<p>Zheng et al., 2020</p>
<p>Τα ψηφιακά δίδυμα είναι δυναμικά ψηφιακά πληροφοριακά μοντέλα που αντιπροσωπεύουν αντικείμενα του πραγματικού κόσμου.</p>	<p>Autodesk, 2022</p>
<p>Ενώ δεν υπάρχει τυπικός ορισμός ΨΔ, αυτή η τεχνολογία έχει οριστεί ως η εικονική αναπαράσταση ενός φυσικού αντικειμένου που υπάρχει στον ψηφιακό κόσμο. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές προσομοιώσεις, αυτές οι εικονικές αναπαραστάσεις είναι δυναμικές, εκτείνονται σε όλο τον κύκλο ζωής του αντικειμένου και επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο με το υποκείμενο φυσικό στοιχείο.</p>	<p>Authena, 2022</p>

<p>Ένα ψηφιακό δίδυμο είναι ένα δυναμικό εικονικό αντίγραφο ενός φυσικού στοιχείου, διαδικασίας, συστήματος ή περιβάλλοντος που μοιάζει και συμπεριφέρεται πανομοιότυπα με το αντίστοιχο του πραγματικού κόσμου. Ένα ψηφιακό δίδυμο απορροφά δεδομένα και αναπαράγει διαδικασίες, ώστε να μπορείτε να προβλέψετε πιθανά αποτελέσματα απόδοσης και ζητήματα που μπορεί να υποστεί το προϊόν του πραγματικού κόσμου.</p>	<p>Unity</p>
<p>Ένα ΨΔ είναι ένα εικονικό μοντέλο ενός φυσικού αντικειμένου. Εκτείνεται στον κύκλο ζωής του αντικειμένου και χρησιμοποιεί δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που αποστέλλονται από αισθητήρες στο αντικείμενο για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά και τις λειτουργίες παρακολούθησης. Τα ΨΔ μπορούν να αναπαράγουν πολλά αντικείμενα του πραγματικού κόσμου, από μεμονωμένα κομμάτια εξοπλισμού σε ένα εργοστάσιο έως πλήρεις εγκαταστάσεις, όπως ανεμογεννήτριες και ακόμη και ολόκληρες πόλεις. Η τεχνολογία DT σας επιτρέπει να επιβλέπετε την απόδοση ενός στοιχείου, να εντοπίζετε πιθανά σφάλματα και να λαμβάνετε καλύτερα ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τη συντήρηση και τον κύκλο ζωής.</p>	<p>AWS</p>

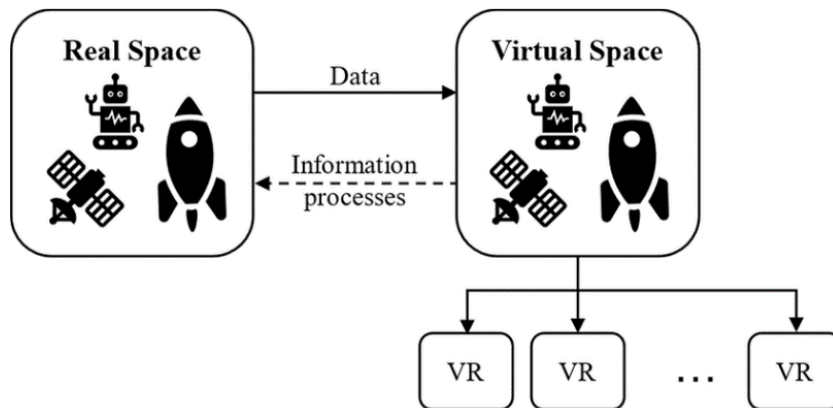
Ένας προτεινόμενος ορισμός για το Ψηφιακό Δίδυμο είναι ο εξής :

Το Ψηφιακό Δίδυμο είναι ένα εικονικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει ένα φυσικό αντικείμενο, σύστημα ή διαδικασία. Αυτό το μοντέλο αντανακλά τη δομή, τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του πραγματικού αντικειμένου, επιτρέποντας την ανάλυση του αντικειμένου σε εικονικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Το Ψηφιακό Δίδυμο λειτουργεί παράλληλα με το πραγματικό αντικείμενο, επιτρέποντας την παρακολούθηση, την ανάλυση και την πρόβλεψη της απόδοσής του, καθώς και τη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε πραγματικά δεδομένα.

Η κλασική ή αλλιώς η τρισδιάστατη προσέγγιση (3D DT Approach) αναφέρει ότι ένα ΨΔ αποτελείται από τρία μέρη (Σχήμα 2.1) :

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

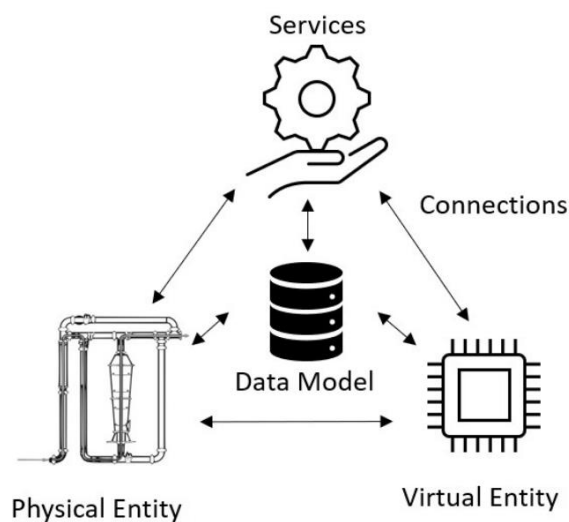
1. Το φυσικό μέρος στον πραγματικό κόσμο
2. Το εικονικό μέρος στον ψηφιακό κόσμο
3. Την αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο μερών (φυσικό – ψηφιακό)



Σχήμα 2.1 : Κλασική προσέγγιση ΨΔ (3D – DT), Grieves, 2014

Το 2019 οι Ταο κ.α. επέκτειναν την κλασική προσέγγιση προσθέτοντας δύο μέρη (5D DT Approach) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 (Tao et al, 2019) :

1. Το φυσικό μέρος στον πραγματικό κόσμο
2. Το εικονικό μέρος στον ψηφιακό κόσμο
3. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τα δύο μέρη
4. Τις αμφίδρομες συνδέσεις μεταξύ όλων των μερών του ΨΔ
5. Τις υπηρεσίες που προκύπτουν (αξιολογήσεις, βελτιστοποιήσεις, προβλέψεις κ.α.)



Σχήμα 2.2 : Διευρυμένη προσέγγιση ΨΔ (5D – DT), Tao et al., 2019

2.2. Πλεονεκτήματα Ψηφιακών Διδύμων

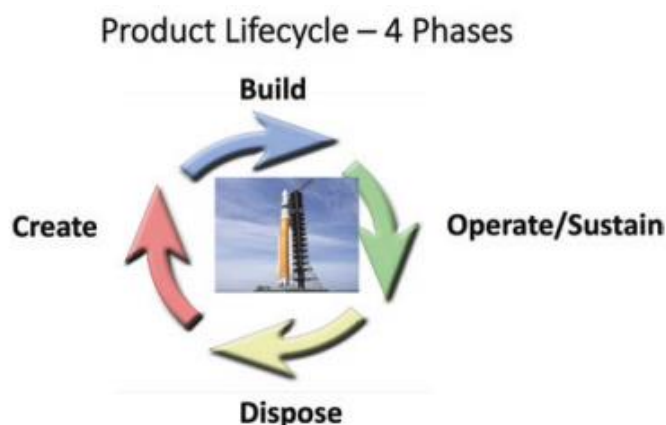
Τα ψηφιακά δίδυμα προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα πλεονεκτημάτων σε διάφορους κλάδους και εφαρμογές. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα βασικότερα οφέλη των ΨΔ :

- Βελτίωση στη λήψη αποφάσεων: Τα ψηφιακά δίδυμα παρέχουν πραγματικά δεδομένα και εισάγουν μεγαλύτερη πληροφόρηση, επιτρέποντας στις οργανώσεις να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις.
- Καλύτερη συντήρηση και πρόβλεψη: Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη πότε είναι πιθανό να αντιμετωπιστούν προβλήματα με εξοπλισμό ή περιουσιακά στοιχεία, επιτρέποντας προληπτική συντήρηση και μείωση του χρόνου απενεργοποίησης και του κόστους επισκευών.
- Βελτιστοποίηση των λειτουργιών: Με τον μοντελοποιημένο και προσομοιωμένο τρόπο λειτουργίας των φυσικών συστημάτων, τα ψηφιακά δίδυμα βοηθούν στη βελτιστοποίηση των διαδικασιών και των λειτουργιών, κάνοντάς τις πιο αποδοτικές και οικονομικές.
- Σχεδιασμός και πρωτοτυπία: Τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη προϊόντων για να προσομοιώσουν και να δοκιμάσουν τα σχέδια πριν κατασκευαστούν φυσικά πρωτότυπα, μειώνοντας τον χρόνο ανάπτυξης και τα έξοδα.
- Παρακολούθηση απόδοσης: Η παρακολούθηση της απόδοσης των φυσικών στοιχείων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει στις εταιρίες να εντοπίσουν αν είναι ανεπαρκή τμήματα ή συστήματα και να κάνουν αναπροσαρμογές όπως απαιτείται.
- Πιστοποίηση Ποιότητας: βοηθούν στη διατήρηση και βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων παρακολουθώντας τις διαδικασίες παραγωγής σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας την σταθερά υψηλή ποιότητα τους.
- Απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχος: Τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση και έλεγχο των φυσικών στοιχείων και συστημάτων, μειώνοντας την ανάγκη για παρουσία επί τόπου και βελτιώνοντας την ασφάλεια.
- Διαχείριση κινδύνου: Οι οργανισμοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν ψηφιακά δίδυμα για να προσομοιώσουν και να αξιολογήσουν πιθανούς κινδύνους και , επιτρέποντας τον σχεδιασμό κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου.

2.3. Τύποι Ψηφιακών Διδύμων

Σύμφωνα με τον Grieves (2023), οι τύποι των ΨΔ εξαρτώνται από την φάση που βρίσκεται το προϊόν στον κύκλο ζωής του. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 χωρίζει τον κύκλο ζωής του προϊόντος (Product Lifecycle) σε τέσσερις (4) φάσεις :

- Δημιουργία Προϊόντος (Create)
- Κατασκευή Προϊόντος (Build)
- Λειτουργία / Συντήρηση Προϊόντος (Operate / Sustain)
- Απόρριψη Προϊόντος (Dispose)



Σχήμα 2.3 : Κύκλος ζωής προϊόντος σε τέσσερις φάσεις, Grieves, 2023

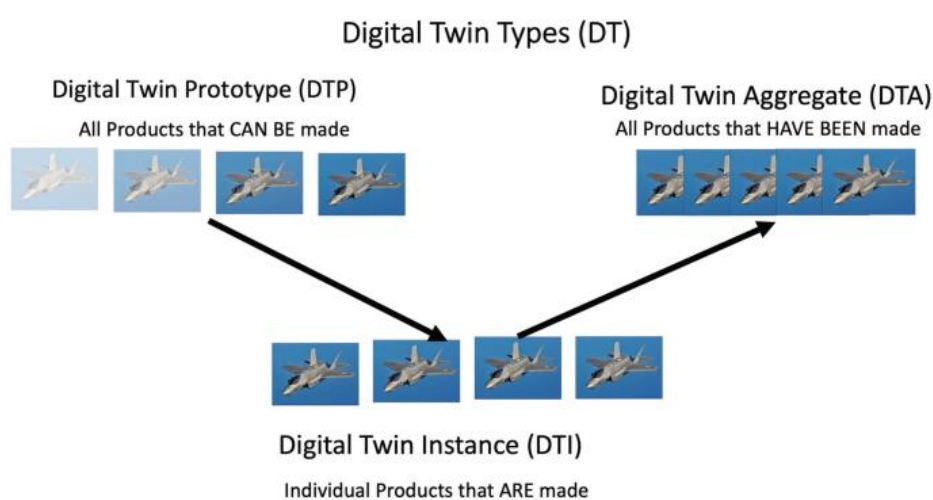
Έπειτα προτείνει τους εξής τύπους ΨΔ (Σχήμα 2.4) :

- Πρωτότυπο ΨΔ / ΠΨΔ(Digital Twin Prototype / DTP) :
Το Ψηφιακό Προϊόν προηγείται του Φυσικού. Με αυτό τον τρόπο το προϊόν δημιουργείται, ελέγχεται, δοκιμάζεται και διορθώνεται στον ψηφιακό κόσμο με πολύ μικρό κόστος. Όταν τελειοποιηθεί στο βέλτιστο βαθμό τότε προχωράει στην κατασκευή του Φυσικού. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.4 το προϊόν παίρνει την τελική του μορφή με την πάροδο του χρόνου. Ως ΠΨΔ θεωρούνται όλα τα προϊόντα που μπορούν να κατασκευαστούν και όλες οι παραλλαγές τους.
- Στιγμιότυπο ΨΔ / Στ.ΨΔ (Digital Twin Instance / DTI) :
Ως Στ.ΨΔ θεωρούνται όλα τα προϊόντα που κατασκευάζονται. Τα δίδυμα που δημιουργούνται έχουν τις ακριβείς διαστάσεις και χαρακτηριστικά και αποκτούν

σειριακό αριθμό. Τα δεδομένα τα αντλούν από τα ΠΨΔ που έχουν ήδη δημιουργηθεί. Η ανάγκη για την δημιουργία Στ.ΨΔ εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και τη σημασία του φυσικού προϊόντος.

- Συνολικό ΨΔ / ΣΨΔ (Digital Twin Aggregate / DTA) :

Η συναρμολόγηση όλων των προϊόντων που έχουν κατασκευαστεί. Τα δεδομένα συλλέγονται από το σύνολο των ξεχωριστών εξαρτημάτων. Με αυτό τον τρόπο προβλέπονται πιθανές βλάβες και είτε ειδοποιούνται οι χρήστες είτε γίνεται αντικατάσταση εξαρτημάτων πρώτου αστοχήσει το προϊόν. Εξασφαλίζεται έτσι η αποτελεσματικότερα η συντήρηση του.

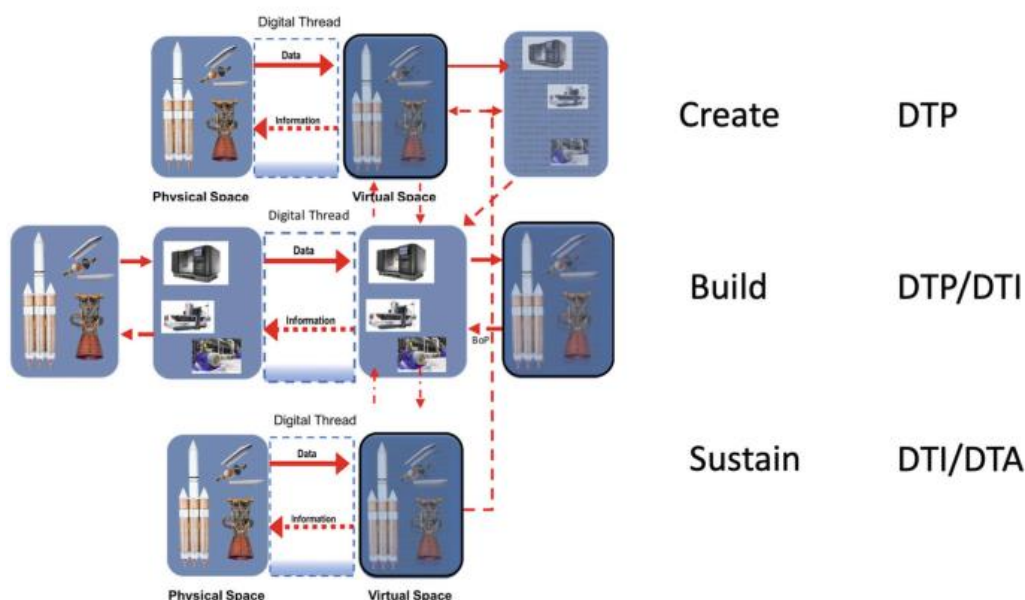


Σχήμα 2.4 : Τύποι ΨΔ που εξαρτώνται από τον κύκλο ζωής του προϊόντος , Grieves, 2023

Τέλος ο Grieves εξηγεί που εφαρμόζονται οι τύποι των ΨΔ στις διάφορες φάσεις του κύκλου ζωής του προϊόντος (Σχήμα 2.5). Στη φάση της δημιουργίας υπάρχει το ΠΨΔ (DTP). Σχεδιάζεται και ελέγχεται πρώτα το μοντέλο στον εικονικό κόσμο. Στη συνέχεια περνάμε στη φάση της κατασκευής. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να δημιουργηθούν τα σχέδια και οι διαδικασίες παραγωγής του φυσικού προϊόντος, παίρνοντας δεδομένα από τα ΠΨΔ (Bill of Process / BoP). Κατασκευάζονται ύστερα τα Στ.ΨΔ (DTI) των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιηθούν. Στην φάση λειτουργίας / συντήρησης χρησιμοποιούνται τα Στ.ΨΔ για να αντικατοπτρίζονται τυχόν αλλαγές στο φυσικό προϊόν και να υπάρχει πρόσβαση στο ιστορικό του. Τέλος, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα δημιουργούνται τα ΣΨΔ (DTA) με τα οποία προβλέπεται η μελλοντική συμπεριφορά του προϊόντος και διορθώνονται άμεσα βλάβες και

τυχόν αστοχίες του. Συνδέοντας, επίσης, τα ΣΨΔ με την φάση την δημιουργίας, οι επόμενες εκδόσεις είναι απαλλαγμένες από τέτοια προβλήματα.

Digital Twin Model through the Lifecycle



Σχήμα 2.5 : Εφαρμογή των τύπων ΨΔ στις φάσεις του κύκλου ζωής προϊόντος , Grieves, 2023

Εκτός από τον διαχωρισμό που πρότεινε ο Grieves, στον τομέα της βιομηχανίας και της παραγωγής τα ΨΔ χωρίζονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες (Βικιπαίδεια, Authena) (Σχήμα 2.6) :

- ΨΔ Στοιχείων / Μερικά ΨΔ (Component DT / Parts DT) :

Οι ΨΔ στοιχείων αποτελούν τη βασική μονάδα ενός ψηφιακού δίδυμου, το μικρότερο παράδειγμα ενός λειτουργικού συστατικού. Οι μερικοί δίδυμοι είναι παρόμοια δομημένοι, αλλά αναφέρονται σε λιγότερο σημαντικά στοιχεία.

- ΨΔ Ενεργητικών Στοιχείων (Asset DT) :

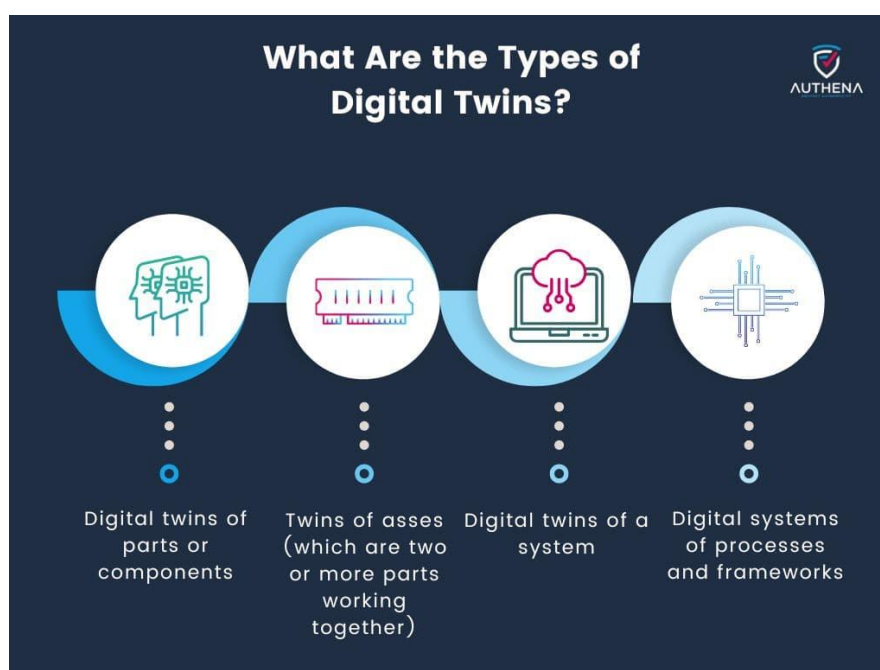
Όταν δύο ή περισσότερα συστατικά στοιχεία λειτουργούν μαζί, σχηματίζουν αυτό που ονομάζεται ενεργητικό στοιχείο. Τα δίδυμα ενεργητικών στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της αλληλεπίδρασης αυτών των συστατικών και να παράγουν μεγάλο όγκο δεδομένων απόδοσης που μπορούν να επεξεργαστούν και να μετατραπούν σε αξιοποιήσιμες γνώσεις.

- ΨΔ Συστήματος ή Μονάδας (System – Unit DT) :

Τα δίδυμα συστήματος ή μονάδας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση του τρόπου με τον οποίο τα διάφορα στοιχεία σχηματίζουν ένα λειτουργικό συνολικό σύστημα. Τα δίδυμα συστήματος αντικατοπτρίζουν με διαφάνεια τις αλληλεπιδράσεις των και μπορούν να προτείνουν τρόπους βελτίωσης της απόδοσης.

- ΨΔ Διεργασιών (Process DT) :

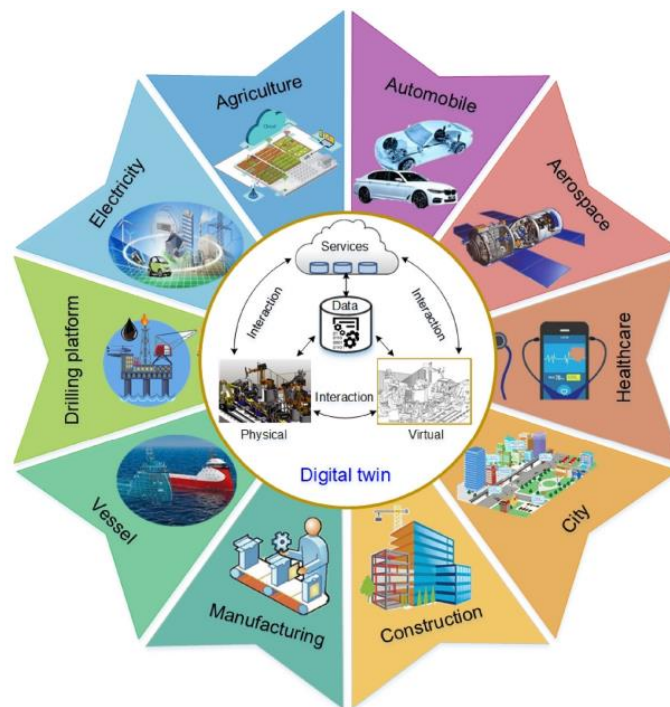
Τα δίδυμα διεργασιών, το μακροσκοπικό επίπεδο λεπτομέρειας, αποκαλύπτουν πώς τα συστήματα συνεργάζονται για να δημιουργήσουν μια πλήρη εγκατάσταση παραγωγής. Τα δίδυμα διεργασιών μπορούν να βοηθήσουν στον καθορισμό ακριβών χρονοδιαγραμμάτων που επηρεάζουν τελικά τη συνολική αποτελεσματικότητα.



Σχήμα 2.6 : Τύποι ΨΔ στον τομέα της παραγωγής, Authena, 2022

2.4. Πεδία εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων

Τα ψηφιακά δίδυμα εμφανίστηκαν αρχικά στον τομέα της αεροδιαστημικής. Σταδιακά άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην παραγωγική διαδικασία από την βιομηχανία. Τα τελευταία χρόνια η ταχέως αναπτυσσόμενη αγορά των ΨΔ αποδεικνύει ότι χρησιμοποιούνται ακόμα σε πολλούς κλάδους (Σχήμα 2.7), αλλά η ζήτηση θα συνεχίσει να αυξάνεται σε ακόμη περισσότερους.



Σχήμα 2.7 : Πεδία εφαρμογής ΨΔ, Qi et al., 2021

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικότερα μερικά από τα κυριότερα πεδία εφαρμογής τους (Qi et al., 2021) :

- Αεροδιαστημική Μηχανική
Τα ΨΔ χρησιμοποιούνται για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση αεροσκαφών και εξοπλισμού. Επιτρέπουν τον προγραμματισμό της τακτικά απαιτούμενης συντήρησης και εξασφαλίζουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία των πολύπλοκων συστημάτων.
- Παραγωγικές Διαδικασίες / Βιομηχανία
Τα ΨΔ χρησιμοποιούνται εκτενώς για τον σχεδιασμό προϊόντων, τη βελτιστοποίηση διαδικασιών και την συντήρηση. Επιτρέπουν παρακολούθηση των γραμμών παραγωγής σε πραγματικό χρόνο και βοηθούν στην επίτευξη υψηλότερης αποδοτικότητας και ποιότητας στα προϊόντα.
- Αυτοκινητοβιομηχανία
Τα αυτοκίνητα αντιπροσωπεύουν πολλούς τύπους σύνθετων, συνεργαζόμενων συστημάτων, με τα ψηφιακά δίδυμα να χρησιμοποιούνται εκτενώς στο σχεδιασμό αυτοκινήτων για τη βελτίωση των επιδόσεων του οχήματος, την καλύτερη συντήρηση του και της αποδοτικότητας γύρω από τη διαδικασία παραγωγής του.

- Σύστημα Υγείας

Τα ΨΔ παράγουν δεδομένα από αισθητήρες την παρακολούθηση διαφόρων δεικτών υγείας και να παρέχει σημαντικές πληροφορίες. Περιλαμβάνουν τη δημιουργία εξατομικευμένων ψηφιακών μοντέλων ασθενών, επιτρέποντας ακριβή διάγνωση, σχεδιασμό θεραπείας και ανάπτυξη φαρμάκων. Είναι ιδιαίτερα πολύτιμα στην ιατρική ακριβείας και στην ειδική φροντίδα του ασθενούς.

- Κατασκευαστικός Κλάδος και Αρχιτεκτονική

Τα βοηθούν στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση κτιρίων και υποδομών. Διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων, εξασφαλίζουν την τήρηση των χρονοδιαγραμμάτων, την οργάνωση του εργοταξίου και βοηθούν στον προγραμματισμό συντήρησης και τυχόν επισκευών. Αποδεικνύονται επίσης χρήσιμα για τα συστήματα που λειτουργούν εντός αυτών των δομών, όπως υδραυλικές εγκαταστάσεις, Η/Μ σχεδιασμό, κ.λπ.

- Έξυπνες Πόλεις

Τα ΨΔ χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την παρακολούθηση του αστικού περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αισθητήρων και την ενσωμάτωση συστημάτων επαυξημένης πραγματικότητας (AR) βοηθούν τους υπεύθυνους να λαμβάνουν αποφάσεις για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων, της διαχείρισης της κυκλοφορίας, την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και της συντήρησης των υποδομών.

- Εφοδιαστική Αλυσίδα

Τα ΨΔ παρέχουν πληροφορίες για την καλύτερη διαχείριση του στόλου της εταιρίας, τη βελτιστοποίηση των διαδρομών και την παρακολούθηση της αλυσίδας εφοδιασμού. Βελτιώνουν με αυτό τον τρόπο την αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, αφού μειώνουν σημαντικά τα κόστη και τους χρόνους και βελτιώνουν τις συνολικές λειτουργίες παράδοσης και μεταφοράς.

- Εκπαίδευση και Διδασκαλία

Τα ΨΔ παρέχουν σύγχρονες και διαδραστικές εμπειρίες μάθησης. Επιτρέπουν στους μαθητές να εξερευνήσουν περίπλοκες έννοιες και περιβάλλοντα, προσφέροντας μια πρακτική και ελκυστική προσέγγιση στην εκπαίδευση.

3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Ψηφιακά Δίδυμα, BIM & CPS

3.1. Εισαγωγή

Τα ΨΔ και οι επιπτώσεις από την χρήση τους έχουν απασχολήσει έντονα τον τελευταίο καιρό τόσο την ακαδημαϊκή κοινότητα, όσο και την επαγγελματική Κοινότητα των Αρχιτεκτόνων και Πολιτικών Μηχανικών (Architecture Engineering Construction and Operations / AECO). Ωστόσο, η έρευνα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο σε σύγκριση με άλλους τομείς και υπάρχει έντονη συζήτηση που αφορά στη σχέση μεταξύ των ΨΔ και άλλων σχετικών εννοιών, που χρησιμοποιούνται ήδη στον Κατασκευαστικό Κλάδο. Αυτές είναι η Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών ή αλλιώς Building Information Modeling (BIM) και τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα ή Cyber – Physical Systems (CPS) (Douglas et al., 2021). Στις επόμενες παραγράφους δίνονται οι ορισμοί των εννοιών αυτών και καθορίζεται ο τρόπος που συνδέονται με τα ΨΔ με αυτές.

3.2. BIM & Ψηφιακά Δίδυμα

Ένας ορισμός που αντιπροσωπεύει την Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών (Building Information Model / BIM) είναι ο εξής :

Η ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου ή έργου υποδομής που περιλαμβάνει τη δημιουργία και τη διαχείριση ενός τρισδιάστατου (3D) μοντέλου και πληροφορίες σχετικές με τη γεωμετρία του έργου, τις χωρικές σχέσεις, τις γεωγραφικές πληροφορίες και άλλα σχετικά δεδομένα. Τα μοντέλα BIM μπορούν να περιέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα δομικά στοιχεία, τα υλικά, το κόστος και άλλα, καθιστώντας τα ένα πολύτιμο εργαλείο για ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου ή έργου υποδομής.

Τα κυριότερα από τα οφέλη της χρήσης του BIM στον Κατασκευαστικό Κλάδο είναι τα παρακάτω :

- βελτίωση του σχεδιασμού, της κατασκευής και της λειτουργίας κτιρίων και υποδομών.
- βελτιωμένη συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών του έργου
- καλύτερη οπτικοποίηση του έργου

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

- βελτιωμένη διαχείριση έργου
- δυνατότητα εντοπισμού και αντιμετώπισης πιθανών ζητημάτων του έργου

Στη βιβλιογραφία ένα πρόβλημα που γίνεται αντιληπτό είναι ο τρόπος με τον οποίο τα ΨΔ συσχετίζονται με το BIM. Οι τρεις βασικές κατανοήσεις που προκύπτουν αφορούν στη σχέση που έχουν αυτές οι δύο έννοιες μεταξύ τους, και είναι οι παρακάτω (Douglas et al., 2021).

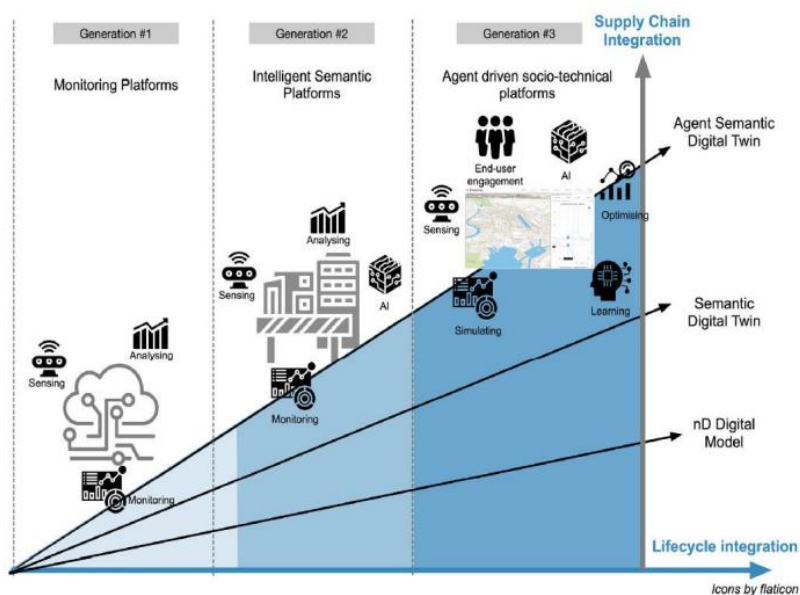
3.2.1. Τα ΨΔ ως συνέχεια του BIM

Το BIM θεωρείται ως πιθανή πλατφόρμα εκκίνησης για την έναρξη μιας εξελικτικής προσέγγισης τριών επιπέδων για την ανάπτυξη ΨΔ στο περιβάλλον της κατασκευής (Boje et al., 2020). Τα τρία επίπεδα, που απεικονίζονται και στο Σχήμα 3.1, αναλύονται στη συνέχεια.

1^ο Επίπεδο - Πλατφόρμες Παρακολούθησης (Monitoring Platforms) : χρησιμοποιούνται αισθητήρες, αναφορές και περιορισμένης δυνατότητας αναλύσεις για την παρακολούθηση ενός φυσικού στοιχείου σε πραγματικό χρόνο.

2^ο Επίπεδο - Έξυπνες Σημασιολογικές Πλατφόρμες (Intelligent Semantic Platforms) : στο επίπεδο αυτό ενσωματώνονται στο ΨΔ συσκευές IoT και διαθέτει περιορισμένη Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), ωστόσο απαιτείται σημαντική ανθρώπινη αλληλεπίδραση για την βελτιστοποίηση και της λειτουργίας του.

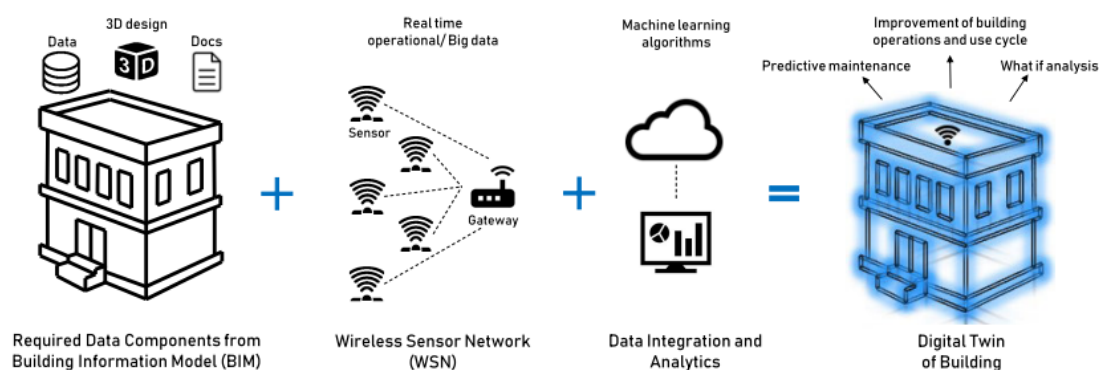
3^ο Επίπεδο – Καθοδηγούμενες Κοινωνικο-Τεχνικές Πλατφόρμες (Agent-Driven Socio-Technical Platforms) : Ένα πλήρως σημασιολογικό ΨΔ δυνατότητες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI). Χρησιμοποιούνται διάφορες ψηφιακές τεχνολογίες και τεχνικές όπως μηχανική μάθηση (Machine Learning), βαθιά μάθηση (Deep Learning), εξόρυξη δεδομένων (Data Mining) και ανάλυση δεδομένων (Data Analysis) για να δημιουργηθεί ένα ΨΔ που είναι αυτόνομο, αυτο-ενημερούμενο και αυτο-μαθαίνον. Η λειτουργία γίνεται πλήρως αυτόματη, απαιτώντας μόνο ανθρώπινη επίβλεψη.



Σχήμα 3.1 : Εξελικτική προσέγγιση τριών επιπέδων για την ανάπτυξη ΨΔ, Boje et al., 2020

3.2.2. Τα ΨΔ και το BIM ως ξεχωριστές έννοιες

Το BIM είναι μια πλατφόρμα για τη διατήρηση ενός ακριβούς και διαλειτουργικού αρχείου πληροφοριών ενός κτιρίου για τη βελτίωση του σχεδιασμού, της κατασκευής και της συντήρησης κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Συγκεκριμένα, έχει αναπτυχθεί για ενσωμάτωση του τρισδιάστατου σχεδίου του κτιριακού μοντέλου με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD) και πρόσθετα δεδομένα που σχετίζονται με τις προδιαγραφές, τα χρονοδιάγραμμα, την εκτίμηση του κόστους και την διαχείριση της συντήρησης με στόχο την πρόληψη τυχόν σφαλμάτων και αστοχιών στο στάδιο του σχεδιασμού και της κατασκευής. Για τη δημιουργία του ΨΔ απαιτείται όμως ένα δίκτυο από αισθητήρες (Wireless Sensor Network – WSN) και η ενσωμάτωση και ανάλυση δεδομένων (Σχήμα 3.2) έτσι ώστε να είναι εφικτή η παρακολούθηση του κτιρίου σε πραγματικό χρόνο και να γίνεται η βέλτιστη λήψη αποφάσεων για τη λειτουργία, την αποδοτικότητα, την άνεση και τη συντήρηση του (Khajavi et al., 2019).



Σχήμα 3.2 : Βασικά μέρη ενός ΨΔ για κτήριο, Khajavi et al., 2019

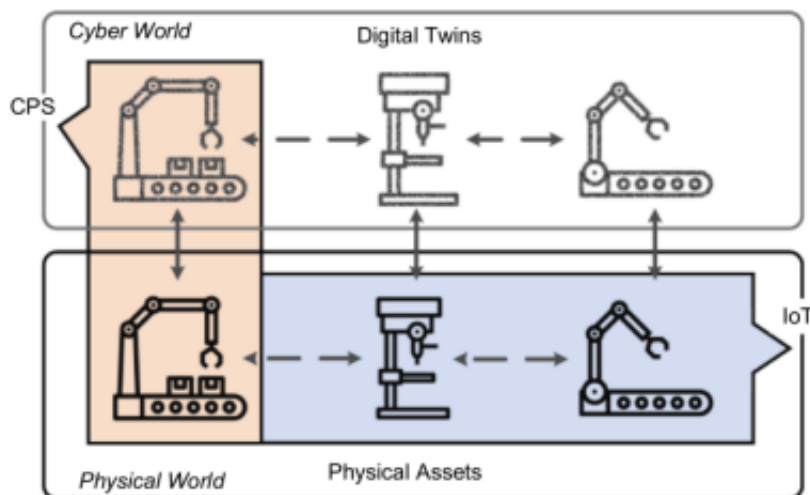
3.2.3. Τα ΨΔ και το BIM ως συμπληρωματικές έννοιες

Το BIM και τα ΨΔ είναι συμπληρωματικές έννοιες χρησιμοποιούνται από κοινού σε οποιοδήποτε στάδιο του κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Το BIM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία της αρχικής ψηφιακής αναπαράστασης και με την εξόρυξη δεδομένων και την τεχνολογία IoT αποτελούν βάση για το ΨΔ το οποίο συνεχώς εμπλουτίζεται σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας την αμφίδρομη ροή πληροφοριών από όλα τα στάδια της ζωής του έργου. Η ενσωμάτωση του BIM και των ΨΔ χρησιμοποιείται επίσης για την μοντελοποίηση την προσομοίωση και τον σχεδιασμό βασισμένο στην αποδοτικότητα (lean-based planning) κατά τη διάρκεια των διάφορων φάσεων, επιτυγχάνοντας την καλύτερη διαχείριση και έλεγχο του έργου. Τέλος, γίνεται αντιληπτή η σημασία της ένταξης και διαλειτουργικότητα και άλλων τεχνολογιών όπως το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS), Εικονική / Επαυξημένη Πραγματικότητα (AR/VR) και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) (Douglas et al., 2021).

3.3. CPS & Ψηφιακά Δίδυμα

Τα CPS αναφέρονται σε ολοκληρωμένα συστήματα που συνδυάζουν υπολογιστικά και φυσικά στοιχεία. Ενσωματωμένοι υπολογιστές παρακολουθούν και ελέγχουν τις φυσικές διεργασίες, συνήθως με βρόχους ανάδρασης, και το πως επηρεάζουν τους υπολογισμούς και το αντίστροφο (Lee, 2015). Περιλαμβάνουν την αλληλεπίδραση αισθητήρων, λογισμικού και συστημάτων επικοινωνίας για τον έλεγχο και την απόκριση στις αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον. Στη βιβλιογραφία σε πολλές περιπτώσεις τα ΨΔ και τα CPS σχετίζονται με την ίδια έννοια, ενώ σε άλλες έχουν δηλωθεί ότι είναι δύο σχετικές αλλά εντελώς ξεχωριστές έννοιες.

Για παράδειγμα οι Lu et al. υποστηρίζουν ότι ένα CPS χαρακτηρίζεται από ένα φυσικό μοντέλο και το ΨΔ του (Σχήμα 3.3). Αντίθετα, ένα ΨΔ είναι το ψηφιακό μοντέλο, όχι το δίδυμο φυσικό στοιχείο, άρα αποτελεί προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός CPS. Η τεχνολογία IoT είναι υποδομή στον φυσικό χώρο για τη σύνδεση των φυσικών στοιχείων για να επιτρέπεται η ροή δεδομένων μεταξύ τους (Lu et al., 2020).



Σχήμα 3.3 : Συσχέτιση μεταξύ των ΨΔ, CPS και IoT, Lu et al., 2020

Αντίθετα οι Tao et al (2019) θεωρούν ότι τόσο τα CPS όσο και τα ΨΔ προέρχονται από δύο ξεχωριστές πηγές που έχουν επηρεάσει τη δομή, την ανάπτυξη και τους τομείς εφαρμογής τους. Το ψηφιακό δίδυμο προέρχεται από ένα πολύπλοκο υπόβαθρο μηχανικής, ενώ το CPS γεννήθηκε από ένα πιο επιστημονικό υπόβαθρο (Tao et al., 2019). Οι δύο έννοιες μοιράζονται πολλά κοινά χαρακτηριστικά αφού και τα δύο αποτελούνται από ένα φυσικό και ένα ψηφιακό/κυβερνοστοιχείο, όπου το φυσικό είναι υπεύθυνο για την συλλογή δεδομένων που θα αναμεταδοθούν στον κυβερνοχώρο και ομοίως για την υλοποίηση εντολών και ενεργειών που δημιουργούνται στο ψηφιακό μετά από ανάλυση και λήψη αποφάσεων.

3.4. Σύγκριση των Ψηφιακών Διδύμων με το BIM και τα CPS

Μια πρώτη σύγκριση που μπορεί να γίνει αφορά στα συστατικά μέρη της κάθε έννοιας (Jiang et al., 2021). Τα ΨΔ και το BIM απαιτούν την ύπαρξη του ψηφιακού μοντέλου, ενώ τα CPS όχι. Αντίστοιχα, τα ΨΔ και τα CPS απαιτούν την ύπαρξη του φυσικού μοντέλου, ενώ το BIM όχι. Επίσης ένα μοντέλο BIM μπορεί να αναπαραστήσει κάτι που δεν υπάρχει ή δεν έχει

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

κατασκευαστεί ακόμα ενώ το ΨΔ πρέπει αντικατοπτρίζει σε πραγματικό χρόνο την υπάρχουσα κατάσταση του φυσικού ομολόγου του. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του ψηφιακού και του φυσικού μοντέλου είναι απαραίτητη στα ΨΔ και στα CPS. Τέλος τα ΨΔ απαιτούν δίδυμη σχέση μεταξύ του εικονικού και του φυσικού μοντέλου. Δηλαδή κάθε φυσικό μέρος μπορεί να βρει ένα αντίστοιχο εικονικό και αντίστροφα, κάθε εικονικό μέρος μπορεί να βρει ένα αντίστοιχο φυσικό. Στον κύκλο ζωής του έργου, τα περιβάλλοντα, οι συνθήκες, οι απαιτήσεις, τα φυσικά και εικονικά μέρη, τα δεδομένα, οι συνδέσεις και υπηρεσίες μπορούν να αλλάζουν ευέλικτα. Για αυτό το λόγο τα ΨΔ πρέπει να προσαρμόζονται στην αβεβαιότητα. Παρόλο που το φυσικό και το εικονικό μοντέλο μπορεί να μεταβληθούν και είναι δύσκολο να αντιγραφεί το φυσικό μέρος με 100% ακρίβεια στο ψηφιακό, μπορεί να βρεθεί μια δίδυμη σχέση μεταξύ τους.

Οι Jiang et al. πρότειναν τον Πίνακα 3.1 που συγκρίνει πια από τα συστατικά μέρη είναι προαιρετικά και πια απαραίτητα για την κάθε έννοια.

Πίνακας 3.1 : Σύγκριση ΨΔ, BIM και CPS ως προς τα συστατικά τους μέρη

Συστατικό Μέρος	BIM	CPS	Ψηφιακό Δίδυμο
Φυσικό Μοντέλο	Προαιρετικό	Απαραίτητο	Απαραίτητο
Ψηφιακό Μοντέλο	Απαραίτητο	Προαιρετικό	Απαραίτητο
Συνδέσεις μεταξύ φυσικών & εικονικών μοντέλων	Προαιρετικό	Απαραίτητο	Απαραίτητο
Δίδυμη σχέση μεταξύ του φυσικού μέρους και του εικονικού μοντέλου	Προαιρετικό	Προαιρετικό	Απαραίτητο

Ένα άλλο κριτήριο σύγκρισης είναι ο σκοπός τους. Δηλαδή, ενώ το BIM χρησιμοποιείται κυρίως στο σχεδιασμό στην κατασκευή και στη διαχείριση κτιρίων και υποδομών, το CPS ασχολείται με την ενσωμάτωση ψηφιακών και φυσικών στοιχείων σε διάφορα συστήματα και τα ΨΔ παρέχουν μια δυναμική και σε πραγματικό χρόνο αναπαράσταση φυσικών οντοτήτων για διάφορους τομείς εφαρμογής. Αυτές οι έννοιες μπορούν να αλληλοσυμπληρώνονται σε ορισμένα πλαίσια, όπως η χρήση ΨΔ για την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση της

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

απόδοσης ενός κτιρίου που δημιουργήθηκε με χρήση BIM ή τη χρήση CPS για τον έλεγχο και τη διαχείριση φυσικών διεργασιών σε μια δομή σχεδιασμένη από το BIM.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.2) γίνεται μία συνοπτική σύγκριση μεταξύ των ΨΔ, του BIM και των CPS σε διάφορες πτυχές :

Πίνακας 3.2 : Συνοπτική σύγκριση των ΨΔ, του BIM και των CPS

Πτυχές	BIM	CPS	Ψηφιακά Δίδυμα
Βασικά Συστατικά Μέρη	Ψηφιακό μοντέλο	Φυσικό μοντέλο, Ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ φυσικού – ψηφιακού μοντέλου	Ψηφιακό μοντέλο, Φυσικό μοντέλο, Ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ φυσικού – ψηφιακού μοντέλου, Δίδυμη σχέση μεταξύ φυσικού – ψηφιακού μοντέλου
Σκοπός	Σχεδιασμός, Κατασκευή και Διαχείριση κτιρίων και υποδομών	Ενσωμάτωση υπολογιστικών και φυσικών στοιχείων σε διάφορα συστήματα	Δημιουργία δυναμικών και σε πραγματικό χρόνο αντιγράφων φυσικών οντοτήτων για προσομοίωση και ανάλυση
Που εστιάζει	Συνεργατικός σχεδιασμός, τεκμηρίωση και συντονισμός έργων κατασκευής, Εκτίμηση κόστους και χρόνου	Έλεγχος και αυτοματισμός φυσικών διεργασιών με χρήση ψηφιακών τεχνολογιών	Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, ανάλυση και βελτιστοποίηση, Συντήρηση
Υποστηρικτικές Τεχνολογίες	Λεπτομερές 3D μοντέλο, CDE, IFC, COBie	WSN, IoT	3D μοντέλο, WSN, Data Integration & Analysis, IoT, Machine Learnig

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Εφαρμογής	Κατασκευαστικός Κλάδος / AECO	Βιομηχανία, Βιομηχανία 4.0, Σύστημα Υγείας, Μεταφορές, κ.α.	Βιομηχανία, Αεροδιαστημική, AECO, Έξυπνες Πόλεις, Σύστημα Υγείας, Αυτοκινητοβιομηχανία, κ.α.
Στάδια Κύκλου Ζωής Έργου	Σχεδιασμός Κατασκευή Λειτουργία Κατεδάφιση	Λειτουργία	Σχεδιασμός Κατασκευή Λειτουργία

CDE: *Common Data Enviroment*

IFC: *Industry Foundation Class*

COBie: *Construction Operation Building information enviroment*

WSN: *Wireless Sensor Network*

AECO: *Architects, Engineers, Construction & Operations*

4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Ψηφιακά Δίδυμα στον Κατασκευαστικό Κλάδο

4.1. Εισαγωγή

Στον τομέα των Αρχιτεκτόνων, των Πολιτικών Μηχανικής και των Κατασκευαστών (AEC), η εφαρμογή των ΨΔ βρίσκεται ακόμη, σε μεγάλο βαθμό στο στάδιο του πρωτοτύπου, ενώ δεν υπάρχουν καθιερωμένα πρωτόκολλα και πρότυπα για την ανάπτυξη μιας κοινής καθοδήγησης (Prengolato et al., 2022). Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν ότι ο βασικός παράγοντας για την εμφάνιση της έννοιας του ΨΔ στον Κατασκευαστικό Κλάδο είναι η Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών (BIM) ενώ άλλοι θεωρούν ως αιτία την υιοθέτηση των Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων (CPS). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για την σημασία των Ψηφιακών Διδύμων είναι αποτελούν ένα χρήσιμο και απαραίτητο εργαλείο για τον ψηφιακό μετασχηματισμό του κλάδου, για να βελτιώσει το κακό ρεκόρ του κλάδου στην ψηφιοποίηση (Brilakis et al., 2019).

Οι Sacks et al. ορίζουν τα κατασκευαστικά ψηφιακά δίδυμα ως ένα τρόπο για τη διαχείριση της παραγωγής στις κατασκευές, που αξιοποιεί τη ροή των δεδομένων από μία ποικιλία τεχνολογιών παρακολούθησης και τεχνητά έξυπνων λειτουργιών για την παροχή ακριβών πληροφοριών και την προληπτική ανάλυση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της παραγωγής. Το ψηφιακό δίδυμο ανταλλάσσει δεδομένα, πληροφορίες και γνώσεις μεταξύ φυσικών και εικονικών καταστάσεων για να απεικονίσει τη φυσική κατασκευή στον εικονικό κόσμο (Sacks et al., 2020).

Ο ορισμός για το Ψηφιακό Δίδυμο που προτάθηκε στο 2^ο κεφάλαιο μπορεί να τροποποιηθεί για να αντιπροσωπεύει ένα Κατασκευαστικό ΨΔ ως εξής :

Το Κατασκευαστικό Ψηφιακό Δίδυμο είναι ένα εικονικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει ένα φυσικό κτίριο ή υποδομή ή τεχνικό έργο. Αυτό το μοντέλο αντανακλά τη δομή, τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά του πραγματικού, επιτρέποντας την ανάλυση του αντικειμένου στο εικονικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Το Ψηφιακό Δίδυμο λειτουργεί παράλληλα με το πραγματικό αντικείμενο, επιτρέποντας την παρακολούθηση, την ανάλυση και την πρόβλεψη της απόδοσής και της κατάστασής του στη διάρκεια της ζωής του, καθώς και τη λήψη αποφάσεων βασισμένων σε πραγματικά δεδομένα.

4.2. Δημιουργία κατασκευαστικού ΨΔ

Με το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα αυτόματα και ευφυή συστήματα για τη βελτίωση του Κατασκευαστικού Κλάδου, τα Ψηφιακά Δίδυμα ολοένα και αυξάνουν τη δημοτικότητα τους ως οικονομικά αποδοτικές λύσεις για την ικανοποίηση των σύγχρονων αναγκών και απαιτήσεων των εμπλεκόμενων μερών. Οι Hu et al. προσδιορίζουν τις τέσσερις πτυχές και τις τεχνολογίες που απαιτούνται για τη δημιουργία και λειτουργία ενός ΨΔ για τον Κατασκευαστικό Κλάδο. Αυτές είναι οι εξής (Hu et al., 2024) :

- **Απόκτηση Δεδομένων** : Η διαδικασία απόκτησης δεδομένων ξεκινά με την εξαγωγή ακατέργαστων δεδομένων και καταλήγει με τη διαβίβαση των πληροφοριών σε έναν διακομιστή ή μια βάση δεδομένων που βασίζεται στο νέφος (cloud).
- **Επεξεργασία Δεδομένων** : Με τον τεράστιο όγκο των διαφορετικών δεδομένων που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο, υπάρχει η ανάγκη να διευκολυνθεί η μετατροπή και η επεξεργασία των ακατέργαστων δεδομένων ώστε να προκύψουν σημαντικές πληροφορίες για μοντελοποίηση και ανάλυση.
- **Μοντελοποίηση και Προσομοίωση** : Τα ΨΔ βασίζονται σε τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής πιστότητας και προσομοιώσεις για την παραγωγή μίας ολοκληρωμένης οπτικοποίησης για την αξιολόγηση συγκεκριμένων σεναρίων και την επαλήθευση των λύσεων που υπολογίζονται αυτόματα, ενώ παράλληλα συμπληρώνουν και άλλες σχετικές με την κατασκευή τεχνολογίες
- **Υποστήριξη Αποφάσεων** : Για να ενεργοποιήσουν τις δυνατότητες διαχείρισης και να διευκολύνουν τον κύκλο ζωής ενός έργου, τα κατασκευαστικά συστήματα βασίζονται σε λειτουργίες υποστήριξης αποφάσεων, όπως η παραγωγή σημασιολογικών λύσεων, οι οποίες δημιουργούνται με τη χρήση εργαλείων και τεχνικών που σχετίζονται με την τεχνητή νοημοσύνη και την επιστήμη των υπολογιστών γενικότερα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ορισμένες από τις σημαντικότερες τεχνολογίες και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός ΨΔ μίας κατασκευής.

4.2.1. Μέθοδοι δημιουργίας

Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός ΨΔ είναι οι εξής (Liu et al., 2023) :

- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element-based Method / FEM) : Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια από τις πιο δημοφιλείς αριθμητικές τεχνικές για την κατασκευή του ΨΔ. Το λογισμικό FEM αξιοποιείται για την κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου που αντιπροσωπεύει το εικονικό μέρος, ενώ οι παράμετροι λαμβάνονται από φυσικό. Μετά την επικύρωση του, το μοντέλο παράγει ένα τεράστιο σύνολο δεδομένων το οποίο στη συνέχεια θα επικοινωνεί με τα πραγματικά μετρημένα δεδομένα από τον φυσικό κόσμο. Το μοντέλο FEM έχει τη δυνατότητα, όχι μόνο να υπολογίζει τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής όπως μετατόπιση ή φορτία, αλλά και να συνδέεται με τους αισθητήρες στο φυσικό μέρος και να λαμβάνει υπόψιν του τις μετρήσεις τους στην ανάλυση. Ωστόσο, το μειονέκτημα των σημερινών μοντέλων FEM για την κατασκευή του ΨΔ είναι ότι απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και υπάρχουν περιορισμοί στο μέγεθος και κα στο χρονικό βήμα, που τα καθιστούν ακατάλληλα για περιβάλλοντα προσομοίωσης σε πραγματικό χρόνο.
- Προσέγγιση με βάση τα δεδομένα : Τα ΨΔ προκύπτουν και παραμετροποιούνται με βάση τα δεδομένα. Τα μοντέλα αυτά έχουν υψηλότερο επίπεδο ακρίβειας στην απεικόνιση του πραγματικού μέρους. Επίσης παρέχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι μηχανικής μάθησης (ML) και τεχνητής νοημοσύνης (AI) για την προσομοίωση φαινομένων που είναι δύσκολο να αναπαραχθούν με την τυπική μοντελοποίηση ή για την απόκτηση βαθύτερης κατανόησης της λειτουργίας ορισμένων συστημάτων. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση εξακολουθεί να απαιτεί την ανθρώπινη συμμετοχή για τη διευκόλυνση της αυτοματοποίησης.
- Ανακατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου με τη μέθοδο σάρωσης με λέιζερ : Η χρήση της τρισδιάστατης (3D) σάρωσης με λέιζερ έχει αναδειχθεί ως εργαλείο μέτρησης διότι παρέχουν μεγάλη ακρίβεια (αποκλίσεις κάτω του χιλιοστού), υψηλή ταχύτητα και χαμηλό κόστος. Τα συστήματα σάρωσης με λέιζερ μπορούν να ταξινομηθούν σε εναέρια, κινητά και επίγεια ανάλογα με τη θέση του αισθητήρα λέιζερ κατά τη διάρκεια της συλλογής δεδομένων. Παρουσιάζουν μεγάλες δυνατότητες για εργασίες επιθεώρησης σε σύγκριση με τις παραδοσιακές αφού επιτρέπει την ανίχνευση και ταξινόμηση των ζημιών στις προσόψεις, τον

εντοπισμό των κατασκευασμένων αποκλίσεων από τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της ανίχνευσης συγκρούσεων μεταξύ κατασκευών.

- Ανακατασκευή τρισδιάστατου μοντέλου με τη μέθοδο που βασίζεται σε μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (Unmanned Aerial Vehicle / UAV) : Το UAV αξιοποιεί την τεχνική ανίχνευσης με κάμερες, οι οποίες μπορούν να καταγράψουν ψηφιακές εικόνες υψηλής ανάλυσης. Παρόλο που η ταχεία, ακριβής και ογκώδης συλλογή δεδομένων που παρέχει η φωτογραμμετρία UAV την καθιστά δημοφιλή επιλογή για την ψηφιακή μοντελοποίηση του ΨΔ, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη ενός ενιαίου προτύπου για την αξιολόγηση της ακρίβειας της ποιότητας, της ακεραιότητας και της γεωμετρικής ακρίβειας των σημείων για αυτό το τρισδιάστατο μοντέλο. Επιπλέον, για τα τυφλά σημεία των αστικών υποδομών όπου το UAV δεν είναι σε θέση να λάβει τις εικόνες, πρέπει να εμπλακεί ανθρώπινο δυναμικό για τη χειροκίνητη λήψη.

4.2.2. Δημιουργία ΨΔ σε υφιστάμενη κατασκευή

Οι Brilakis et al., πρότειναν με τη σειρά τους πρότειναν την ακόλουθη μεθοδολογία για την δημιουργία του ΨΔ μίας υφιστάμενης κατασκευής. Ως σημείο εκκίνησης μπορεί να θεωρηθεί το Γεωμετρικό ΨΔ (ΓΨΔ). Ο όρος αυτός αναφέρεται σε γεωμετρικά ψηφιακά μοντέλα που είναι εμπλουτισμένα με σημασιολογικές πληροφορίες. Ωστόσο, υπάρχουν πολύ λίγες κατασκευασμένες εγκαταστάσεις με διαθέσιμα γεωμετρικά μοντέλα. Αυτό οφείλεται κυρίως σε δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι πολλές εγκαταστάσεις δεν έχουν προϋπάρχοντα ψηφιακά μοντέλα από την εποχή που κατασκευάστηκαν και ο δεύτερος είναι ότι το ψηφιακό μοντέλο σχεδιασμού δεν επικαιροποιήθηκε κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου, συνεπώς δεν έχουν καταγραφεί τυχόν τροποποιήσεις ή αλλαγές. Για την αυτόματη απόκτηση δεδομένων για τη δημιουργία ΓΨΔ χρησιμοποιούνται υπάρχουσες τεχνολογίες καταγραφής, όπως η σάρωση με λέιζερ ή η φωτογραμμετρία. Στη συνέχεια με τη χρήση ειδικών εργαλείων λογισμικού, από τα δεδομένα που συλλέγονται εξάγονται τα στοιχεία του μοντέλου. Οι Brilakis et al., στην εργασία τους επισημαίνουν οι μέθοδοι δημιουργίας Γεωμετρικών Ψηφιακών Διδύμων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες (Brilakis et al., 2020) :

1. Από κάτω προς τα πάνω / Bottom up : Οι μέθοδοι "από κάτω προς τα πάνω" ανιχνεύουν γεωμετρικά πρωταρχικά στοιχεία (γραμμές, επίπεδα, κ.λπ.) σε ένα νέφος σημείων, στη συνέχεια τα ομαδοποιούν και τα χαρακτηρίζουν σε γεωμετρία υψηλότερου επιπέδου,

ακολουθούμενες από την ανίχνευση χωρικών και λειτουργικών σχέσεων αντικειμένων που οδηγούν σε ένα γεωμετρικό μοντέλο.

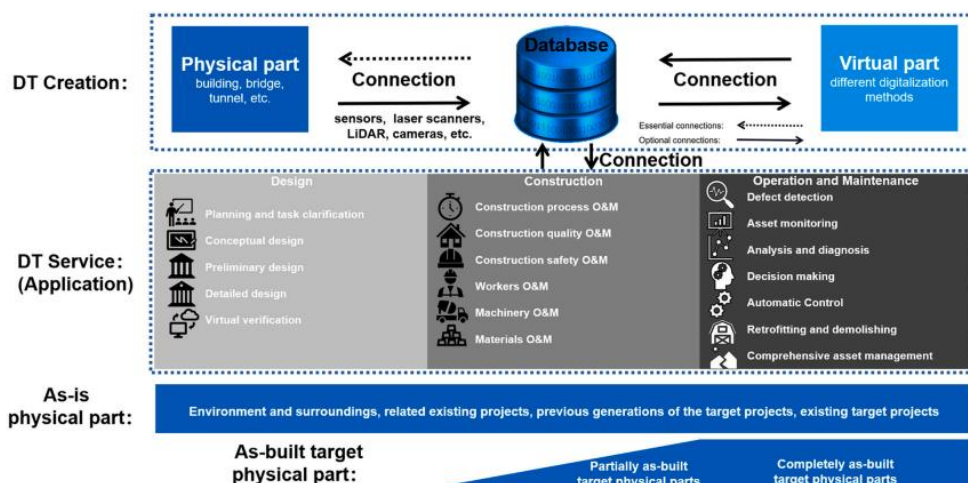
2. Από πάνω προς τα κάτω / Top down : Οι μέθοδοι "από πάνω προς τα κάτω" υποθέτουν ότι οι κλάσεις αντικειμένων είναι μοναδικά διακριτές μέσω της μορφής τους και των σχέσεων τους με άλλα αντικείμενα, παρά από τα δικά τους χαρακτηριστικά. Το νέφος σημείων που συλλέγεται τμηματοποιείται σε ιεραρχικά μικρότερα σύνολα (πχ κτίριο σε ορόφους, σε δωμάτια κ.λπ.), ακολουθούμενο από ο σχηματισμός κλιμακωτών υποθέσεων σχετικά με το πού βρίσκονται οι τύποι αντικειμένων (πχ τοίχος) και εξαρτημάτων (πχ πόμολο πόρτας) και μια κατευθυνόμενη αναζήτηση που αποδίδει τα επιθυμητά αντικείμενα και τις σχέσεις τους, δηλαδή τα μοντέλο.

4.3. Εφαρμογές ΨΔ στον Κατασκευαστικό Κλάδο

Οι εφαρμογές των ΨΔ στον κατασκευαστικό κλάδο υπερβαίνουν τα κτίρια με ενσωματωμένα και αυτοματοποιημένα συστήματα, και πετυχαίνουν το συγχρονισμό και το συντονισμό μεταξύ του φυσικού και του ψηφιακού μέρους. Ένα ΨΔ λειτουργεί με βάση των ενημερώσεων σε πραγματικό χρόνο και της αμφίδρομης επικοινωνίας. Παρέχει έτσι ένα δυναμικό μοντέλο, το οποίο είναι καλύτερο να δημιουργείται από το στάδιο της σύλληψης και του σχεδιασμού. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να γίνουν αλλαγές στο εικονικό μοντέλο, το οποίο με τη σειρά του επιτρέπει τον εύκολο έλεγχο και την παρακολούθηση της κατασκευής όταν αυτή ξεκινήσει. Επομένως, η δημιουργία ενός ΨΔ στο αρχικό στάδιο ενός έργου εξασφαλίζει στενό συγχρονισμό και τη βέλτιστη απόδοση του κτιρίου. Ωστόσο, οι λειτουργίες του κτιρίου και η διαχείριση του κύκλου ζωής του μπορούν επίσης να βελτιστοποιηθούν με την χρήση της τεχνολογίας των ΨΔ. Τα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες που είναι ενσωματωμένοι στην κατασκευή συλλέγονται και μεταφέρονται στο ΨΔ για επεξεργασία και ανάλυση. Περιλαμβάνει επίσης χαρακτηριστικά όπως BIM, 3D & 2D μοντέλα, χρονοδιαγράμματα, συμβάσεις, κατασκευαστικά έγγραφα, λειτουργικά δεδομένα και δεδομένα από την τεχνολογία ΑΙ και τη μηχανική μάθηση. Ο συγχρονισμός αυτών των χαρακτηριστικών επιτρέπει στους διαχειριστές να έχουν πρόσβαση, να ελέγχουν, να εντοπίζουν βλάβες και να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με τα διάφορα συστήματα, τους χώρους εργασίας και γενικότερα με τη διαχείριση και τη λειτουργία της κατασκευής (Madubuike et al., 2022). Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι τα ΨΔ συμμετέχουν σε όλα τα

στάδια της ζωής ενός έργου, δηλαδή στο σχεδιασμό, στην κατασκευή και στη λειτουργία και στη συντήρηση του.

Με βάση την ανάλυση των Jiang et al. (Σχήμα 4.1), ένα ολοκληρωμένο Ψηφιακό Δίδυμο ενός κατασκευαστικού έργου, ξεκινάει με τη δημιουργία του. Στη συνέχεια το πεδίο εφαρμογής τους χωρίζεται με βάση τις υπηρεσίες που προσφέρουν (DT Services) και με βάση το φυσικό μέρος (Physical Part). Πιο συγκεκριμένα χωρίζονται με βάση τον κύκλο ζωής του έργου σε σχεδιασμό, κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση από την άποψη των υπηρεσιών, και στα “ως - είναι” (as-is) και ως – κατασκευάστηκαν” (as-built) από την άποψη των φυσικών μερών (Jiang et al., 2021).



Σχήμα 4.1 : Εφαρμογές των ΨΔ στον Κατασκευαστικό Κλάδο, Jiang et al., 2021

4.3.1. ΨΔ Φυσικών Μερών / Physical Parts DT

Τα ΨΔ των υφιστάμενων υποδομών, του περιβάλλοντος χώρου και της γύρω περιοχής, τα οποία αποτελούν τα “ως - είναι” (as-is) φυσικά μέρη, μπορούν να δημιουργηθούν καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου. Τα ΨΔ των “ως – κατασκευάστηκαν” (as-built) φυσικά μέρη, είναι δυνατόν να υπάρχουν είτε στο στάδιο του σχεδιασμού, όπου τα έργα-στόχοι (Target Physical Parts) δεν υπάρχουν, ή στο στάδιο της κατασκευής, όπου τα έργα-στόχοι κατασκευάζονται και ολοκληρώνονται μερικώς (Partially as-built Physical Parts). Στο στάδιο Λειτουργίας & Συντήρησης τα έργα-στόχοι είναι πλήρως ολοκληρωμένα (Completely as-built Physical Parts). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.1) παρουσιάζονται οι κατηγορίες των ΨΔ

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Φυσικών Μερών και σε πιο το στάδιο του Κύκλου Ζωής του Νέου Έργου μπορούν να δημιουργηθούν.

Πίνακας 4.1 : Οι κατηγορίες των ΨΔ Φυσικών Μερών και το στάδιο του κύκλου ζωής του έργου

		Κύκλος Ζωής του Έργου		
		Σχεδιασμός	Κατασκευή	Λειτουργία & Συντήρηση
ΨΔ Φυσικού Μέρους	ως- είναι / as-is	✓	✓	✓
	Μερικώς ως- κατασκευάστηκε / Partially as- build	✓	✓	
	Πλήρως ως- κατασκευάστηκε / Completely as- build			✓

4.3.2. Υπηρεσίες ΨΔ / DT Services

Οι υπηρεσίες που παρέχουν τα ΨΔ έχουν εφαρμογή σε όλα τα στάδια της ζωής μίας κατασκευής. Οι κυριότερες παρουσιάζονται παρακάτω :

1. Φάση Σχεδιασμού

- **σχεδιασμός και αποσαφήνιση των καθηκόντων :** οι σχεδιαστές μπορούν να σχεδιάσουν το έργο με βάση τα ΨΔ για να λάβουν αποφάσεις, να καθορίσουν ορισμένους περιορισμούς και να παρέχουν το συνολικό πλαίσιο και το σχέδιο ενός έργου. Επίσης μπορούν να καθορίσουν με σαφήνεια τα καθήκοντα των εμπλεκόμενων, κάτι που θα διευκολύνει στο μελλοντικό σχεδιασμό.
- **εννοιολογικός / προκαταρκτικός / λεπτομερής σχεδιασμός :** το ΨΔ μπορεί να ενσωματώσει μια ποικιλία δεδομένων από συναφή υφιστάμενα έργα, το περιβάλλον, τον περιβάλλοντα χώρο, τα έγγραφα σχεδιασμού και άλλες πηγές. Το ίδιο σύνολο

μοντέλων μπορεί να μεταφερθεί σε όλα τα στάδια σχεδιασμού, γεγονός που μπορεί να διευκολύνει τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και την καλή συνεργασία. Όμως, το ΨΔ πρέπει να αξιολογείται και να αναβαθμίζεται συνεχώς από τα έγγραφα σχεδιασμού και τα δεδομένα που λαμβάνονται στον φυσικό κόσμο.

- **εικονική επαλήθευση :** αξιοποιώντας δεδομένα από πολλαπλές πηγές, ο σχεδιασμός μπορεί να αξιολογηθεί με τη χρήση ΨΔ για τη μείωση τυχών ελαττωμάτων, αστοχιών και τις ασυνεπειών μεταξύ του πραγματικού και του αναμενόμενου σχεδιασμού, χρησιμοποιώντας προσομοίωση και ανάλυση στον εικονικό αντί στον φυσικό κόσμο. Έτσι, μπορεί να αναθεωρηθεί, να βελτιωθεί, να ενημερωθεί και να επαληθεύεται, εξοικονομώντας χρόνο, χρήματα και κατανάλωση εργασίας.

2. Φάση Κατασκευής

- **Παρακολούθηση και διαχείριση της προόδου κατασκευής :** Για την πρόοδο της κατασκευής, οι τεχνικές οπτικοποίησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την λεπτομερή παρακολούθηση της προόδου της κατασκευής χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση βασισμένη σε αντικείμενα. Οπτικοποιούνται και συγκρίνονται τα σχεδιασμένα μοντέλα με φωτογραφίες όπως αυτά κατασκευάστηκαν, και ελέγχεται αυτόματα η κατάσταση της προόδου της κατασκευής. Μια προσέγγιση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση του αμφίδρομου συντονισμού μεταξύ εικονικών μοντέλων. Ένα σύστημα φυσικής κατασκευής και πρωτοτύπων μπορεί να δημιουργηθεί για τη βελτίωση της παρακολούθησης και του ελέγχου των εγκαταστάσεων κατασκευής σε πραγματικό χρόνο, την παρακολούθηση των αλλαγών και των ενημερώσεων του μοντέλου, την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του σχεδιασμού και του εργοταξίου και την τεκμηρίωση σε πραγματικό χρόνο της κατάστασης όπως κατασκευάστηκε. Στην παρακολούθηση και διαχείριση της προόδου των κατασκευών, τα ΨΔ είναι ζωτικής σημασίας.
- **Παρακολούθηση και διαχείριση της ποιότητας της κατασκευής :** Για την παρακολούθηση και τη διαχείριση της ποιότητας των κατασκευών, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κατάλληλο σύστημα επεξεργασίας και να βοηθήσει στον αυτοματοποιημένο και ισχυρό έλεγχο ποιότητας, συμπεριλαμβανομένης της εκτίμησης

της απόδοσης. Χωρική ανίχνευση τυχών αλλαγών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη σύγκριση των τρισδιάστατων μοντέλων όπως κατασκευάστηκαν από δεδομένα σάρωσης λέιζερ με τα μοντέλα όπως σχεδιάστηκαν, για την αποδοτική ανίχνευση και διαχείριση. Λεπτομέρειες από την επί τόπου επιθεώρηση και εισηγήσεις του επιθεωρητή καταγράφονται αυτόματα και αντιστοιχίζονται σε αντικείμενα για να καταστεί δυνατός ο εντοπισμός τυχών αποκλίσεων μεταξύ της κατάστασης του αντικειμένου όπως κατασκευάστηκε και της κατάστασης του αντικειμένου όπως σχεδιάστηκε. Σε αυτό τομέα, η ακρίβεια του ΨΔ παίζει σημαντικό ρόλο στη σύγκριση της πραγματικών ποιότητας με την ποιότητα-στόχο.

- Παρακολούθηση και διαχείριση της ασφάλειας της κατασκευής : Μπορεί να δημιουργηθεί ένα πλαίσιο έξυπνου εργοταξίου για τη διαχείριση της ασφάλειας, επιτρέποντας τη δημιουργία προειδοποιήσεων και τον έλεγχο του προσωπικού, των μηχανικών και άλλων κινδύνων στο εργοτάξιο. Ωστόσο η ανάπτυξη ΨΔ στον συγκεκριμένο τομέα βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια.
- Παρακολούθηση και διαχείριση των εργαζομένων : Για τη διαχείριση των εργαζομένων στο εργοτάξιο, χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ΨΔ, όπως ένα σύστημα ανάλυσης της τροχιάς των εργαζομένων (για την κατανόηση των κινήσεων των εργαζομένων σε δυναμικά περιβάλλοντα κατασκευών) ή ένα εκπαιδευτικό περιβάλλον όπου οι εργαζόμενοι μπορούν να εξασκηθούν στην εκτέλεση εργασιών (για την παρακολούθηση της κινηματικής του σώματος και της εμπλοκής με τους φυσικούς πόρους των κατασκευών). Αυτά παρέχουν πληροφορίες και δεδομένα για την αποτελεσματικότερη και ασφαλέστερη διαχείριση των εργαζομένων.
- Παρακολούθηση και διαχείριση των μηχανημάτων : Τα ΨΔ μπορούν να παρακολουθούν, να διαχειρίζονται και να ελέγχουν τα μηχανήματα για να εξασφαλίζουν την αποτελεσματική, ακριβή και ασφαλή κατασκευή. Η συμβατότητα μεταξύ των αισθητήρων και μηχανημάτων και η έγκαιρη μετάδοση δεδομένων είναι πολύ σημαντικές. Επίσης, οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση δεν πρέπει να επηρεάζουν την κανονική λειτουργία του μηχανήματος.

- Παρακολούθηση και διαχείριση των υλικών : Για τη διαχείριση των υλικών κατασκευής, χρησιμοποιείται ένα ΨΔ το οποίο μπορεί να παρακολουθεί με ακρίβεια και να ταιριάζει τις δυναμικές ανάγκες του εργοταξίου με την κατάσταση αποθεμάτων και εφοδιασμού των υλικών. Βοηθά τους εργολάβους να βελτιώνουν και να παρακολουθούν τις επιτόπιες καταστάσεις και να εντοπίζουν έγκαιρα διαφορές μεταξύ των πραγματικών και των προγραμματισμένων απαιτήσεων υλικών, και να ειδοποιούν τους προμηθευτές, εάν αυτό είναι απαραίτητο. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτών των λειτουργιών προϋποθέτει ένα σύνολο ιδανικών και απλών καταστάσεων, και δεν αντανακλά πλήρως τη σύνθετη αλυσίδα εφοδιασμού στο εργοτάξιο.

3. Φάση Λειτουργίας & Συντήρησης

- Ανίχνευση ελαττωμάτων : Εξετάζοντας τις γεωμετρικές πληροφορίες, τα ΨΔ παρέχουν έναν οπτικό και αποτελεσματικό τρόπο για την επιθεώρηση και την ανίχνευση ελαττωμάτων με την επεξεργασία δεδομένων, όπως νέφη σημείων, ψηφιακές εικόνες, δεδομένα από αισθητήρες και σαρωτές λέιζερ, κάμερες, συσκευές θερμικής απεικόνισης και άλλες συσκευές.
- Παρακολούθηση της υποδομής : Εξετάζοντας τις γεωμετρικές και μη γεωμετρικές πληροφορίες, τα ΨΔ αντικατοπτρίζουν και αποθηκεύουν την πραγματική κατάσταση της υποδομής στον φυσικό κόσμο που καταγράφεται με τη μετάδοση δεδομένων από αισθητήρες για να βοηθήσουν τους διαχειριστές των εγκαταστάσεων στη λήψη αποφάσεων. Επιπλέον, παρέχουν ένα οπτικό περιβάλλον για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των υποδομών. Τέλος είναι πολύ σημαντική η επιλογή και η αποθήκευση δεδομένων, γι' αυτό και απαιτείται ο κατάλληλος σχεδιασμός της δομής της βάσης δεδομένων.
- Ανάλυση και διάγνωση : Εξετάζοντας τις γεωμετρικές πληροφορίες, τα ΨΔ παράγουν υψηλής πιστότητας τρισδιάστατα μοντέλα για προσομοίωση και μηχανικούς υπολογισμούς. Εκτός από την ανάλυση της τρέχουσας κατάστασης των κατασκευών, χρησιμοποιούνται επίσης για την πρόβλεψη της κατάστασης στο μέλλον. Επιπλέον, με βάση τα μοντέλα ΨΔ και τα συλλεγμένα δεδομένα, οι υπολογισμοί και αναλύσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν για την αξιολόγηση και διάγνωση του φυσικού μέρους.

Σε αυτές τις περιπτώσεις, λαμβάνουν δεδομένα από τα φυσικά μέρη και τα μεταφέρουν προς ανάλυση και αξιολόγηση στο εικονικό περιβάλλον. Τέλος, έχει αρχίσει να εφαρμόζεται ο συνδυασμός ΨΔ και πεπερασμένων στοιχείων σε διάφορες περιπτώσεις, και έχει μεγάλες προοπτικές και δυνατότητες.

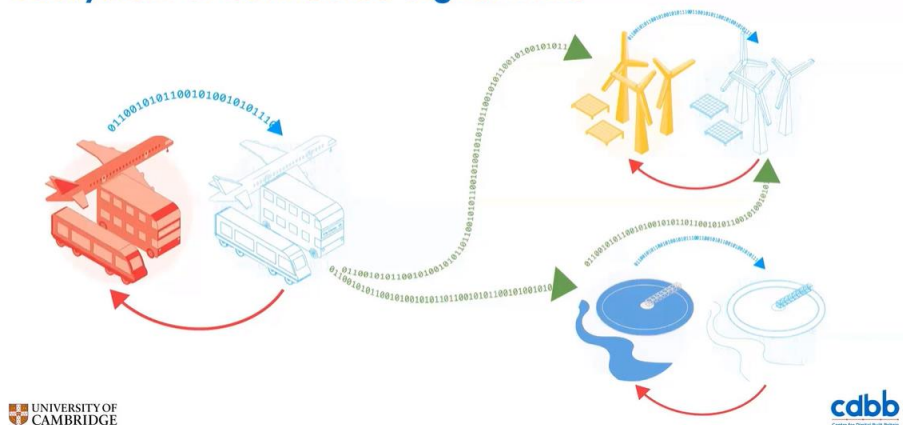
- **Λήψη αποφάσεων :** Επειδή τα ΨΔ αναπαριστούν τα φυσικά μέρη ψηφιακά μπορούν να βοηθήσουν στη λήψη αποφάσεων, δοκιμάζοντας πρώτα στον εικονικό κόσμο, και θα δύσκολο να διεξαχθούν στον πραγματικό. Η λογική διαδικασία λήψης αποφάσεων βασίζεται σε ολοκληρωμένα δεδομένα και δείκτες, που προκύπτουν από αισθητήρες, συσκευές IoT, κτλ.
- **Αυτόματος έλεγχος :** Εκτός από την παρακολούθηση, τα ΨΔ μπορούν επίσης να λαμβάνουν δεδομένα από εικονικά μέρη, και με βάση αυτά να προβούν αυτόματα σε ενέργειες για τον χειρισμό των φυσικών εξαρτημάτων με τη χρήση ενεργοποιητών (actuators). Εξασφαλίζουν έτσι την ομαλή λειτουργία της υποδομής και την προσαρμόζουν όποτε αυτό χρειάζεται.
- **Ανακαίνιση και κατεδάφιση :** Τα ΨΔ παρέχουν ένα μοντέλο της υποδομής όπως είναι, με σκοπό την ολοκληρωμένη κατανόηση πρώτου αυτή να ανακαινιστεί / κατεδαφιστεί. Διεξάγονται σύνθετες προσομοιώσεις και ολοκληρωμένες αναλύσεις στον εικονικό αντί στον φυσικό κόσμο για την επίτευξη του κατάλληλου σχεδίου για την ανακαίνιση, και να μειώσει τον χρόνο, την εργασία και τα χρήματα που καταναλώνονται. Με βάση τα ΨΔ ενός υφιστάμενου έργου μπορούν επίσης να διεξαχθούν έργα ανακατασκευής και επέκτασης. Τέλος μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση και τον προγραμματισμό της κατεδάφισης μιας υποδομής.
- **Ολοκληρωμένη διαχείριση της υποδομής :** Τα ΨΔ μπορούν να αξιοποιούν τεχνολογίες, όπως IoT, αισθητήρες, GIS, σάρωση με λέιζερ και φωτογραμμετρία, για την παρακολούθηση γεωμετρικών και μη γεωμετρικών πληροφοριών και τον έλεγχο και τον χειρισμό των φυσικών τμημάτων για να πραγματοποιούν ολοκληρωμένη διαχείριση των υποδομών και να συμβάλουν στην πρόληψη καταστροφών και τον μετριασμό κινδύνων. Μπορούν να βοηθήσουν στην συνολική εκτίμηση του κινδύνου, στην παρακολούθηση της δομικής κατάστασης της υποδομής πριν και μετά από ένα φυσικό φαινόμενο και

στην αυτοδιάγνωση της και έγκαιρη προειδοποίηση και διαχείριση του κινδύνου. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής συχνότητας εμφάνισης τέτοιων καταστροφών είναι δύσκολο να αποδειχθεί στην πράξη η αξιοπιστία των ΨΔ.

4.4. Εθνικό Ψηφιακό Δίδυμο / National Digital Twin

Μετά από σύσταση της Εθνικής Επιτροπής Υποδομών του Ηνωμένου Βασιλείου, το Κέντρο “Center for Digital Built Britain” (CDBB) πρότεινε την έννοια ενός “Εθνικού Ψηφιακού Διδύμου” (NDT) για να επιτρέψει καλύτερα αποτελέσματα στον Κατασκευαστικό Κλάδο. Προβλέπεται να είναι ένα οικοσύστημα από συνδεδεμένα ΨΔ και όχι ένα μονολιθικό ΨΔ της χώρας (Σχήμα 4.2). Αυτή η οργανική προσέγγιση του “οικοσυστήματος” αποσκοπεί στην καλύτερη αναπαράσταση της πραγματικής φύσης του συστήματος των συστημάτων εντός του δομημένου. Πέρα από αυτή τη συστημική άποψη του δομημένου περιβάλλοντος, το NDT θα απαιτήσει ασφαλή, ανθεκτική ανταλλαγή δεδομένων εντός και πέρα από τα οργανωτικά όρια. Αυτό θα περιλαμβάνει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του ψηφιακού και του φυσικού δίδυμου, καθώς και τη σύνδεση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών ΨΔ (CDBB, 2022).

Ecosystem of connected digital twins



Σχήμα 4.2 : Η διασύνδεση των διάφορων ΨΔ, CDBB, 2022

Το CDBB επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός Πλαισίου Διαχείρισης Πληροφοριών (Information Management Framework / IMF) για τη διευκόλυνση της ασφαλούς ανταλλαγής δεδομένων, η οποία θα επιτρέψει στη συνέχεια τη δημιουργία του NDT. Τα οφέλη αυτής της προσέγγισης αναμένονται σε τέσσερις βασικούς τομείς: οφέλη για την κοινωνία, οφέλη για την οικονομία, οφέλη για τις επιχειρήσεις και οφέλη για το περιβάλλον. Οι αρχές που

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

δημοσιεύθηκαν από το CDBB, γνωστές ως "The Gemini Principles" (Σχήμα 4.3) συνοψίζουν τις αξίες που θα καθοδηγήσουν την ανάπτυξη τόσο του NDT όσο και του IMF (CDBB, 2022).



Σχήμα 4.3 : Οι αρχές Gemini (The Gemini Principles), CDBB, 2022

Ο σκοπός της ιδέας του NDT είναι να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζονται, κατασκευάζονται λειτουργούνται και ενσωματώνονται οι φυσικές, κοινωνικές και οικονομικές υποδομές και οι υπηρεσίες που αυτές παρέχουν ώστε να δημιουργηθεί μια “Ψηφιακά Δομημένη Χώρα” (CDBB, 2022). Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.4 οι αλλαγές αυτές αφορούν στα εξής :

- Σχεδιασμός (Design) : χρήση βέλτιστων πρακτικών, ασφαλή διαχείριση πληροφοριών και ψηφιακές τεχνικές για απόκτηση δεδομένων από την αρχή και το σχεδιασμό κτιρίων και υποδομών με καλύτερες επιδόσεις.
- Κατασκευή (Build) : αξιοποίηση νέων και αναδυόμενων τεχνολογιών και τεχνικών ψηφιακής κατασκευής, διαχείρισης πληροφοριών και κατασκευής για τη βελτίωση της ασφάλειας, της παραγωγικότητας και της ποιότητας κατά τη διάρκεια της κατασκευής

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

- Λειτουργία (Operate) : χρήση αποτελεσματικής διαχείρισης πληροφοριών για τη μετατροπή των επιδόσεων του περιβάλλοντος κατασκευής και των υπηρεσιών που παρέχει
- Ενσωμάτωση (Intergrate) : κατανόηση για το πώς το κατασκευαστικό περιβάλλον μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα ζωής των πολιτών και πως να χρησιμοποιηθούν οι πληροφορίες αυτές στο σχεδιασμό και στην κατασκευή των υποδομών, στη λειτουργία και στη διασύνδεση των υπηρεσιών που παρέχουν.

This is Digital Built Britain



Σχήμα 4.4 : Η ιδέα της “Ψηφιακά Δομημένης Βρετανίας”, CDBB, 2022

Μια ψηφιακά δομημένη πόλη ή χώρα :

- κατανοεί ποιες πληροφορίες απαιτούνται για να καταστεί δυνατή η καλύτερη οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική αξία του δομημένου μας περιβάλλοντος.
- αξιοποιεί τις νέες και αναδύμενες ψηφιακές κατασκευαστικές και κατασκευαστικές δεξιότητες και τεχνολογίες για τη μείωση του κόστους και την αύξηση της παραγωγικότητας.
- υπερασπίζεται τον ανθρωποκεντρικό σχεδιασμό των υποδομών και των υπηρεσιών που παρέχουν.
- αναπτύσσει νέες επιχειρηματικές και εξαγωγικές ευκαιρίες σταδιοδρομίας.

4.5. Εργοστάσιο Ψηφιακών Διδύμων / Digital Twin Factory

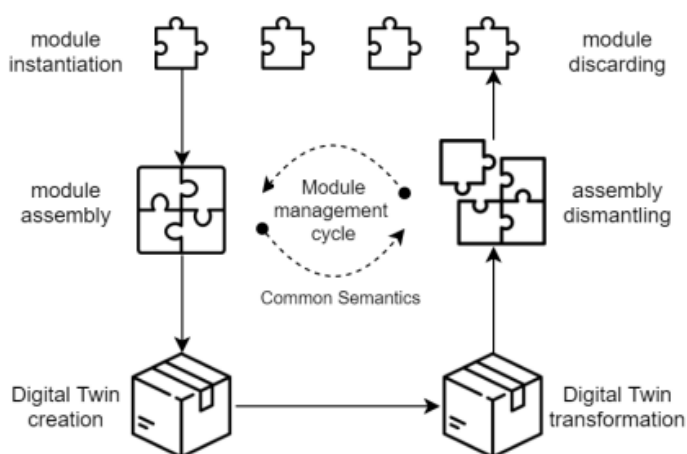
Οι Boje et al., εισήγαγαν την έννοια του "εργοστασίου ψηφιακών δίδυμων" ή "Digital Twin Factory" (DTF) ώστε, να γίνει κατανοητό το τι αναμένεται κατά την εφαρμογή ΨΔ στην πράξη, και πώς αυτό θα μπορούσε να γίνει με πιο τυποποιημένο και αυτοματοποιημένο τρόπο. Παρακάτω αναπτύσσονται οι διάφορες συγκεκριμένες πτυχές που είναι σημαντικές για την εφαρμογή των ΨΔ στην κατασκευή και στα στάδια λειτουργίας των υποδομών του κατασκευαστικού περιβάλλοντος, και ως εκ τούτου υπαγορεύουν τον τρόπο με τον οποίο θα δημιουργηθεί το DTF (Boje et al., 2021). Αυτές περιορίζονται σε:

Διαδικαστικές απαιτήσεις για τη δημιουργία ενός ΨΔ : κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ένα ΚΨΔ (CDT) μπορεί να αναπτυχθεί στην πράξη σε φυσικά εργοτάξια, και πώς συγκρίνεται με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες BIM και CPS. Επιπλέον, οι συσκευές και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση το εργοτάξιο όπως τα δίκτυα αισθητήρων, σάρωση λέιζερ και τροφοδοσία φωτογραφιών/βίντεο έχουν γίνει πιο προσιτές και φιλικές προς τον χρήστη και χρησιμοποιούνται όλο και συχνότερα από τους επαγγελματίες του κατασκευαστικού κλάδου. Η πρόκληση παραμένει στο να αποφασιστεί ποιοι τύποι θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διάρκεια κατασκευής. Αυτό ποικίλλει ανάλογα με το εργοτάξιο (πχ τοποθεσία, μέγεθος, κλπ.), το χρονοδιάγραμμα κατασκευής, το απαιτούμενο τελικό επίπεδο ποιότητας και την υγεία και την ασφάλεια των εργαζομένων στην κατασκευή και των κοντινών τοπικών κοινοτήτων. Τέλος, οι τύποι των συσκευών που θα χρησιμοποιηθούν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του μελλοντικού έργου πρέπει να καθοριστούν σε αυτό το στάδιο.

Τεχνικές απαιτήσεις για τη δημιουργία ενός ΨΔ : η διαχείριση των δυναμικών δεδομένων από το εργοτάξιο, η διασύνδεση των συσκευών του IoT και η σύνδεση των δεδομένων με το BIM, καθώς και η διασφάλιση της συνοχής μεταξύ των διαφόρων δεδομένων που εμπλέκονται. Ωστόσο, αυτό θέτει σοβαρές προκλήσεις όσον αφορά το ποιος αναπτύσσει αρχικά το ΨΔ, πού αποθηκεύεται, ποιος μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτό (ιδιοκτησία, ασφάλεια στον κυβερνοχώρο) και σε ποιες μορφές φυλάσσεται. Καθώς το ΨΔ προβλέπεται να διατρέχει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, τα δεδομένα πρέπει να μετατοπιστούν από την ευθύνη του σχεδιαστή στον πελάτη. Τα σχέδια της κατασκευής πρέπει να είναι πλήρη και επικαιροποιημένα όσον αφορά τα δεδομένα και τις σημασιολογικές έννοιες, καθώς και να ενσωματώνουν τον εξοπλισμό αντίχενωσης του σταδίου λειτουργίας. Το ΨΔ πρέπει να

εξελίσσεται από τη φάση δημιουργίας (που συμπίπτει με το στάδιο κατασκευής) σε μια φάση όπως κατασκευάστηκε, χρησιμοποιώντας κοινή σημασιολογία και παρόμοια μορφή δεδομένων. Αυτό θα μπορούσε να επιτρέψει πιο δυναμικό ορισμό των μοντέλων σε κάθε στάδιο και τρόπους προσαρμογής της σημασιολογίας ανάλογα με τον τύπο του κτιρίου, εγκατεστημένους αισθητήρες και τις απαιτούμενες υπηρεσίες σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του.

Αρθρώσιμότητα των ΨΔ : Ο τελικός στόχος των ΨΔ είναι να παρέχουν διαφορετικές υπηρεσίες για να βοηθήσουν στη διαχείριση και βελτιστοποίηση του κύκλου ζωής. Οι υπηρεσίες αυτές σε μεγάλο βαθμό αναμένεται να αλλάξουν και να εξελιχθούν κατά τη διάρκεια και μετά το στάδιο της κατασκευής. Για αυτό το λόγο τα ΨΔ να είναι διαλειτουργικά και επεκτάσιμα. Λαμβάνοντας υπόψη το πολύπλοκο σύστημα που αντιπροσωπεύει, τα διάφορα μέρη που το συνθέτουν θα πρέπει να είναι αρθρωτά και ανεξάρτητα από το σύνολο και μεταξύ τους. Κάθε ενότητα πρέπει να ενσωματώνει συγκεκριμένα μοντέλα και να παρέχει μια συγκεκριμένη υπηρεσία. Επιπλέον, πρέπει να είναι δυναμικά να προσαρμόζονται στις επιτόπιες συνθήκες, ανεξάρτητα από τον τύπο της υποδομής, εξασφαλίζοντας τη συνοχή των πληροφοριών και τη δυνατότητα μεταφοράς, χωρίς να περιορίζει τον μελλοντικό κύκλο ζωής. Ενώ η αρθρωτή προσέγγιση φαίνεται λογική και βολική, η πρόκληση έγκειται στην επιλογή μιας κοινής πλατφόρμας με ένα σύνολο σημασιολογίας που να είναι σε θέση να ενσωματώσει ευρέως αποδεκτά πρότυπα δεδομένων του κλάδου. Μια αρθρωτή διαδικασία ανάπτυξης αναπαρίσταται στο Σχήμα 4.5.

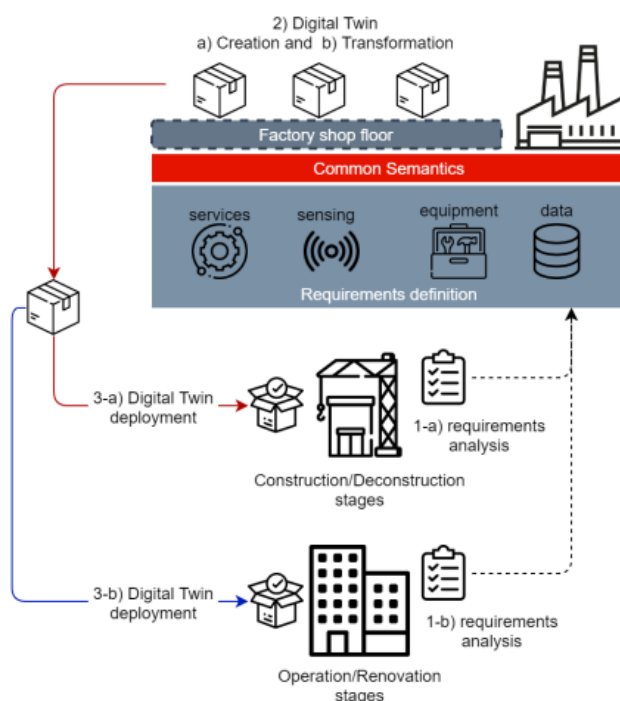


Σχήμα 4.5 : Αρθρωτή διαδικασία ανάπτυξης ενός ΨΔ, Boje et al., 2021

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Επικοινωνία μεταξύ των ΨΔ : Καθώς το ΨΔ προβλέπεται να συνδέεται με πράγματα του πραγματικού κόσμου και να είναι ένα ψηφιακό αντίγραφο που συνδέεται με ένα φυσικό στοιχείο, η επικοινωνία του με διασυνδεδεμένες συσκευές πραγματοποιείται με τη χρήση τυποποιημένων πρωτοκόλλων IoT, ενώ με τα άλλα ΨΔ πρέπει να γίνεται σε διαφορετικό, υψηλότερο επίπεδο. Ένας άλλος βαθμός πολυπλοκότητας προκύπτει από τις ανταλλαγές μεταξύ ΨΔ από διαφορετικούς τομείς. Αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη διαθεσιμότητα ενός κοινού σημασιολογικού επιπέδου, για την τυπική δομημένη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ διαδικτυακών υπηρεσιών και με τη χρήση δημοφιλών μορφοτύπων για την τυπική μεταφορά δομημένων πληροφοριών μεταξύ διαδικτυακών υπηρεσιών.

Το βασικό πλαίσιο για την δημιουργία και την εφαρμογή της έννοιας του "εργοστασίου ψηφιακών δίδυμων" για τον κατασκευαστικό κλάδο που πρότειναν οι Boje et al., παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6. Αναλυτικότερα, λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές και τους περιορισμούς, τα βήματα εξετάζονται σε πολλαπλά στάδια του κύκλου ζωής της υποδομής. Αυτά έχουν ομαδοποιηθεί για λόγους απλότητας σε δύο κατηγορίες, οι οποίες είναι α) Κατασκευή / Αποδόμηση (υποθέτοντας ένα δυναμικό περιβάλλον) και β) Λειτουργία / Ανακαίνιση (υποθέτοντας ένα πιο στατικό περιβάλλον).



Σχήμα 4.6 : Το "Εργοστάσιο Ψηφιακού Διδύμου", Boje et al., 2021

1. Ανάλυση απαιτήσεων : Αυτές οι απαιτήσεις πρέπει να εξεταστούν από το πρίσμα της δημιουργίας και διαχείρισης ενός ΨΔ, εξετάζοντας τις αρχικά διαθέσιμα σύνολα δεδομένων, τις απαιτούμενες υπηρεσίες για τις επιχειρηματικές διαδικασίες, τους προτιμώμενους τύπους αισθητήρων και την τοποθεσία εξοπλισμού, αλλά και τις προδιαγραφές δεδομένων.
2. Ψηφιακό Δίδυμο : αφού ικανοποιηθούν και επικυρωθούν οι απαιτήσεις μπορεί να ξεκινήσει η αρχική ενσάρκωση των ενοτήτων και η συναρμολόγησή τους σε ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό δίδυμο, το οποίο όμως δεν είναι ακόμη συνδεδεμένο με το φυσικό του δίδυμο. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί δοκιμή και επικύρωση των υπηρεσιών του, για να αξιολογηθεί η καταλληλότητά του πριν από την πραγματική ανάπτυξη και χρήση σε πραγματικό χρόνο. Στην περίπτωση ενός ήδη αναπτυγμένου ΨΔ θα πρέπει να το προσαρμόζει σύμφωνα με τις νέες απαιτήσεις προδιαγραφές, επιτρέποντας έτσι έναν αρθρωτό τρόπο του μετασχηματισμού των υπηρεσιών.
3. Ανάπτυξη του Ψηφιακού Δίδυμου : αυτό το βήμα αποτελείται από την πραγματική σύνδεση των δεδομένων από το φυσικό χώρο με τα αντίστοιχα εικονικά αντικείμενα. Η δοκιμή της σύνδεσης και η βαθμονόμηση των αισθητήρων είναι προφανή βήματα εδώ, μαζί με την επιβεβαίωση ότι οι παρεχόμενες υπηρεσίες λειτουργούν όπως αναμενόταν και μπορούν να αρχίσουν να διαχειρίζονται στο πλαίσιο του αναπτυγμένου ΨΔ. Από αυτό το σημείο, το ΨΔ γίνεται η δική του οντότητα.

5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Έξυπνα Κτίρια & Έξυπνες Πόλεις

5.1. Εισαγωγή

Η συνεχής και ταχύρρυθμη τεχνολογική πρόοδος της εποχής μας έχει δημιουργήσει μία ακόμα τάση που αφορά έντονα τον Κατασκευαστικό Κλάδο. Είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή των λεγόμενων “Έξυπνων Κτιρίων” (Smart Buildings) και “Έξυπνων Πόλεων” (Smart Cities). Τα Ψηφιακά Δίδυμα αποτελούν ισχυρά εργαλεία για τη δημιουργία, την παρακολούθηση και τη διαχείριση των Έξυπνων Κτιρίων και Πόλεων.

5.1.1. Έξυπνα Κτίρια

Αρχικά, ως Έξυπνο Κτίριο αναγνωρίζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα που εκμεταλλεύεται μια σειρά από υπολογιστικές και επικοινωνιακές υποδομές και τεχνικές (Qolomany et al., 2019). Συγκλίνει τα διάφορα συστήματα από όλο το κτίριο, όπως το σύστημα HVAC (θέρμανση, εξαερισμός, κλιματισμός), ο φωτισμός, ο συναγερμός κλπ., σε μια ενιαία υποδομή δικτύου (Cisco).

Τα κυριότερα οφέλη των Έξυπνων Κτιρίων είναι τα εξής (Irisys) :

1. Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας : μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε ένα κτίριο κατά περίπου 5% ~ 35% με τη χρήση έξυπνων τεχνολογιών.
2. Βελτίωση της αποδοτικότητας του κτιρίου : οι αισθητήρες παρέχουν δεδομένα σχετικά με τον τρόπο χρήσης του κτιρίου και επιτρέπει στα έξυπνα συστήματα να κάνουν προσαρμογές σχετικά με τη θερμοκρασία, το φωτισμό κλπ., και βοηθούν επίσης στη βελτιστοποίηση της χρήσης των χώρων του κτιρίου.
3. Προληπτική συντήρηση : οι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν την απόδοση του κτιρίου και να ενεργοποιούν τις απαραίτητες διαδικασίες και να εφαρμόζουν τη συντήρηση τη σωστή στιγμή.
4. Αύξηση της παραγωγικότητας : τα έξυπνα κτίρια έχουν σχεδιαστεί για να προσφέρουν μια πιο άνετη εμπειρία για τους ενοίκους τους, παρακολουθώντας συνεχώς τη χρήση του κτιρίου και προσαρμόζοντας τα συστήματα ώστε να διασφαλίζεται ότι έχουν τις ανέσεις που χρειάζονται.

5. Καλύτερη χρήση των πόρων : τα δεδομένα που παράγονται από ένα έξυπνο κτίριο παρέχουν βασικές πληροφορίες που μπορούν να τροφοδοτηθούν στον προγραμματισμό και να καταστήσουν τη χρήση των πόρων πιο αποτελεσματική.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, τα βασικά συστατικά στοιχεία των Έξυπνων Κτιρίων, είναι τα ακόλουθα (Qolomany et al., 2019) :

1. συστήματα αισθητήρων και ενεργοποιητών
2. δίκτυα και συστήματα επικοινωνίας
3. πλατφόρμα λογισμικού
4. σύστημα HVAC
5. συσκευές έξυπνου ελέγχου



Σχήμα 5.1 : Συστατικά στοιχεία ενός Έξυπνου Κτιρίου, Qolomany et al., 2019

5.1.2. Έξυπνες Πόλεις

Ο όρος Έξυπνη Πόλη αναφέρεται σε μια πόλη που χρησιμοποιεί σύγχρονες τεχνολογίες πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT) για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων της και την αποτελεσματική διαχείριση των υποδομών, των πόρων και των υπηρεσιών των και λειτουργιών της. Επιτρέπει επίσης στους αξιωματούχους της να αλληλοεπιδρούν άμεσα τόσο με την κοινότητα όσο και με τις υποδομές της πόλης και να παρακολουθούν τι συμβαίνει σε πραγματικό χρόνο, ώστε να είναι σε ετοιμότητα να ανταποκριθούν σε τυχόν προκλήσεις (Wikipedia).

Για να λειτουργεί μία Έξυπνη Πόλη αποτελεσματικά, ακολουθεί τα εξής τέσσερα βήματα :

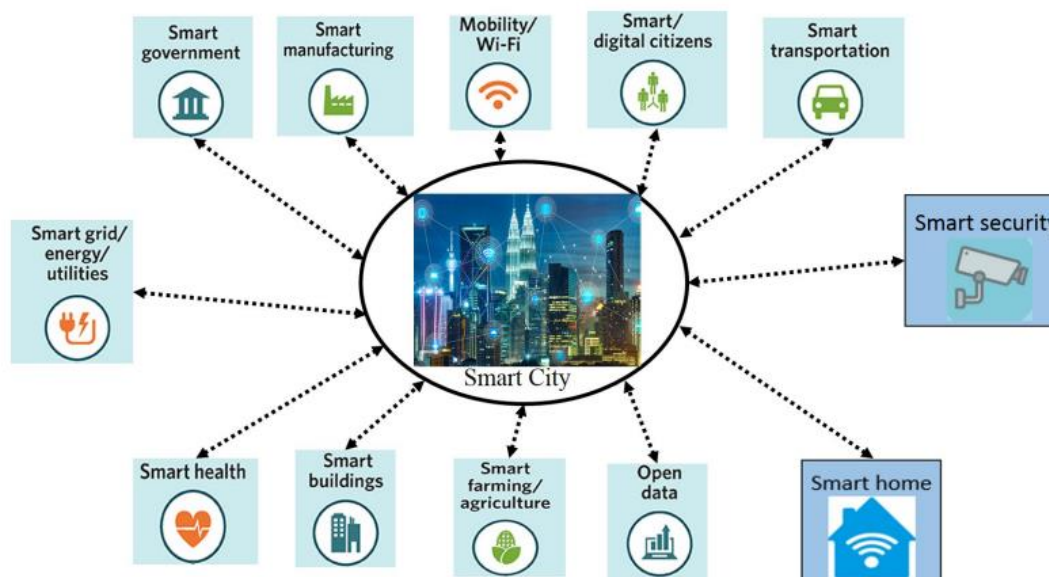
1. Συλλογή (Collect) : Οι αισθητήρες σε όλη την πόλη και οι συσκευές του IoT συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο.
2. Ανάλυση (Analysis) : Τα δεδομένα που συλλέγονται αξιολογούνται και αναλύονται προκειμένου να εξαχθούν σημαντικές πληροφορίες.
3. Επικοινωνία (Communication) : Οι πληροφορίες και τα αποτελέσματα από τη φάση της ανάλυσης κοινοποιούνται στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων μέσω δικτύων επικοινωνίας.
4. Δράση (Action) : Οι πόλεις χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που αντλούνται από τα δεδομένα για να δημιουργήσουν λύσεις, να βελτιστοποιήσουν τις υπηρεσίες και λειτουργίες της πόλης, να διαχειριστούν αποτελεσματικά τις υποδομές της και να βελτιώσουν την ποιότητα ζωής των κατοίκων της.

Η έννοια της έξυπνης πόλης πρέπει να εξελίσσεται παράλληλα με τις αλλαγές που την επηρεάζουν. Οι πόλεις έχουν συνήθως τρία βασικά χαρακτηριστικά που τις καθιστούν "έξυπνες" (Huawei, 2020) :

1. Επίγνωση (Awareness) : Οι έξυπνες πόλεις έχουν επίγνωση σε πραγματικό χρόνο των ταχέως μεταβαλλόμενων συνθηκών, όπως το περιβάλλον τους, την κυκλοφορία και την κατάσταση της δημόσιας ασφάλειας. Παράγοντες στη λειτουργία και την ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων αποτελούν επίσης οι πολύ πιο αργές ή περιοδικά μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως οι πληθυσμιακές ή δημογραφικές αλλαγές και τα επίπεδα οικονομικής δραστηριότητας.
2. Ανταπόκριση (Response) : Μεγάλα επίπεδα ευαισθητοποίησης, σε συνδυασμό με γρήγορους χρόνους απόκρισης, καθιστούν μια πόλη πραγματικά έξυπνη. Στις λειτουργίες των πόλεων, οι αποτελεσματικές αντιδράσεις μπορούν να αποτρέψουν την κλιμάκωση επικίνδυνων καταστάσεων, να αποτρέψουν καταστροφές και να σώσουν ζωές.
3. Πρόβλεψη (Prediction) : Η ικανότητα πρόβλεψης και προληπτικής ανταπόκρισης σε γεγονότα είναι αναπόσπαστο στοιχείο των Έξυπνων Πόλεων.

Μια έξυπνη πόλη δεν περιορίζεται μόνο στη χρήση της τεχνολογίας, αλλά περιλαμβάνει και άλλους καθοριστικούς παράγοντες για τη βιωσιμότητα και την αστική ανάπτυξη. Οι παράγοντες αυτοί διαφέρουν από πόλη σε πόλη, τόσο στο ποιοι από αυτούς υλοποιούνται στην εκάστοτε πόλη, όσο στο βαθμό και τον τρόπο που εφαρμόζονται. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά μιας έξυπνης πόλης (Σχήμα 5.2), είναι τα παρακάτω :

- Έξυπνη Διακυβέρνηση / Smart Government
- Έξυπνη Βιομηχανία / Smart Manufacturing
- Έξυπνη Ενέργεια / Smart Energy
- Έξυπνη Μετακίνηση / Smart Transportation
- Έξυπνη Υγεία / Smart Health
- Έξυπνα Κτίρια / Smart Buildings
- Έξυπνοι Πολίτες / Smart Citizens
- Ανοιχτά Δεδομένα / Open Data



Σχήμα 5.2 : Βασικά χαρακτηριστικά μίας Έξυπνης Πόλης, Longzhi et al, 2018

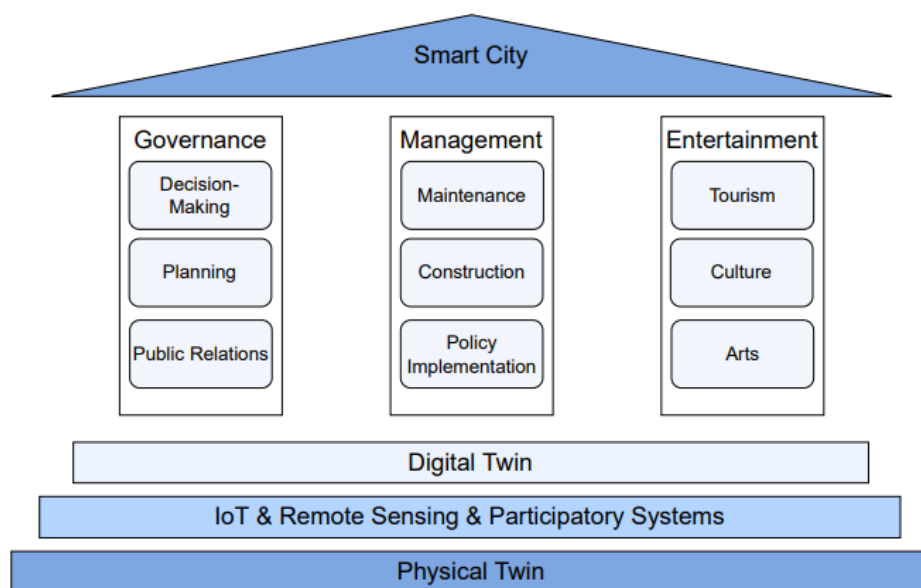
Οι έξυπνες πόλεις επιτρέπουν στους πολίτες και τις τοπικές κυβερνητικές αρχές να συνεργαστούν για την ανάληψη πρωτοβουλιών και τη χρήση έξυπνων τεχνολογιών για τη διαχείριση και την ανάπτυξη του αστικού περιβάλλοντος, με στόχο να προσφέρει υψηλή ποιότητα ζωής στους κατοίκους, ενώ παράλληλα να δημιουργεί οικονομική ανάπτυξη. Αυτό

καθίσταται όλο και πιο σημαντικό υπό το πρίσμα της μελλοντικής αύξησης του πληθυσμού στις αστικές περιοχές, όπου θα απαιτηθεί αποτελεσματικότερη χρήση των υποδομών και των διαθέσιμων πόρων. Οι υπηρεσίες και οι εφαρμογές έξυπνης πόλης θα επιτρέψουν αυτές τις βελτιώσεις που θα οδηγήσουν σε υψηλότερη ποιότητα ζωής για τους πολίτες (TWI Global).

5.2. Τα Ψηφιακά Δίδυμα Έξυπνης Πόλης

Η αρχική ιδέα για την λειτουργία μίας Έξυπνης Πόλης ήταν να βασίζεται στη δημιουργία ενός δικτύου συσκευών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και εφαρμογών τηλεπισκόπησης, ώστε να είναι τα πάντα στην πόλη συνδεδεμένα στο Διαδίκτυο και να παρακολουθούνται εξ αποστάσεως. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν εφικτή η συλλογή δεδομένων και πληροφοριών και οι αρμόδιοι να έχουν καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών και υπηρεσιών που προσφέρει το αστικό περιβάλλον. Ωστόσο, εξαιτίας της πολυπλοκότητας των συλλεγόμενων δεδομένων, των παρατηρούμενων διαδικασιών και της λειτουργίας της ίδιας της πόλης είναι απαραίτητη μια συνολική αντιμετώπιση. Για αυτό το λόγο τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να αποτελέσουν την πλατφόρμα στην οποία οι πόλεις μπορούν να γίνουν πραγματικά έξυπνες, μετατοπίζοντας την προσοχή από τη συλλογή δεδομένων στη χρήση δεδομένων. Η ψηφιακή αναπαράσταση της πόλης επιτρέπει τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της διαρκώς μεταβαλλόμενης κατάστασής της μέσω προσομοιώσεων και να ενημερώνουν όλα τα επίπεδα, από τους πολίτες μέχρι τους πολιτικούς και τους σχεδιαστές για τη λήψη κατάλληλων αποφάσεων (Grubel et al., 2022).

Μία Έξυπνη Πόλη για να λειτουργεί αποτελεσματικά, βασίζεται στη συλλογή και στην ανάλυση δεδομένων. Τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να παρέχουν τα απαιτούμενα συστήματα για τη συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων από το Φυσικό Δίδυμο της πόλης. Τα δεδομένα αυτά αναλύονται στη συνέχεια για την καλύτερη τη διακυβέρνηση και διαχείριση της πόλης και τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και την ψυχαγωγία των κατοίκων της. Η διακυβέρνηση αναφέρεται στην καθοδήγηση του μέλλοντος της πόλης, η διαχείριση στην παρούσα κατάσταση της και η ψυχαγωγία στο τρόπο που χρησιμοποιούνται οι υπηρεσίες και οι υποδομές της. Επομένως τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να αποτελέσουν τα θεμέλια για τη δημιουργία και την ανάπτυξη Έξυπνων Πόλεων (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3 : Τα Ψηφιακά Δίδυμα ως θεμέλια μίας Έξυπνης Πόλης, Grubel et al., 2022

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η μεγαλύτερη πρόκληση που αντιμετωπίζουν οι ομάδες διαχείρισης των πόλεων είναι η άντληση των σημαντικών πληροφοριών από τον αυξημένο όγκο, την ταχύτητα και την ποικιλία των δεδομένων που συλλέγονται, γνωστά και ως μεγάλα δεδομένα (big data), από τις Έξυπνες Πόλεις. Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, δημιουργούνται τα ΨΔ, δηλαδή μοντέλα δεδομένων που ζωντανά ψηφιακά σχέδια φυσικών υποδομών, διαδικασιών και ολόκληρων οικοσυστημάτων των πόλεων. Αυτό που διαφοροποιεί τα ψηφιακά δίδυμα από τις παραδοσιακές απεικονίσεις είναι ο δυναμισμός τους και οι δυνατότητές τους σε πραγματικό χρόνο. Τα ΨΔ βοηθούν όλες τις βαθμίδες της διοίκησης, ώστε η πόλη να υπακούει στα χαρακτηριστικά που την καθιστούν "έξυπνη". Τα οφέλη που αποκομίζει κάθε τμήμα από τη χρήση ΨΔ Έξυπνων Πόλεων είναι τα εξής (Huawei, 2020) :

- Εκτελεστική Διοίκηση (Executive Management) : Τα ψηφιακά δίδυμα βελτιώνουν τη λήψη αποφάσεων σε εκτελεστικό επίπεδο παρέχοντας μια ολιστική και ευέλικτη εικόνα των υποδομών, των εγκαταστάσεων και των διαδικασιών, ενώ επιτρέπουν στους υπεύθυνους να παρακολουθούν τους βασικούς δείκτες απόδοσης υψηλού επιπέδου.
- Υπεύθυνοι για τις Λειτουργίες της Πόλης (City Operations) : Τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν μια προσέγγιση ελέγχου στις διάφορες λειτουργίες της πόλης. Η προβολή των υποδομών σε πραγματικό χρόνο δίνει στους υπεύθυνους τη δυνατότητα να προβλέπουν και να μετριάζουν τους κινδύνους.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

- Υπεύθυνοι για τον Αστικό Σχεδιασμό (City Planners) : Τα ψηφιακά δίδυμα παρέχουν σημαντικές ευκαιρίες στη δημιουργία και την ανάπτυξη ιδεών, τη συνεργασία σε πρώιμο στάδιο και την ταχεία επιλογή, προσομοίωση και δοκιμή ώστε οι σχεδιαστές των πόλεων να προβλέπουν τα πιθανά αποτελέσματα νέων έργων ή αναβαθμίσεων.
- Μάρκετινγκ και Πωλήσεις (Marketing and Sales Personnel) : Ο τεράστιος όγκος δεδομένων που είναι διαθέσιμος μέσω των ψηφιακών διδύμων επιτρέπει στις ομάδες διαχείρισης της πόλης να πραγματοποιούν αναλύσεις των βαθύτερων αιτιών και να διαμορφώνουν στοχευμένες εκστρατείες μάρκετινγκ με στόχο την αλλαγή της συμπεριφοράς των πολιτών. Επίσης, εξαιτίας της παρακολούθησης των μετακινήσεων των πολιτών σε πραγματικό χρόνο, τα ΨΔ παρέχουν σημαντικές ευκαιρίες δημιουργίας εσόδων μέσω διαφημίσεων και πωλήσεων ακινήτων.
- Διάφοροι Συνεργάτες (Partners) : Τα ψηφιακά δίδυμα διευκολύνουν τη συνεργασία και την επικοινωνία με τους εταίρους και επιταχύνουν επίσης την ανάπτυξη προϊόντων και υπηρεσιών βελτιώνοντας την ανταλλαγή δεδομένων.

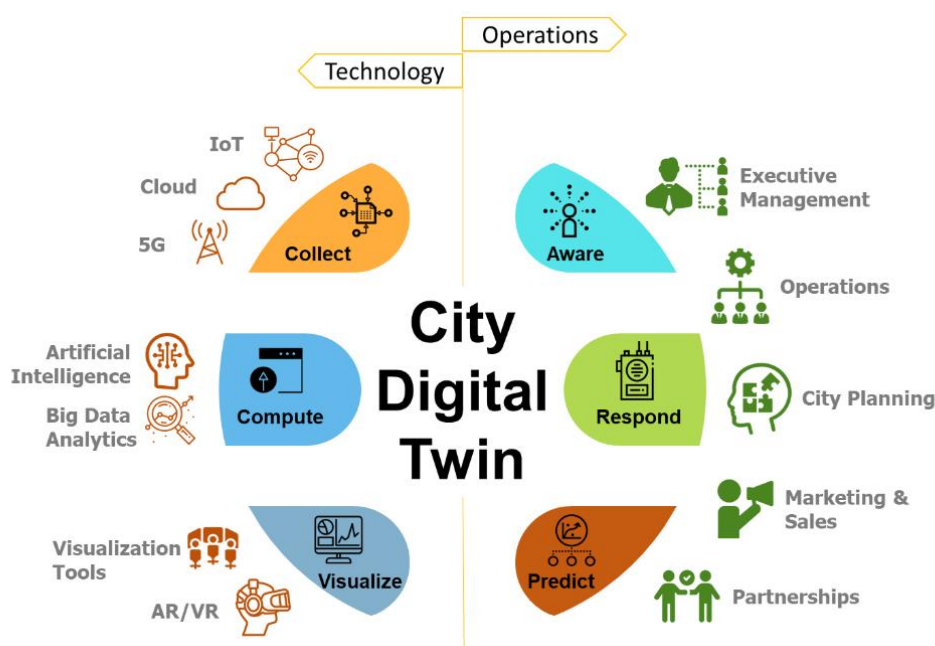
Τα Ψηφιακά Δίδυμα Έξυπνων Πόλεων κατασκευάζονται και λειτουργούν μέσω πολλαπλών συμπληρωματικών τεχνολογιών που συλλέγουν, υπολογίζουν και απεικονίζουν δεδομένα. Οι κυριότερες από αυτές είναι οι παρακάτω (Huawei, 2020) :

- ΙοΤ : Οι αισθητήρες και οι πλατφόρμες ΙοΤ συλλέγουν και οργανώνουν τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τους οργανισμούς ώστε να αντλούν τις χρήσιμες πληροφορίες από τον φυσικό κόσμο. Αυτή η τροφοδοσία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο είναι αυτό που εξασφαλίζει ότι το ΨΔ είναι το πραγματικό εικονικό αντίγραφο της πόλης.
- 5G : Το 5G καθίσταται κρίσιμος παράγοντας για τα ΨΔ, καθώς εξασφαλίζει τη συνεχή ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ φυσικών και εικονικών διδύμων, με μεγάλες ταχύτητες, χαμηλές καθυστερήσεις και ικανότητα υποστήριξης μεγάλου όγκου συσκευών.
- Τεχνητή Νοημοσύνη και Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων : Η τεχνητή νοημοσύνη, σε συνδυασμό με εργαλεία ανάλυσης, υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων των αρμόδιων φορέων διοίκησης της πόλης και επιτρέπει την αυτοματοποίηση των επιχειρησιακών εργασιών.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

- Εργαλεία Οπτικοποίησης : Οι τεχνολογίες Επαυξημένης Πραγματικότητας και Εικονικής Πραγματικότητας ενισχύουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια των ψηφιακών διδύμων. Οι τεχνολογίες αυτές έχουν επίσης σημαντικές επιπτώσεις στις διάφορες λειτουργίες, την εκπαίδευση, τον σχεδιασμό και την προσομοίωση.
- Ψηφιακή πλατφόρμα : Μια ψηφιακή πλατφόρμα εκτελεί την ενσωμάτωση όλων αυτών των τεχνολογιών, συνδέοντας εφαρμογές και δεδομένα. Συνδέει επίσης διάφορες επιχειρήσεις και συνεργάτες, ώστε να εξερευνήσει πλήρως την αξία της πόλης και να λειτουργεί σαν αυτόνομο σύστημα.

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο το Ψηφιακό Δίδυμο Έξυπνης Πόλης αξιοποιεί τα διάφορα τεχνολογικά μέσα, και πως τα χρησιμοποιούν οι αρμόδιοι φορείς που είναι υπεύθυνοι για την λειτουργία της πόλης.



Σχήμα 5.4 : Τα τεχνολογικά μέσα και οι λειτουργίες ενός ΨΔ Έξυπνης Πόλης, Huawei, 2020

5.3. Ο ρόλος των Τηλεπικοινωνιών στα ΨΔ Έξυπνης Πόλης

Οι ΤΠΕ και οι τηλεπικοινωνίες διαδραματίζουν καίριο ρόλο τόσο στη λειτουργία των Έξυπνων Πόλεων όσο και στη δημιουργία του Ψηφιακού Διδύμου αυτής, δεδομένου ότι λειτουργούν ως πλατφόρμα για τη συλλογή και τη συγκέντρωση πληροφοριών και δεδομένων από το αστικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο βοηθούν στη βελτίωση της κατανόησης

του τρόπου λειτουργίας της πόλης όσον αφορά την κατανάλωση πόρων, τις υπηρεσίες και τον τρόπο ζωής (Haidine et al., 2016).

Οι τηλεπικοινωνίες επιτρέπουν τις ακόλουθες λειτουργίες - κλειδιά για την επίτευξη των στόχων και τη μέγιστη απόδοση μίας Έξυπνης Πόλης (Haidine et al., 2016) :

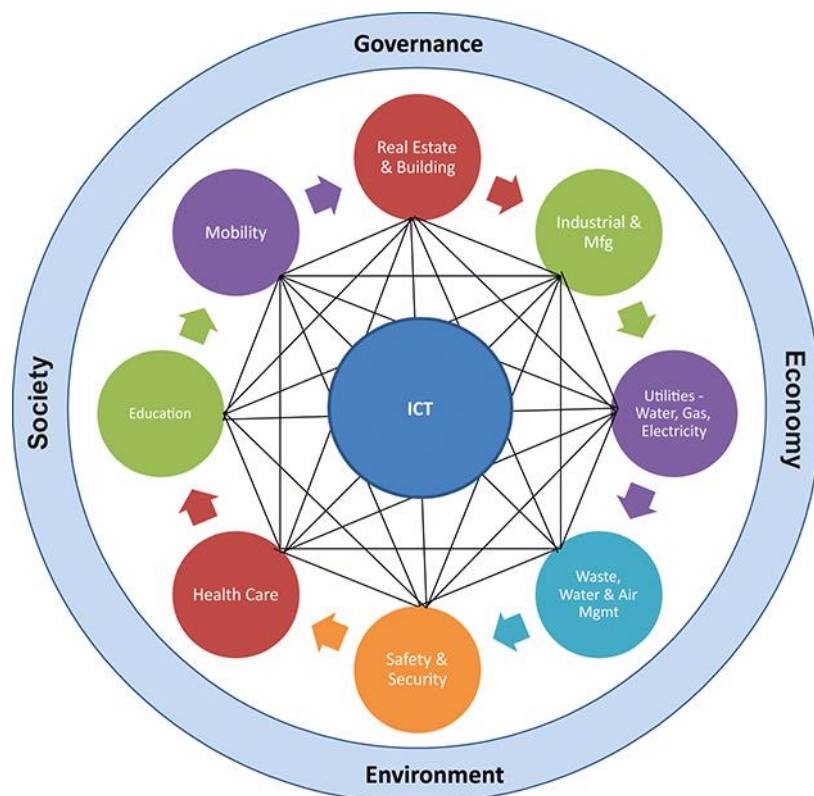
- Κοινή χρήση πληροφοριών και γνώσεων : Παραδοσιακά, λόγω της ανεπάρκειας στην κοινή χρήση πληροφοριών, μια πόλη ενδέχεται να μην είναι έτοιμη να επιλύσει ένα πρόβλημα, ακόμα κι αν είναι καλά εξοπλισμένη να αντιδράσει. Με άμεσες και ακριβείς πληροφορίες, οι πόλεις μπορούν να κατανοήσουν το πρόβλημα και να λάβουν μέτρα πριν επιδεινωθεί.
- Προγνωστική ανάλυση : Η προετοιμασία για πιθανές καταστροφές απαιτεί μεγάλη ποσότητα δεδομένων που αφορούν τη μελέτη προτύπων, την αναγνώριση τάσεων, την αναγνώριση περιοχών κινδύνου και την πρόβλεψη πιθανών προβλημάτων. Οι ΤΠΕ παρέχουν και διαχειρίζονται αυτές τις πληροφορίες με πιο αποτελεσματικό τρόπο, ώστε η πόλη να μπορεί να βελτιώσει την προετοιμασία της και τη δυνατότητα αντίδρασής της.
- Ενσωμάτωση ΤΠΕ : Οι τηλεπικοινωνίες διασφαλίζουν την πρόσβαση σε έγκαιρες και σχετικές πληροφορίες προκειμένου να κατανοηθούν καλύτερα τις ευπάθειες και τις δυνάμεις της πόλης.

Οι υποδομές των ΤΠΕ και των τηλεπικοινωνιών γενικότερα δρουν ως το “νευρικό σύστημα” της Έξυπνης Πόλης, καθώς συνδέουν και συντονίζουν όλες τις διαφορετικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διάφορων παραγόντων της ζωής στην πόλη (οικονομία, κοινωνία, διακυβέρνηση, περιβάλλον), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.5. Ωστόσο πρέπει να σέβονται ένα σύνολο απαιτήσεων προκειμένου να πραγματοποιήσουν τα επιθυμητά τους καθήκοντα χωρίς να γίνονται αιτία δυσλειτουργιών και περιορισμών των καθημερινών δραστηριοτήτων στην πόλη. Οι πιο σημαντικές απαιτήσεις είναι οι ακόλουθες (Haidine A. et al., 2016) :

- Οικονομική αποδοτικότητα : Οι αισθητήρες, οι διάφοροι μετρητές και οι τεχνολογίες επικοινωνίας μεταξύ τους που θα αναπτυχθούν μαζικά, πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να ελαχιστοποιούν το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και να παρέχουν μέγιστη απόδοση.
- Υψηλή αξιοπιστία και μακρά διάρκεια ζωής : Ο εξοπλισμός και οι υποδομές επικοινωνίας πρέπει να είναι υψηλής αξιοπιστίας και σχεδιασμένες με προδιαγραφές βιομηχανικού επιπέδου

για να ανταποκριθούν σε οποιοσδήποτε περιβαλλοντικές συνθήκες και φυσικά φαινόμενα. Έτσι, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της λειτουργίας, της συντήρησης και της διαχείρισης των υποδομών αυτών για μεγάλο χρονικό διάστημα.

- Ασφάλεια δικτύου : Γενικά, πρέπει να εξασφαλιστεί η εμπιστευτικότητα των δεδομένων, που επιτρέπει μόνο σε εξουσιοδοτημένα άτομα να έχουν πρόσβαση, η ακεραιότητα των δεδομένων, που εξασφαλίζει δεν τροποποιούνται, η αυθεντικότητα των δεδομένων, που εγγυάται ότι αποστέλλονται από τον αντίστοιχο φορέα και διαθεσιμότητα των δεδομένων, που εξασφαλίζει ότι είναι διαθέσιμα όταν απαιτούνται.
- Διαλειτουργικότητα και ανοικτά πρότυπα/λογισμικό: Τα συστήματα επικοινωνίας πρέπει να βασίζονται σε πρότυπα που να διασφαλίζουν τη διαλειτουργικότητα σε σχέση με την εξέλιξη του εξοπλισμού. Η πραγματική αποτελεσματικότητα της Έξυπνης Πόλης είναι αποτέλεσμα της διαλειτουργικότητας που επιτρέπει την ελεύθερη ροή δεδομένων σε διάφορες τεχνολογίες εντός λειτουργιών πόλης, όπως φωτισμός, μεταφορές και υποδομές, ενισχύοντας την έξυπνη επικοινωνία, διατηρώντας παράλληλα πρωτόκολλα ασφαλείας.
- Ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Services / QoS): Ο όρος QoS καλύπτει αρκετά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για να αξιολογηθούν και να επιλεγούν οι τεχνολογίες επικοινωνίας. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα εξής: η ταχύτητα μετάδοσης ή ρυθμός δεδομένων, η δικτυακή χωρητικότητα σε όρους αριθμού συνδεδεμένων συσκευών ταυτόχρονα, η καθυστέρηση.



Σχήμα 5.5 : Ο τρόπος που οι ΤΠΕ συνδέουν τις διάφορες πτυχές της Έξυπνης Πόλης, Haidine et al., 2016

Εξαιτίας της ανομοιόμορφης κατανομής του πληθυσμού και των διάφορων υποδομών σε μια πόλη χρησιμοποιούνται διαφορετικές τεχνολογίες επικοινωνίας. Οι ασύρματες επικοινωνίες είναι η πιο χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, είτε μέσω Wi-Fi ή 4G, διότι η ασύρματη συνδεσιμότητα προσφέρει το πλεονέκτημα της κινητικότητας και της ευκολίας ανάπτυξης. Ωστόσο, οι ενσύρματες επικοινωνίες είναι επίσης παρούσες στο τοπίο της επικοινωνίας για τις Έξυπνες Πόλεις, ειδικά όταν απαιτούνται πολύ υψηλές ταχύτητες (Haidine et al., 2016). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.1) παρουσιάζονται οι κυριότερες τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σήμερα και ορισμένα από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Πίνακας 5.1 : Οι σημαντικότερες τεχνολογίες επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σε μία Έξυπνη Πόλη

Τεχνολογία Επικοινωνίας	Τύπος Σύνδεσης	Χρήση	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Wi Fi	Ασύρματη	Εσωτερική	Έλλειψη καλωδίων Ο χρήστης μπορεί να μετακινείται	Μικρό εύρος σήματος Όχι τόσο σταθερή σύνδεση
WiMAX	Ασύρματη	Εξωτερική	Υψηλές ταχύτητες Μεγάλο εύρος σήματος	Μεγάλο κόστος εγκατάστασης
LTE (4G)	Ασύρματη	Εξωτερική	Συμβατότητα με παλαιότερες και μελλοντικές συσκευές Υψηλή αποδοτικότητα φάσματος Μείωση καθυστερήσεων στη σύνδεση στο Διαδίκτυο	Υψηλό κόστος λειτουργίας
LTE-A	Ασύρματη	Εξωτερική	Υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων Υψηλή αριστεία φωνής	Υψηλό κόστος λειτουργίας Προσβάσιμο σε μικρό αριθμό περιοχών
Bluetooth	Ασύρματη	Εσωτερική	Εύκολη εγκατάσταση Χαμηλό κόστος	Μικρό εύρος συνδεσιμότητας Ζητήματα ασφάλειας
ZigBee	Ασύρματη	Εσωτερική	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας Χαμηλό κόστος	Χαμηλές ταχύτητες
Z-Wave	Ασύρματη	Εσωτερική	Απλούστερο από το ZigBee	Δύσκολη διαχείριση κινητικότητας Ζητήματα ασφάλειας
LoRaWAN	Ασύρματη	Εξωτερική	Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας Χαμηλό κόστος Ασφαλής αμφίδρομη επικοινωνία	Μικρό εύρος συνδεσιμότητας
NFC	Ασύρματη	Εσωτερική	Ευκολία χρήσης Υψηλή ταχύτητα σύνδεσης	Μικρό εύρος συνδεσιμότητας

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

				Περιορισμένες εφαρμογές
RFID	Ασύρματη	Εσωτερική	Αυτοματοποίηση καταγραφής δεδομένων Μεγάλη ακρίβεια καταγραφής δεδομένων	Υψηλό κόστος Περιορισμένη εμβέλεια Ζητήματα ασφάλειας
DSL	Ενσύρματη	Εσωτερική	Σταθερότητα σύνδεσης Ευκολία εγκατάστασης Υψηλή διαθεσιμότητα	Επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία Η ταχύτητα σύνδεσης επηρεάζεται από την απόσταση Επηρεάζεται από την κατάσταση των καλωδίων των τηλεφωνικών γραμμών
Fiber Optical	Ενσύρματη	Εσωτερική	Υψηλές ταχύτητες Μικρές απώλειες σήματος	Υψηλό κόστος εγκατάστασης Ανάγκη για ειδικό εξοπλισμό Περιορισμένη διαθεσιμότητα

Η τωρινή τεχνολογική επανάσταση οδηγεί και στην ανάπτυξη προηγμένων υποδομών τηλεπικοινωνιών. Αυτές περιλαμβάνουν τα δίκτυα 5G, την οπτική ίνα ευρείας ζώνης καθώς και την υποστήριξη του IoT, που εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων που απαιτείται στις Έξυπνες Πόλεις. Με τη βελτιωμένη συνδεσιμότητα, οι πόλεις μπορούν να εφαρμόσουν μια ευρεία γκάμα εφαρμογών και υπηρεσιών, και τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να αναλυθούν χρησιμοποιώντας αλγόριθμους AI, επιτρέποντας στους αρμόδιους φορείς να αποκτήσουν αξιολογες γνώσεις σχετικά με τη λειτουργία της πόλης, να λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα και να βελτιστοποιούν την κατανομή πόρων. Επιπλέον, οι προηγμένες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες ενθαρρύνουν μεγαλύτερη συμμετοχή των πολιτών στις έξυπνες καθώς επιτρέπουν την πρόσβαση σε πληροφορίες πραγματικού χρόνου, να συμμετέχουν στις διαδικασίες λήψης

αποφάσεων και να παρέχουν ανατροφοδότηση στις αρχές της πόλης (Napolitano, 2023). Οι μελλοντικές και αναδυόμενες τεχνολογίες δικτύωσης και επικοινωνίας που αναπτύσσονται μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διευκόλυνση της συνδεσιμότητας στις Έξυπνες Πόλεις. Ορισμένες από τις σημαντικότερες είναι οι Ασύρματες Επικοινωνίες Βασισμένες σε Λογισμικό (Software Defined Wireless Communications / SDWN), η Εικονοποίηση των Λειτουργιών του Δικτύου (Network Functions Virtualization / NFV), τα Δίκτυα Γνωστικού Ραδιοφώνου (Cognitive Radio Networks / CRNs), οι Πράσινες Επικοινωνίες (Green Communications / GC), οι Επικοινωνίες Ορατού Φωτός (Visible Light Communications / VLC), το 6LowPAN, το Thread (πρωτόκολλο δικτύωσης βασισμένο σε IP IPv6), το Sigfox, το Neul και τα 5ης Γενιάς δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (5G). Ο στόχος των μελλοντικών και αναδυόμενων τεχνολογιών είναι η διευκόλυνση της επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας δεδομένων, βελτίωσης της υποδομής δικτύου, χαμηλής απόκρισης σήματος, αποδοτικής χρήσης φάσματος, υψηλής κλιμακωσιμότητας, υψηλής κάλυψης, χαμηλού κόστους, ανθεκτικότητας, υψηλής πιστοποίησης και ευέλικτων μηχανισμών κρυπτογράφησης (Yaqoob et al., 2017).

5.4. Σχεδιασμός Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης

Οι White et al., προτείνουν έξι επίπεδα πληροφοριών προκειμένου να απλοποιήσουν τη μοντελοποίηση και τον σχεδιασμό του ΨΔ Έξυπνης Πόλης. Τα πρώτα πέντε επίπεδα είναι κατασκευασμένα το ένα πάνω από το άλλο, προσθέτοντας ολοένα και περισσότερες πληροφορίες ανά επίπεδο. Το ψηφιακό επίπεδο (Έξυπνη Πόλη) χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων από την πόλη, τα οποία μπορεί στη συνέχεια να μεταβιβάζει και να ανταλλάζει πληροφορίες με το ΨΔ, που αποτελεί και το τελευταίο επίπεδο (Σχήμα 5.6). Το ΨΔ χρησιμοποιεί τα δεδομένα που παράγονται για να εκτελέσει πρόσθετες προσομοιώσεις και αναλύσεις σχετικά με τη βελτιστοποίηση της κινητικότητας, την τοποθέτηση κτιρίων ή το σχεδιασμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι πληροφορίες αυτές στη συνέχεια τροφοδοτούνται μέσω των στρωμάτων του μοντέλου, και εφαρμόζονται στον φυσικό κόσμο (White et al., 2021). Αναλυτικά τα επίπεδα είναι :

- Επίπεδο 0 : Έδαφος / Terrain

Πρόκειται για βασικές πληροφορίες σχετικά με το γεωγραφικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται η πόλη, όπως για παράδειγμα αν κάποιο τμήμα της πόλης είναι παράκτιο, αν

υπάρχουν ποτάμια ή κανάλια που την διασχίζουν, αν υπάρχουν απότομες κλίσεις ή λόφοι κτλ.. Το επίπεδο αυτό παρέχει επίσης για το υπέδαφος, όπως αν κάποια περιοχή της πόλης έχει γόνιμο έδαφος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καλλιέργειες ή αν υπάρχει έδαφος με κακή αποστράγγιση που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά τη διάρκεια έντονης βροχής ή πλημμύρας. Για την ενσωμάτωση αυτών των πληροφοριών στο μοντέλο χρησιμοποιείται ένας εδαφολογικός χάρτης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.5.

- Επίπεδο 1 : Κτίρια / Buildings

Το Επίπεδο 1 του μοντέλου περιλαμβάνονται τα κτίρια που υπάρχουν στην πόλη. Για να προστεθούν αυτά τα κτίρια απαιτούνται υψηλής ακρίβειας μοντέλα BIM και τρισδιάστατα σχέδια που έχουν δημιουργηθεί με τη χρήση στερεοσκοπικών φωτογραφιών και αεροφωτογραφιών. Χρησιμοποιούνται επίσης, ή δημιουργούνται ΨΔ για τα υφιστάμενα κτίρια, για να εμπλουτιστεί το μοντέλο με ακριβείς πληροφορίες (διαστάσεις, υλικά κατασκευής, έτος κατασκευής, κτλ.) σχετικά με τα κτίρια της πόλης.

- Επίπεδο 2 : Υποδομές / Infrastructures

Σε αυτό το επίπεδο του μοντέλου προστίθενται στη συνέχεια οι υποδομές που περιβάλλουν τα τρέχοντα κτίρια της πόλης. Αυτές είναι οι βασικές φυσικές και οργανωτικές δομές και εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την βιωσιμότητα των πολιτών και την λειτουργία των επιχειρήσεων (π.χ. δρόμοι, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, τηλεπικοινωνίες, κτλ.). Τα δεδομένα για τις υποδομές μπορεί να προέρχονται είτε από λογισμικά χαρτογράφησης όπως το OpenStreetMap ή το GoogleMaps ή από τη διαδικασία τρισδιάστατης χαρτογράφησης που περιέχει πιο ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τις κλίσεις και τις διαστάσεις που δεν υπάρχουν στους οδικούς χάρτες.

- Επίπεδο 3 : Κινητικότητα / Mobility

Στο Επίπεδο 3 του μοντέλου προστίθεται κινητικότητα στα επίπεδα υποδομών και κτιρίων, δηλαδή οι μετακινήσεις των ανθρώπων κατά την καθημερινότητά τους και των αγαθών που τους βοηθούν στις διάφορες πτυχές της ζωής τους. Εφαρμογές λογισμικού όπως το SUMO μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της αστικής κινητικότητας. Το λογισμικό πρέπει να υποστηρίζει έναν αριθμό διαφορετικών τρόπων μεταφοράς (π.χ. περπάτημα, ποδήλατα, οχήματα, κτλ.) και να προσθέτει τους σιδηρόδρομους και τις πλωτές οδούς. Στη συνέχεια συνδέονται

με το τρισδιάστατο μοντέλο, προσθέτοντας πρόσθετες συμπεριφορές και χαρακτηριστικά (π.χ. ταχύτητα μετακίνησης, τύποι πεζών, κτλ.) για την προσομοίωση των αστικών μετακινήσεων.

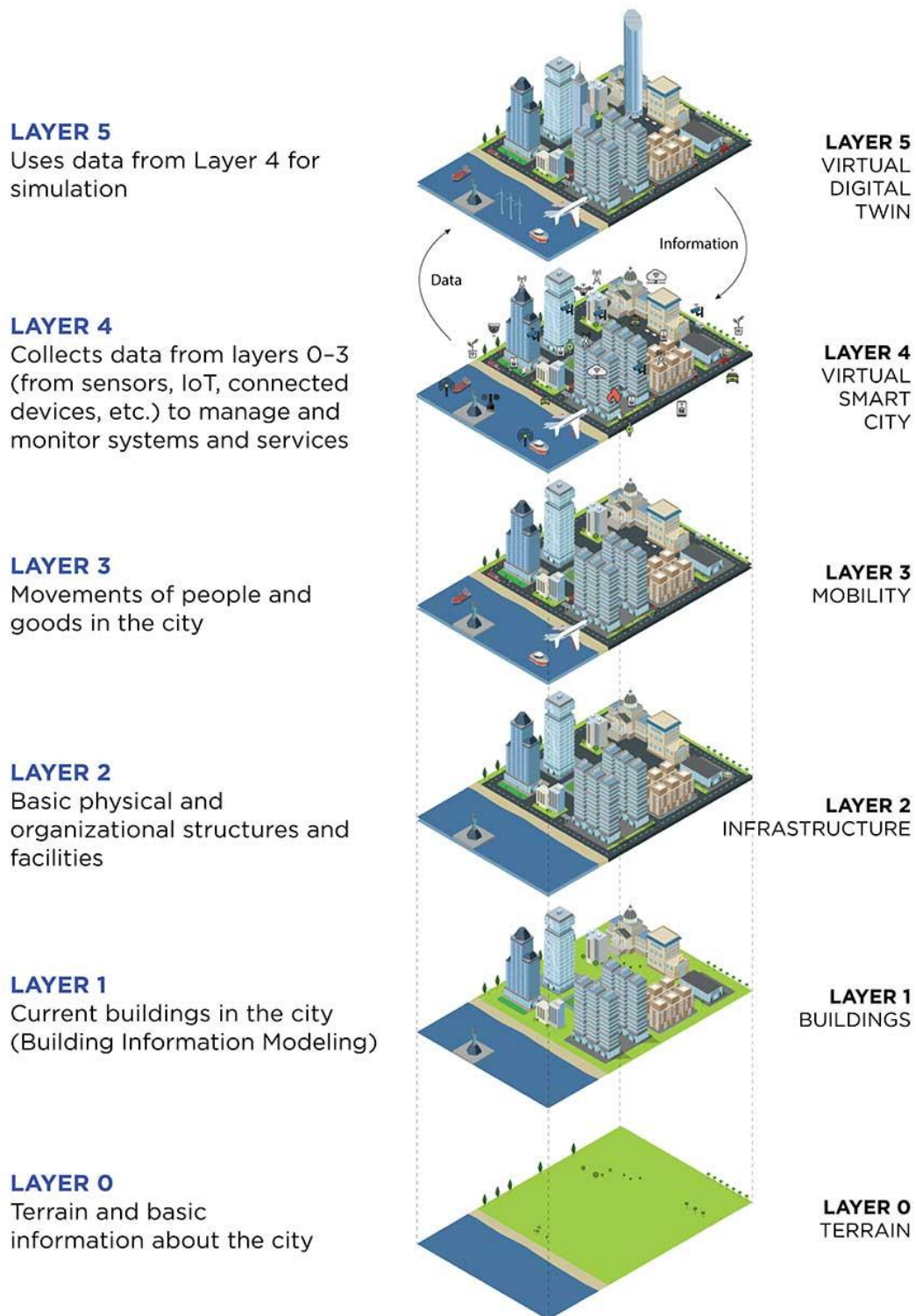
- Επίπεδο 4 : Ψηφιακό Επίπεδο – Έξυπνη Πόλη / Digital Layer – Smart City

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5, το Ψηφιακό Επίπεδο (Έξυπνη Πόλη) είναι υπεύθυνο για τη συλλογή των δεδομένων από όλα τα προηγούμενα επίπεδα και να τροφοδοτήσει με αυτά τις προσομοιώσεις και τις αναλύσεις που θα πραγματοποιηθούν στο Εικονικό Επίπεδο (Ψηφιακό Δίδυμο). Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων ανατροφοδοτούνται στη συνέχεια στα διάφορα επίπεδα του μοντέλου με τη μορφή πληροφοριών. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται από ενσωματωμένους αισθητήρες και συσκευές IoT που υπάρχουν στην πόλη. Μπορούν να συμβάλλουν επίσης πολίτες (χρησιμοποιούν τα κινητά τηλέφωνα), συνδεδεμένα οχήματα (παρέχουν δεδομένα για την κυκλοφορία), κάμερες ασφαλείας (παρακολούθηση) και οι κεραιές 5G (υψηλές ταχύτητες και μικρές καθυστερήσεις).

- Επίπεδο 5 : Εικονικό Επίπεδο – Ψηφιακό Δίδυμο / Virtual Layer – Digital Twin

Το Εικονικό Επίπεδο (Ψηφιακό Δίδυμο) βασίζεται στα δεδομένα που παράγονται από το επίπεδο της Έξυπνης Πόλης. Διεξάγονται προσομοιώσεις και στη συνέχεια μεταβιβάζονται πίσω με τη μορφή πληροφοριών. Το ΨΔ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των κτιρίων στην πόλη. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα ανίχνευσης που συλλέγονται από την Έξυπνη Πόλη, μπορούν να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις για να διαπιστωθεί πως θα είναι η τελική μορφή του κτιρίου και πώς θα ανταποκριθεί στα διάφορα φυσικά φαινόμενα. Τέλος στο ψηφιακό δίδυμο γίνονται πειραματισμοί για τη δημιουργία πληροφοριών σχετικά με νέες αποφάσεις αστικής πολιτικής και σχεδιασμού, οι οποίες ανατροφοδοτούνται στην Έξυπνη Πόλη.

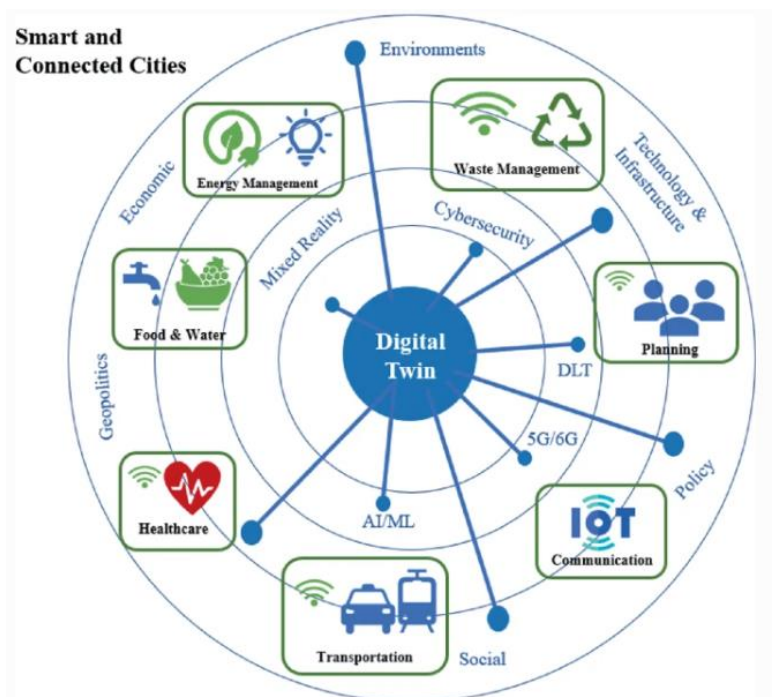
Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών



Σχήμα 5.6 : Τα επίπεδα του Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης, White et al., 2021

5.5. Εφαρμογές Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης

Τα αυξημένα δεδομένα που είναι διαθέσιμα από τις έξυπνες πόλεις, επιτρέπουν τη δημιουργία ενός Ψηφιακού Διδύμου που μπορεί να ενημερώνεται και να αλλάζει όταν μεταβάλλεται το Φυσικό Δίδυμο. Όπως είδαμε στα προηγούμενα, ένα ΨΔ Έξυπνης Πόλης επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων και την παρακολούθηση των συστημάτων της, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων πριν από την εμφάνισή τους, την πρόληψη για την ομαλή λειτουργία της και μπορεί ακόμη να χρησιμοποιηθεί για τον προγραμματισμό με τη χρήση προσομοιώσεων στον ψηφιακό κόσμο. Οι διάφορες πτυχές του αστικού χώρου, όπως η στέγαση, οι υποδομές, οι μεταφορές και η ενέργεια είναι αλληλένδετες σε μια πόλη, αναπαράγεται ψηφιακά και κατά τη διαδικασία αυτή, όλοι οι τομείς και τα συστήματα της πόλης αντικατοπτρίζονται σε αυτή την ψηφιακή πλατφόρμα. Σε αυτή την εικονική πόλη, πραγματοποιείται αλληλεπίδραση σε πραγματικό χρόνο μεταξύ της φυσικής πραγματικότητας και του εικονικού μοντέλου. Μέσω της εφαρμογής ΨΔ, οι υπεύθυνοι της πόλης μπορούν να κατανοήσουν γρήγορα και με ακρίβεια την τρέχουσα κατάσταση, με χαμηλό κόστος και έχουν την δυνατότητα να προβλέψουν την επίδραση μέτρων και ενεργειών ώστε να ανταποκριθούν αποτελεσματικά. Οι κυριότερες από αυτές τις εφαρμογές περιγράφονται παρακάτω (Σχήμα 5.7).



Σχήμα 5.7 : Οι κυριότερες εφαρμογές Ψηφιακών Διδύμων Έξυπνης Πόλης, Utku et al., 2023

5.5.1. Αστικός Σχεδιασμός

Τα ΨΔ είχαν αρχικά ως στόχο να εξελίξουν τις διαδικασίες που σχετίζονται με την κατασκευή και με τη βοήθεια προσομοιώσεων που θα επέτρεπαν στους διαχειριστές να κατανοήσουν τη συμπεριφορά της πόλης και να αποκτήσουν ευαίσθητα μοντέλα του Φυσικού / Πραγματικού κόσμου. Παρ' όλα αυτά, με την αυξανόμενη ανάπτυξη και την εξομοίωση πληροφοριακών συστημάτων που υποστηρίζονται από αισθητήρες με μεγάλα δεδομένα που λαμβάνονται από συστήματα IoT στις έξυπνες πόλεις, δημιουργήθηκαν τα ΨΔ Έξυπνης Πόλης. Οι σχεδιαστές είναι πλέον σε θέση να σχεδιάζουν εικονικές εκδοχές ολόκληρων πόλεων και να τις χρησιμοποιήσουν αυτό για να αναλύσουν και να προσομοιώσουν πολυάριθμες καταστάσεις, να αξιολογήσουν τα αποτελέσματα διαφόρων σχεδίων και να μεγιστοποιήσουν τις επιλογές πολεοδομικού σχεδιασμού. Τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες για πτυχές όπως η ροή της κυκλοφορίας, η χρήση ενέργειας και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, συνδυάζοντας δεδομένα από συσκευές IoT και άλλες πηγές. Με την αύξηση του αριθμού των αισθητήρων υψηλής τεχνολογίας, οι πόλεις γίνονται όλο και πιο έξυπνες και δεδομένα παράγονται δεδομένα όλο ένα αυξάνονται σε όγκο και πληροφορίες (Μεγάλα Δεδομένα / Big Data).

Ο τομέας ενδιαφέροντος που σχετίζεται με τον αστικό σχεδιασμό δεν περιλαμβάνει μόνο τον αρχιτεκτονικό και τον πολεοδομικό σχεδιασμό, αλλά και τους άλλους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των κοινωνικών επιστημών, όπως η οικονομία, η ψυχολογία, η κοινωνιολογία, η γεωγραφία, και των επιστημών της μηχανικής, όπως η επιστήμη των υπολογιστών, η ενέργεια, η μηχανολογία και οι πολιτικοί μηχανικοί. Από την άλλη πλευρά, προκύπτει η ανάγκη συγχρονισμού όλων των δραστηριοτήτων και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ αυτών των κλάδων. Προκειμένου να γίνει συντονισμένα κάθε ένα από τα φυσικά συστήματα υποδομής πιο αποδοτικό και αποτελεσματικό, υπάρχει ανάγκη να παρακολουθούνται τα δεδομένα που σχετίζονται με αυτά και να ενημερώνονται αναλόγως. Όλα αυτά είναι δυνατόν να επιτευχθούν με τη χρήση των Ψηφιακών Διδύμων. Ο ρόλος τους είναι να καταστήσουν τα υποσυστήματα διασυνδεδεμένα, οργανωμένα και ευφυή στις πόλεις, μέσω της σύνδεσης και της επικοινωνίας μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων (Utku et al., 2023).

Ο Αστικός Σχεδιασμός περιλαμβάνει (Μπασάς, 2022) :

- Χωροθέτηση : η διαδικασία σχεδιασμού, ανάπτυξης και οργάνωσης των φυσικών, κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών στοιχείων μιας πόλης. Αποσκοπεί στο να δημιουργήσει ένα βιώσιμο και λειτουργικό περιβάλλον για τους κατοίκους, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες της κοινότητας, τις περιβαλλοντικές προκλήσεις και τις οικονομικές απαιτήσεις. Οι διαδικασίες χωροθέτησης συνήθως περιλαμβάνουν τα εξής στάδια:
 1. Ανάλυση και Αξιολόγηση
 2. Σχεδιασμός και Ανάπτυξη
 3. Κατασκευή Υποδομών
 4. Διατήρηση και Βελτίωση
 5. Συμμετοχή των Πολιτών
- Διακριτός Ορίζοντας : Ένα τρισδιάστατο μοντέλο επιτρέπει την εύκολη αφαίρεση και προσθήκη κτιρίων και υποδομών. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να είναι χρήσιμη για να αξιολογηθεί πώς τα κτίρια αυτά θα επηρεάσουν τη διακριτή ορατότητα της πόλης. Οποιαδήποτε προτεινόμενα σχέδια μπορούν εύκολα να προστεθούν στο ΨΔ, και επιτρέπει στη συνέχεια στους πολίτες και τους δημόσιους φορείς να “περπατούν” γύρω από το ΨΔ και να βλέπουν την επίδραση που θα έχει το νέο κτίριο στο διακριτό ορίζοντα από διάφορες θέσεις.
- Πράσινοι Χώροι : Οι χώροι πρασίνου, όπως τα πάρκα και οι χώροι αναψυχής, είναι εξαιρετικά σημαντικοί στις έξυπνες πόλεις για την προώθηση της υγιεινής διαβίωσης και της ευημερίας. Το μοντέλο του ΨΔ επιτρέπει την ανάπτυξη αυτών των χώρων πρασίνου σε κατάλληλες περιοχές της πόλης. Δεδομένα από την έξυπνη πόλη, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ηχορύπανση, η ροή της κυκλοφορίας των πεζών και η ποσότητα ηλιακού φωτός μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να επηρεάσουν τις αποφάσεις αστικού σχεδιασμού σχετικά με το πού θα τοποθετηθούν αυτοί οι χώροι πρασίνου στην πόλη.

5.4.1. Διαχείριση Κίνησης και Μεταφορών

Με την ανάπτυξη των τεχνολογιών και των εφαρμογών έξυπνης πόλης, οι μεταφορές γίνονται απαραίτητο στοιχείο για τη διαχείριση της πόλης. Ξεκινώντας από το 1980, οι δημόσιες μεταφορές εξελίσσονται συνεχώς, μέχρι και σήμερα που έχει επικρατήσει παγκόσμια η έννοια των Συνεργατικών - Ευφυών Συστημάτων Δημόσιων Μεταφορών ή Σ-ΕΣΔΜ (Cooperative

Intelligent Transport Systems / C-ITS) στις έξυπνες πόλεις. Οι σχετικές τεχνολογίες για την εφαρμογή των Σ-ΕΣΔΜ είναι τα δίκτυα 5G (και 6G μελλοντικά), οι συσκευές IoT, τα Μεγάλα Δεδομένα, η Υπολογιστική Νέφους, η Τεχνητή Νοημοσύνη και η Μηχανική Μάθηση, τα Συνδεδεμένα Αυτόνομα Οχήματα (Connected Autonomous Vehicles / CAV), το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) και τα Ψηφιακά Δίδυμα. Ωστόσο είναι απαραίτητο να θεσπιστεί ένα πλαίσιο τυποποίησης και προδιαγραφών για τα C-ITS.

Η τεχνολογία των ΨΔ είναι μια καινοτόμος τεχνολογία που διαθέτει πολλές γνώσεις σχετικά με την ανάπτυξη οχημάτων και δρόμων, τη λειτουργία, τη συντήρηση υποδομών και τα δεδομένα κυκλοφορίας. Η δημιουργία ΨΔ των οδικών δικτύων βοηθά σημαντικά στις λειτουργίες διαχείρισης των διαθέσιμων υποδομών, καθώς και συμβάλει στην αποτελεσματική κατασκευή νέων έργων κυκλοφορίας ώστε να απαλλαγούν οι πόλεις από τα σύνθετα κυκλοφοριακά προβλήματα. Λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού, η κίνηση γίνεται συνεχώς πιο πυκνή και οι υποδομές καθίστανται ανεπαρκείς, προκαλώντας κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι μεταφορές και οι υποδομές μεταφορών είναι ένα από τα πιο θεμελιώδη δομικά στοιχεία για την κατασκευή έξυπνων πόλεων. Με τα ΨΔ, είναι δυνατή η αρμονική απαλλαγή από τα προβλήματα. Είναι εφικτή η διαχείριση της κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο με αποτελεσματικό και με σύγχρονο τρόπο με έξυπνα και καινοτόμα συστήματα μεταφορών. Με έξυπνες μεθόδους παρακολούθησης της κυκλοφορίας, επιτυγχάνεται η μεταφορά πληροφοριών μεταξύ οχημάτων και δρόμων. Αυτές οι προσπάθειες μπορούν να μειώσουν την κυκλοφορία, να αυξήσουν τη χωρητικότητα του οδικού δικτύου, να μετριάσουν τα ατυχήματα, να εξοικονομήσουν ενέργεια και χρήματα και να μειώσουν τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από τα καυσαέρια. Επιπλέον τα ΨΔ βελτιώνουν τα συστήματα μεταφορών και εφοδιασμού (Logistics) εξασφαλίζοντας την ταχύτερη και ασφαλέστερη εξυπηρέτηση, μετριάζοντας τις καθυστερήσεις και τις ελλείψεις προϊόντων.

Για την εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων Έξυπνης Πόλης στις μεταφορές πρέπει όλα τα παραπάνω στοιχεία και το αστικό περιβάλλον να συνεργάζονται ενεργά μεταξύ τους σε μοντέλα. Εξασφαλίζεται έτσι αποτελεσματικότερη, ασφαλέστερη και έξυπνότερη επικοινωνία που θα πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο και με τα πραγματικά δεδομένα που αντλούνται από την Έξυπνη Πόλη (Utku et al., 2023).

5.5.2. Διαχείριση Ενέργειας

Ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα στις έξυπνες πόλεις είναι η βέλτιστη διαχείριση των πόρων τους, και ιδίως η αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας. Αυτή σχετίζεται με πέντε κύριους τομείς παρέμβασης :

- την παραγωγή
- την αποθήκευση
- τις υποδομές
- τις εγκαταστάσεις
- τη μεταφορά

Η επαρκής αναπαράσταση της αστικής δυναμικής και των πέντε αυτών τομέων παρέμβασης στα Ψηφιακά Δίδυμα μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο ενδεδειγμένη και καλύτερη ανάλυση των πιθανών εναλλακτικών λύσεων ενεργειακής πολιτικής, ακόμη και πριν από την εφαρμογή των αλλαγών στη διαχείριση της πόλης. Η παραγωγή παρέχει ενέργεια, η αποθήκευση παρέχει διαθεσιμότητα και η υποδομές διανέμουν την ενέργεια και τις διεπαφές για τους χρήστες, με τις εγκαταστάσεις και τις μεταφορές (κινητικότητα) να αποτελούν το τελικό στοιχείο των περιοχών ενεργειακής παρέμβασης.

Και τα πέντε αυτά κύρια στοιχεία της ενεργειακά έξυπνης πόλης, σε συνεργασία με τα ΨΔ πρέπει να διαθέτουν νοημοσύνη για καλύτερη διαχείριση και έλεγχο, δυνατότητες επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ τους και με άλλα συστήματα, και τέλος τα κατάλληλα φυσικά στοιχεία και συσκευές που να τα υποστηρίζουν. Τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης επόμενης γενιάς αναμένεται να χρησιμοποιούν την Τεχνητή Νοημοσύνη, την Τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού (Distributed Ledger Technology / DLT) και άλλες προηγμένες Τεχνολογίες Επικοινωνιών (ICT), με διασυνδεδεμένο και διαλειτουργικό τρόπο με τις υποδομές των Ψηφιακών Διδύμων Έξυπνης Πόλης (Utku et al., 2023).

Τα ΨΔ μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην επίβλεψη και βελτίωση του υφιστάμενου δικτύου ενέργειας. Οι τρέχουσες επιθεωρήσεις των γραμμών του δικτύου βασίζονται κυρίως σε χειροκίνητους τρόπους. Ωστόσο, αυτό είναι όχι μόνο αναποτελεσματικό, αλλά έχει και τυφλά σημεία επιθεώρησης, τα οποία σταδιακά δεν μπορούν να ανταποκριθούν πλήρως στις απαιτήσεις για ηλεκτρική ενέργεια. Με βάση την τεχνολογία ΨΔ Έξυπνου Δικτύου, είναι

εφικτή η ανίχνευσή τυχόν βλαβών στο δίκτυο σε πραγματικό χρόνο, και να πραγματοποιηθεί αυτόματα επιθεώρηση και η ερμηνεία της ζημιάς και να δημιουργηθεί η αναφορά, μειώνοντας έτσι σημαντικά τον χρόνο και την ποσότητα εργασίας που απαιτείται για την επιδιόρθωση. Επίσης μπορεί να εντοπίζει κινδύνους ασφαλείας και να εκδίδει έγκαιρα προειδοποιήσεις (Deren et al., 2021).

5.5.3. Διαχείριση Αποβλήτων

Η διαχείριση των αποβλήτων επιτυγχάνεται με τη συστηματική εφαρμογή διαδικασιών που περιλαμβάνουν την πρόληψη και τη μείωση της παραγωγής αποβλήτων, τη συλλογή, την ταξινόμηση, τη συσσώρευση, την αποθήκευση, τη μεταφορά, την ανακύκλωση και την ανάκτηση, τη διάθεση και τον έλεγχο των αποβλήτων. Η διαχείριση των αποβλήτων σε μια πόλη περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση των οικιακών, ιατρικών, επικίνδυνων και μη επικίνδυνων αποβλήτων, το διαχωρισμό αποβλήτων κατά τη συλλογή στην πηγή, την ενδιάμεση αποθήκευση, την εγκατάσταση εγκαταστάσεων μεταφοράς, τη μεταφορά, την ανάκτηση, τη διάθεση, τη λειτουργία των κέντρων ανάκτησης και διάθεσης και τη συντήρηση μετά το κλείσιμο.

Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό δεδομένων και Μηχανικής Μάθησης, δημιουργείται ένα Ψηφιακό Δίδυμο του περιβάλλοντος των αποβλήτων στις Έξυπνες Πόλεις. Αυτό αποτελεί τη βάση για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας διαχείρισης τους, και μπορούν να επωφεληθούν τόσο οι ιδιωτικές εταιρείες όσο και οι δήμοι. Τα ΨΔ στη Διαχείριση Αποβλήτων επιτυγχάνουν (Utku et al., 2023) :

- Υπηρεσίες με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και με μικρότερο κόστος που χρησιμοποιούν δεδομένα από αισθητήρες και συσκευές IoT.
- Τεχνολογίες, οι οποίες υιοθετούν την Βιομηχανία 4.0 (Industry 4.0), και προσφέρουν τη δυνατότητα παραγωγής καινοτόμων ιδεών, που είναι εύκολα εφαρμόσιμες για τον έλεγχο, την ανακύκλωση και την προστασία της Δημόσιας Υγείας.
- Τη δημιουργία ενός οικολογικού μοντέλου οικονομίας που θα βασίζεται στην αρχή της ανακύκλωσης των αποβλήτων και καθίσταται δυνατή η ύπαρξη γρήγορων εναλλακτικών εποικοδομητικών λύσεων για την κλιματική κρίση και τα περιβαλλοντικά προβλήματα.

- Μέσω υπηρεσιών νέφους (cloud), καθιστούν δυνατή η διαχείριση της παραγωγής, της συλλογής και της ανακύκλωσης αποβλήτων. Με τον έλεγχο αυτών των διαδικασιών τα απορρίμματα διαχωρίζονται και συλλέγονται σε κατηγορίες και αξιοποιούνται δεδομένα από έξυπνα συστήματα που ενσωματώνονται τόσο σε αυτά όσο και στους κάδους (πχ κωδικοί QR και σαρωτές) για την αποδοτικότερη ανακύκλωσή τους.
- Καινοτόμες εφαρμογές για την αποθήκευση τροφίμων κατά παραγγελία σε παντοπωλεία, την παρακολούθηση των τροφίμων, κλπ., μειώνοντας τον αριθμό των αποβλήτων, και καθιστούν εφικτό τον εντοπισμό αποβλήτων που μπορούν να ανακυκλωθούν.
- Τη δημιουργία “Πράσινων Κτιρίων ”, δηλαδή κατασκευάζονται φιλικά προς το περιβάλλον κτίρια που μειώνουν τους ρύπους και ελαχιστοποιούν το ενεργειακό κόστος.

5.5.4. Σύστημα Δημόσιας Υγείας

Η δημόσια υγειονομική περίθαλψη επιδιώκει να βελτιώσει την υγεία των κοινοτήτων μέσω της πρόληψης και της θεραπείας των ασθενειών και της προώθησης της ευεξίας με έναν υγιεινό τρόπο ζωής, όπως η άσκηση και οι υγιεινές διατροφικές συνήθειες. Η ευημερία του ατόμου εξαρτάται από την υγεία και την ικανοποίηση της κοινότητας με την οποία ζει. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα μοντέλα με βάση τα δεδομένα για τη δημόσια ασφάλεια και υγεία θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη ζωή σε μια Έξυπνη Πόλη. Ο αστικός πληθυσμός αντιπροσωπεύει σχεδόν το 60% του παγκόσμιου πληθυσμού. Ο τεράστιος όγκος δεδομένων που παράγει χρησιμοποιώντας διάφορες έξυπνες συσκευές, ενσωματώνονται για τον σχηματισμό ενός Ψηφιακού Διδύμου της Δημόσιας Υγειονομικής Περίθαλψης στις Έξυπνες Πόλεις.

Η έννοια του ΨΔ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της συνδεδεμένης και προληπτικής υγειονομικής περίθαλψης και στην ενίσχυσή της μέσω γνώσεων που βασίζονται σε δεδομένα. Οι επαγγελματίες της δημόσιας υγείας πρέπει να αναλύουν και να ερμηνεύουν αποκλίνοντες παράγοντες για την κατανόηση και τον προσδιορισμό ζητημάτων δημόσιας υγείας. Οι διαδικασίες που σχετίζονται με τη δημόσια υγεία οργανώνονται, παρακολουθούνται και αξιολογούνται αποτελεσματικότερα. Η διαχείριση δημόσιων θεμάτων όπως ο εμβολιασμός, ο έλεγχος και η κοινωνική αποστασιοποίηση αντιμετωπίζονται με καλύτερο και πιο αποδοτικό τρόπο. Τα συστήματα Ψηφιακών Διδύμων ενισχύουν επίσης την ψηφιακή δημόσια υγεία μέσω μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα. Για την καταπολέμηση

μελλοντικών προβλημάτων υγείας, τα ιστορικά ιατρικά δεδομένα αξιοποιούνται πλήρως με τη βοήθεια της Τεχνητής Νοημοσύνης και άλλων τεχνολογιών (Utku et al., 2023).

Τα ΨΔ της Δημόσιας Υγείας μπορεί επίσης να συμβάλει στην παρακολούθηση και στον περιορισμό των λοιμώξεων και των επιδημιών. Τα δεδομένα των ασθενών σχηματίζονται με τη συγχώνευση των πληροφοριών που παρέχονται από το νοσοκομειακό σύστημα και τα χωροχρονικά δεδομένα που παρέχονται από τον φορέα επικοινωνίας, τα οποία αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων για τον κάθε ασθενή. Στη συνέχεια, συνδέεται στο σύστημα ανάλυσης που χρησιμοποιεί χωροχρονική ανάλυση εγγύτητας, ΑΙ ανάλυση και άλλες τεχνολογίες για να προσδιορίσει την εμφάνιση της επιδημίας και τους ανθρώπους σε στενή επαφή, και διαβιβάζει τα αποτελέσματα στο σύστημα απόκρισης αντιμετώπισης. Το σύστημα αυτό συνδέεται με τη σειρά του με κυβερνητικές υπηρεσίες, εργοδότες και μεμονωμένα χρήστες, παρέχοντας στην κυβέρνηση ένα σημείο αναφοράς για την πρόληψη και τον έλεγχο της επιδημίας, στους εργοδότες ένα σημείο αναφοράς για τις δηλώσεις υγείας των εργαζομένων και στα άτομα με πληροφόρηση για αυτοαπομόνωση και προστασία (Deren et al., 2021).

Εξαιτίας της παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο που γίνεται από τα ΨΔ και με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται για τη δημόσια υγεία, μπορεί να αποτρέψει τις κρίσεις υγείας ακόμη και πριν αυτές σχηματιστούν μέσω της προγνωστικής ανάλυσης, επιτρέπει την ολοκληρωμένη και διαλειτουργική δημόσια υγειονομική περίθαλψη και την καλύτερη χρήση των περιορισμένων πόρων υγειονομικής περίθαλψης με τη βοήθεια δεδομένων αισθητήρων και συσκευών IoT.

5.5.5. Διασφάλιση Ποιότητας Τροφίμων και Νερού

Η πρόσβαση σε υγιεινά και οικονομικά προσιτά τρόφιμα και οι ανάγκες για καθαρό πόσιμο νερό, αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις στις αστικές κοινότητες. Για να επιτευχθεί απαιτείται προσεκτική εξέταση διαφόρων παραγόντων. Επομένως υπάρχει ανάγκη να συνδεθούν οι διάφοροι αυτοί τομείς αυτού του συστήματος μέσω της χρήσης δεδομένων, αυτοματοποίησης, τεχνικών που βασίζονται σε μοντέλα και έξυπνων τεχνολογιών, κάτι που υλοποιείται με τα Ψηφιακά Δίδυμα. Οι λύσεις που προσφέρουν στις Έξυπνες Πόλεις έχουν σημαντικές δυνατότητες, προσφέροντας νέες ευκαιρίες για τη δημιουργία υγιέστερων

κοινωνιών που τροφοδοτούνται από βιώσιμους πόρους τροφίμων και νερού. Οι σημαντικότερες είναι (Utku et al., 2023) :

- Ανάπτυξη μιας προσέγγισης βασισμένης σε μοντέλα για την ανάλυση του συστήματος τροφίμων ως δυναμικού συστήματος με ένα σύνολο εισροών και εκροών.
- Συλλογή δεδομένων, παρακολούθηση της κατάστασης σε πραγματικό χρόνο και χρήση τεχνικών ανάλυσης δεδομένων τόσο στην πλευρά της προσφοράς όσο και στην πλευρά της ζήτησης.
- Έξυπνη Γεωργία.
- Τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση και συσκευές IoT στη διανομή και παράδοση τροφίμων (για παράδειγμα, για τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας και της ασφάλειας των τροφίμων στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων).
- Χρήση αναδυόμενων τεχνολογικών καινοτομιών για τη διαχείριση της ενέργειας και έξυπνων τεχνολογιών και συσκευών που βασίζονται στο IoT για τη μείωση και τη διαχείριση των αποβλήτων τροφίμων.
- Ανάπτυξη σύγχρονων έξυπνων τεχνικών ύδρευσης και άρδευσης που έχουν τη δυνατότητα να μειώσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και να αυξήσει την ποιότητα ζωής των κατοίκων μιας κοινωνίας.
- Η τεχνολογία DT έχει σημαντικές δυνατότητες, προσφέροντας νέες ευκαιρίες για τη δημιουργία υγιέστερων κοινωνιών που τροφοδοτούνται από βιώσιμους πόρους τροφίμων και νερού. Η ψηφιακή συσχέτιση του δημοτικού συστήματος ύδρευσης ή των γεωργικών διεργασιών μπορεί να θεωρηθεί ως πολλά υποσχόμενος τομέας σε αυτή την κατηγορία.

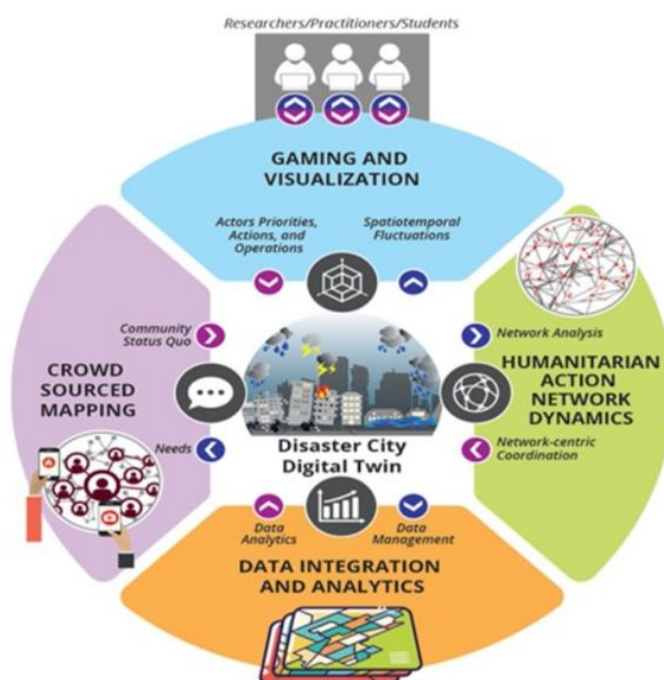
5.5.6. Διαχείριση και Παρακολούθηση Υποδομών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, η χρήση Ψηφιακών Διδύμων στη διαχείριση και παρακολούθηση των υποδομών ενός αστικού περιβάλλοντος επιφέρει πολλαπλά οφέλη, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, τη συντήρηση και τη γενική λειτουργία τους. Οι αισθητήρες και οι συσκευές IoT είναι υπεύθυνες για την συλλογή των δεδομένων που θα αναλυθούν στο ΨΔ, ώστε να διαπιστωθεί η κατάσταση που βρίσκονται οι υποδομές σε πραγματικό χρόνο. Επίσης λαμβάνονται μέτρα για την προληπτική συντήρησή τους, ώστε να αποφευχθούν κίνδυνοι και τυχόν βλάβες στην λειτουργία τους.

5.5.7. Διαχείριση Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης

Με την αύξηση της συχνότητας των φυσικών και ανθρωπογενών καταστροφών και κρίσεων, η ανάγκη για την αντιμετώπιση τους και για δράσεις ανθρωπιστικής βοήθειας αυξάνεται ραγδαία. Ένας σημαντικός τομέας για τη βελτίωση της αντιμετώπισης καταστροφών και της διαχείρισης έκτακτης ανάγκης είναι η απασχόληση των Τεχνολογιών Πληροφοριών και Επικοινωνιών. Οι Fan et al., πρότειναν το Ψηφιακό Δίδυμο Καταστροφών της Πόλης (Σχήμα 5.8), που αποσκοπεί στη δημιουργία μιας ψηφιακής εκδοχής του φυσικού και ανθρώπινου περιβάλλοντος με τις πραγματικές πληροφορίες κατάστασης. Το πλαίσιο καταστροφών είναι ένα ειδικό σενάριο στις Έξυπνες Πόλεις, στο οποίο η κατάσταση εξελίσσεται γρήγορα και γίνεται πολύπλοκη. Προσφέρει πολλά οφέλη για την ενισχυμένη αξιολόγηση της κατάστασης, τη λήψη αποφάσεων, τον συντονισμό και την κατανομή των πόρων. Η χωροχρονική δυναμική των περιοχών καταστροφών και οι ανθρωπιστικές δράσεις ενσωματώνονται σε μια πλατφόρμα ανάλυσης που συγχωνεύει όλα τα δεδομένα για την αντιμετώπιση καταστροφών και τη διαχείριση έκτακτων αναγκών. Οι τέσσερις συνιστώσες του προτεινόμενου ΨΔ είναι οι εξής (Fan et al., 2021) :

1. ανίχνευση και συλλογή πολλαπλών δεδομένων
2. ενσωμάτωση και ανάλυση δεδομένων
3. λήψη αποφάσεων με θεωρία παιγνίων πολλαπλών παραγόντων
4. δυναμική ανάλυση δικτύων



Σχήμα 5.8 : Το Ψηφιακό Δίδυμο Καταστροφής της Πόλης, Fan et al., 2021

Η χρήση ΨΔ μπορεί να συμβάλει και στην αντιμετώπιση περιστατικών Άμεσης Δράσης, διότι δημιουργεί μια κοινή επιχειρησιακή εικόνα στα σώματα δημόσιας ασφάλειας (Αστυνομία, Πυροσβεστική, ΕΚΑΒ). Τα διαφορετικά συστήματα και πρωτόκολλα επικοινωνίας και τα δεδομένα σχετικά με ένα περιστατικό, ενσωματώνονται στο ΨΔ και επιτρέπει στις ομάδες αντιμετώπισης να αλληλοεπιδρούν σε πραγματικό χρόνο σε ολόκληρη την περιοχή που επηρεάζεται από το περιστατικό (Route Fifty).

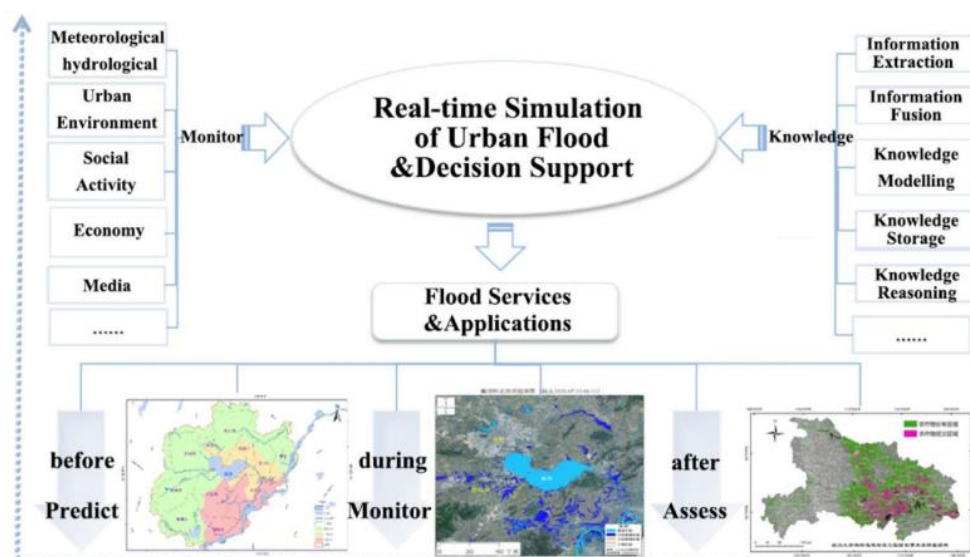
5.6. Προσομοίωση με χρήση Ψηφιακών Διδύμων

Η χρήση ψηφιακών διδύμων για προσομοιώσεις παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο σε πολλούς τομείς για την ανάπτυξη, την αξιολόγηση και τη βελτιστοποίηση διάφορων διαδικασιών και συστημάτων της Έξυπνης Πόλης. Ο αστικός σχεδιασμός γίνεται αποτελεσματικότερος και ασφαλέστερος, αφού εξετάζονται τα διάφορα φυσικά φαινόμενα στο ψηφιακό μοντέλο. Επιτυγχάνονται έτσι οι βέλτιστες λύσεις για τη δημιουργία νέων υποδομών και κτιρίων, ενώ εντοπίζονται τα αδύναμα και επικίνδυνα σημεία της πόλης. Επομένως οι αρμόδιοι φορείς βρίσκονται σε ετοιμότητα να αντιμετωπίσουν ακραία καιρικά φαινόμενα και λάβουν μέτρα πρόληψης, διασφαλίζοντας την προστασία των πολιτών και των υποδομών.

5.6.1. Προσομοίωση Πλημμύρας

Τα ΨΔ Έξυπνης Πόλης αποτελούν το κατάλληλο μέσο για την προσομοίωση των επιπτώσεων των πλημμυρών σε αστικές περιοχές. Το εικονικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων πλημμύρας, όπως έντονες βροχοπτώσεις, υπερχειλίσεις ποταμών ή επιφανειακή απορροή. Τα σενάρια αυτά ενημερώνονται συνεχώς με δεδομένα από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε όλη την πόλη σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στο ΨΔ να παρέχει έγκυρες πληροφορίες για την τρέχουσα κατάσταση της πλημμύρας, τη θέση των επιρρεπών σε πλημμύρες περιοχές, τη ροή και τη στάθμη του νερού μέσα στην πόλη και τις πιθανές επιπτώσεις από τις πλημμύρες στη δημόσια ασφάλεια. Επιπλέον, το σύστημα έχει πρόσβαση σε ιστορικά δεδομένα από παλαιότερες πλημμύρες και βροχοπτώσεις, καθώς και στις τοπογραφικές πληροφορίες, για να καθορίσει ένα χρονοδιάγραμμα των περιστατικών και να αναπτύξει ελεγχόμενα, γρήγορα και αξιόπιστα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης. Ως αποτέλεσμα, τα ΨΔ Έξυπνης Πόλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν εκτενώς στον αστικό σχεδιασμό, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας κατανεμημένων χαρτών επικινδυνότητας πλημμύρας και εκτίμησης κινδύνου και εφαρμογής προσομοιώσεων έκτακτης ανάγκης για μέτρα πρόληψης και μετριασμού των πλημμυρών (Bakhtiari et al., 2023).

Οι Deren et al., πρότειναν ένα σύστημα προσομοίωσης πλημμυρών με βάση τα ΨΔ το οποίο αποτελείται από τρία μέρη. Το πρώτο αφορά την συλλογή μεγάλων δεδομένων από την παρακολούθηση, το δεύτερο την γνώση που παράγεται από τις πλημμύρες και ιστορικά στοιχεία και το τρίτο τις υπηρεσίες και τις εφαρμογές αυτών των δεδομένων και πληροφοριών (Σχήμα 5.9). Στο Ψηφιακό Δίδυμο της Πόλης γίνονται προσομοιώσεις με στόχο την πρόβλεψη των επιπτώσεων πρώτου συμβεί το φαινόμενο, την δυναμική παρακολούθηση και ανάλυση κατά τη διάρκεια, και την αξιολόγηση των καταστροφών μετά το πέρας της πλημμύρας (Deren et al., 2021)



Σχήμα 5.9 : Το Σύστημα Προσομοίωσης Πλημμύρων, Derren et al., 2021

5.6.2. Προσομοίωση Ανέμου

Οι προσομοιώσεις της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου είναι απαραίτητες, ιδιαίτερα όταν αναφερόμαστε στον σχεδιασμό αποτελεσματικής αστικής δόμησης. Οι αρνητικές επιπτώσεις του ανέμου σε μια πόλη μπορούν αυξηθούν με την παρουσία μεγάλων υποδομών και πολυώροφων κτιρίων, ενώ ο άνεμος έχει σημαντικό αντίκτυπο στο μικρόκλιμα, την άνεση και την ασφάλεια των δρόμων και των πεζόδρομων. Ο άνεμος σε μια πόλη μπορεί να διερευνηθεί με τεχνικές υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών και με εφαρμογή προσομοιώσεων ανέμου στο εικονικό μοντέλο του Ψηφιακού Διδύμου. Εκτός από την ταχύτητα του ανέμου, οι προσομοιώσεις αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μελέτη της πίεσης που προκαλείται από τις ροές του ανέμου. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι τα Ψηφιακά Δίδυμα παρέχουν την δυνατότητα να εξεταστούν διαφορετικές καιρικές συνθήκες τόσο στη φάση σχεδίασης της περιοχής όσο και σε ήδη υφιστάμενα κτίρια, ώστε να εντοπίζονται τυχόν αστοχίες και κίνδυνοι έγκαιρα και αποτελεσματικά (Μπασάς, 2022).

5.6.3. Προσομοίωση Ηλιακού Φωτός

Ο στόχος της διεξαγωγής τέτοιων προσομοιώσεων είναι να δοκιμαστούν νέοι τρόποι παρατήρησης της συμπεριφοράς του ηλιακού φωτός στο αστικό περιβάλλον. Συνήθως πραγματοποιούνται δύο κατηγορίες προσομοιώσεων. Η πρώτη αφορά στην ηλιακή έκθεση η οποία επικρατεί στην περιοχή που εξετάζεται και η δεύτερη στην σκίαση που προκαλείται από

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

τα υφιστάμενα κτίρια και τοπογραφικά χαρακτηριστικά που επικρατούν στην πόλη (Μπασάς, 2022). Επομένως οι σχεδιαστές μπορούν να υπολογίζουν τις ώρες που λάμπει ο ήλιος σε συγκεκριμένα μέρη και να εντοπίζουν τις καταλληλότερες θέσεις για την δημιουργία πάρκων και την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πάνελ για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που θα καλύψει ορισμένες από τις ενεργειακές απαιτήσεις της πόλης.

6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Συμπεράσματα

6.1. Ανακεφαλαίωση Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική μελετήθηκαν τα Ψηφιακά Δίδυμα και οι εφαρμογές τους στα πεδία που απασχολούν τους Πολιτικούς Μηχανικούς. Στο πρώτο κεφάλαιο δίνονται ορισμένοι ορισμοί των βασικότερων εννοιών του κλάδου των Τηλεπικοινωνιών και γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή στα σημαντικότερα τεχνολογικά επιτεύγματα της εξέλιξης τους στο χρόνο. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στις σύγχρονες τάσεις των Τηλεπικοινωνιών. Αυτές είναι το 5G, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και η Μηχανική Μάθηση (ML), η Υπολογιστική Νέφος (Cloud), η Κυβερνοασφάλεια και τα Ψηφιακά Δίδυμα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται οι ορισμοί για τα Ψηφιακά Δίδυμα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία. Η κλασική προσέγγιση αναφέρει ότι ένα ΨΔ αποτελείται από τρία συστατικά, το φυσικό μέρος, το ψηφιακό μέρος και την αμφίδρομη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Τα ΨΔ βοηθούν στην βελτιωμένη λήψη αποφάσεων, στην καλύτερη συντήρηση και πρόβλεψη, στην βελτιστοποίηση των λειτουργιών, στον σχεδιασμό και την πρωτοτυπία, στην παρακολούθηση της απόδοσης, στην πιστοποίηση ποιότητας : βοηθούν στη διατήρηση και βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων παρακολουθώντας, στην απομακρυσμένη παρακολούθηση και στον έλεγχο και στη διαχείριση κινδύνων και προβλημάτων. Επίσης τα ΨΔ χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς τύπους, είτε στα ΨΔ Στοιχείων, στα ΨΔ Ενεργών Στοιχείων, στα ΨΔ Συστήματος και στα ΨΔ Διεργασιών (όσον αφορά τον τομέα της Βιομηχανικής Παραγωγής), ή στα Πρωτότυπα ΨΔ, στα Στιγμιότυπα ΨΔ και στα Συνολικά ΨΔ που εξαρτώνται από τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Τέλος, αναφέρονται τα πεδία εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η σχέση των Ψηφιακών Διδύμων με την Μοντελοποίηση Κτιριακών Πληροφοριών ή αλλιώς BIM και τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα ή CPS. Αυτές είναι δύο από τις πιο διαδεδομένες έννοιες που χρησιμοποιούνται από την επαγγελματική Κοινότητα των Αρχιτεκτόνων και Πολιτικών Μηχανικών (AECO), ενώ τα ΨΔ βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο εφαρμογής. Το BIM είναι η ψηφιακή αναπαράσταση των φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου ή έργου υποδομής. Ο ορισμός αυτός είναι παρόμοιος με τον ορισμό του ΨΔ, γι' αυτό το λόγο αυτές οι δύο έννοιες συγχέονται μεταξύ

τους. Οι τρεις βασικές κατανοήσεις που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία αφορούν στη σχέση που έχουν αυτές οι δύο έννοιες μεταξύ τους, δηλαδή είτε τα ΨΔ ως συνέχεια του BIM, ή τα ΨΔ και το BIM ως ξεχωριστές έννοιες, ή τα ΨΔ και το BIM ως συμπληρωματικές έννοιες. Αντίστοιχα, για τα CPS σε πολλές περιπτώσεις σχετίζουν τα ΨΔ με την ίδια έννοια, ενώ σε άλλες έχουν δηλωθεί ότι είναι δύο σχετικές αλλά εντελώς ξεχωριστές έννοιες.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά για τα Ψηφιακά Δίδυμα και τον τρόπο που χρησιμοποιούνται από τον Κατασκευαστικό Κλάδο. Αρχικά παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται τα ΨΔ για ένα κατασκευαστικό έργο. Το Γεωμετρικό ΨΔ μπορεί να θεωρηθεί ως σημείο εκκίνησης για έναν ολοκληρωμένο ψηφιακό δίδυμο για μια υφιστάμενη κατασκευή. Οι μέθοδοι δημιουργίας τους είναι οι "από κάτω προς τα πάνω", που ανιχνεύουν γεωμετρικά πρωταρχικά στοιχεία, και οι "από πάνω προς τα κάτω" υποθέτουν ότι οι κλάσεις αντικειμένων είναι μοναδικά διακριτές μέσω της μορφής τους και των σχέσεών τους με άλλα αντικείμενα. Στη συνέχεια περιγράφονται οι κυριότερες εφαρμογές των ΨΔ στις κατασκευές. Οι υπηρεσίες που προσφέρουν διαχωρίζονται ανάλογα με τη φάση στην οποία βρίσκεται το κτίριο (Σχεδιασμός, Κατασκευή, Λειτουργία και Συντήρηση), ενώ υπάρχουν και η προσεγγίση των ΨΔ φυσικών μερών. Τέλος, παρουσιάζεται το "Εθνικό Ψηφιακό Δίδυμο" (NDT), που προτάθηκε μετά από σύσταση της Εθνικής Επιτροπής Υποδομών του Ηνωμένου Βασιλείου και η έννοια του "Εργοστασίου Ψηφιακών Διδύμων" (DTF) που αποτελεί έναν τυποποιημένο και αυτοματοποιημένο τρόπο για την χρήση Ψηφιακών Διδύμων στις κατασκευές.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα Έξυπνα Κτίρια και οι Έξυπνες Πόλεις και το πώς αυτές χρησιμοποιούν τα ΨΔ στην λειτουργία τους, αλλά και ο ρόλος που παίζουν σε αυτή οι τηλεπικοινωνίες. Ο σχεδιασμός ενός Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης χωρίζεται σε έξι επίπεδα, όπου τα πρώτα πέντε επίπεδα είναι κατασκευασμένα το ένα πάνω από το άλλο, προσθέτοντας ολοένα και περισσότερες πληροφορίες ανά επίπεδο. Στο 5^ο επίπεδο γίνεται η συλλογή δεδομένων από την πόλη, τα οποία μπορεί στη συνέχεια μεταβιβάζονται στο 6^ο και τελευταίο επίπεδο. Σε μία Έξυπνη Πόλη η εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων μπορεί να συμβάλει στον Αστικό Σχεδιασμό και στην Διαχείριση της Κίνησης και των Μεταφορών, της Ενέργειας, των Αποβλήτων, των Υποδομών και Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης, καθώς επίσης και στη Βελτίωση του Συστήματος Δημόσιας Υγείας και στη Διασφάλιση της Ποιότητας Τροφίμων και Νερού. Τέλος, τα ΨΔ χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση διαφόρων

φυσικών φαινομένων, όπως είναι οι πλημμύρες, η ταχύτητα του ανέμου και ο τρόπος που πέφτει το ηλιακό φως, ώστε να γίνεται καλύτερος ο σχεδιασμός του αστικού περιβάλλοντος και να μετριάζονται οι κίνδυνοι από αυτά τα φαινόμενα.

Στο παράρτημα που παρατίθεται παρουσιάζεται η διαδικασία που πρότειναν οι Prengolato et al., για τη δημιουργία του Ψηφιακού Διδύμου της κρεμαστής γέφυρας του Clifton. Η μεθοδολογία αυτή μπορεί να γενικευθεί και να αποτελέσει έναν πρότυπο τρόπο για τη δημιουργία ΨΔ Υφιστάμενων Υποδομών.

6.2. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα διπλωματική είναι τα εξής :

- Οι τηλεπικοινωνίες αποτελούν κρίσιμο και απαραίτητο κομμάτι της σημερινής εποχής και έχουν επιδράσει θετικά σε πολλούς τομείς της κοινωνίας, επιτρέποντας την αποτελεσματική ανταλλαγή πληροφοριών. Η σύγχρονη τεχνολογική πρόοδος της εποχής μας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη τάσεων που αποτελούν το μέλλον του κλάδου, και αναμένεται να βελτιώσουν την καθημερινότητα μας, και την ποιότητα ζωής γενικότερα.
- Δεν υπάρχει σαφής και ξεκάθαρος ορισμός για τα Ψηφιακά Δίδυμα στην επιστημονική βιβλιογραφία. Ωστόσο οι περισσότεροι υποστηρίζουν ότι τα ΨΔ αποτελούνται από το Φυσικό Μέρος που βρίσκεται στον πραγματικό κόσμο, το Ψηφιακό Μέρος που βρίσκεται στον εικονικό κόσμο και τέλος, την αμφίδρομη Ανταλλαγή Δεδομένων μεταξύ τους
- Η εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων έχει δοκιμαστεί και καθιερωθεί ήδη σε διάφορους τομείς. Ξεκίνησε από τον τομέα της Αεροδιαστημικής και στη συνέχεια άρχισαν να χρησιμοποιούνται από την Βιομηχανία. Σήμερα ολοένα και περισσότεροι κλάδοι εφαρμόζουν αυτήν τη τεχνολογία, βελτιώνοντας την απόδοση, την ασφάλεια και την αποτελεσματικότητα των διαφόρων διαδικασιών.
- Τα Ψηφιακά Δίδυμα πολλές φορές συγχέονται με την έννοια του BIM και των CPS συστημάτων. Αν και αυτές οι έννοιες είναι παρόμοιες, διαφέρουν μεταξύ τους τόσο ως προς τα απαραίτητα συστατικά τους μέρη, όσο και ως προς άλλες πτυχές που αφορούν το πεδίο εφαρμογής τους, τον σκοπό τους, το που εστιάζουν, κλπ. Παρόλα αυτά η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μπορεί να

βελτιώσει και να επιτύχει την αποτελεσματικότερή διαχείριση των κτιρίων και των υποδομών, από τον κατασκευαστικό κλάδο και τους διάφορους εμπλεκόμενους.

- Τα Ψηφιακά Δίδυμα χρησιμοποιούν πλήθος συσκευών IoT και αισθητήρες για τη συλλογή τεράστιου όγκου δεδομένων και την παρακολούθηση του Φυσικού Μέρους σε πραγματικό χρόνο. Επομένως μπορούν να συμβάλουν στην καλύτερη λήψη αποφάσεων και στην επιλογή των κατάλληλων ενεργειών για την αποτελεσματική αντιμετώπιση προβλημάτων και βλαβών.
- Ο ρόλος των τηλεπικοινωνιών είναι κρίσιμος στην ανάπτυξη Κατασκευαστικών ΨΔ, καθώς είναι υπεύθυνες για τη συλλογή και τη μεταφορά των δεδομένων από το πραγματικό στο ψηφιακό μέρος σε πραγματικό χρόνο.
- Η υιοθέτηση της τεχνολογίας των Ψηφιακών Διδύμων στη περιοχή των τεχνικών έργων και της κατασκευής υποδομών βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί εκθετική αύξηση στον αριθμό των δημοσιεύσεων στη βιβλιογραφία, ειδικά από το 2019 και έπειτα.
- Τα Ψηφιακά Δίδυμα είναι πολύ χρήσιμα για τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση ενός κτιρίου ή μίας υποδομής. Βελτιώνουν τον σχεδιασμό και τον συντονισμό των εργασιών, συμβάλουν στην εξοικονόμηση κόστους και χρόνου, βοηθούν στην καλύτερη συντήρηση και λειτουργίας και προσφέρουν μεγαλύτερη ασφάλεια κατά τη διάρκεια της κατασκευής.
- Τα Ψηφιακά Δίδυμα δεν αφορούν μόνο τα νέα κτίρια και έργα που κατασκευάζονται. Αντιθέτως μπορούν να δημιουργηθούν τα Γεωμετρικά ΨΔ υφιστάμενων κτιρίων συλλέγοντας γεωμετρικά και χωρικά δεδομένα, το οποίο θα αποτελέσει τη βάση για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου Κατασκευαστικού ΨΔ.
- Υπάρχει η ανάγκη ενός τυποποιημένου τρόπου για τη δημιουργία και τη διαχείριση των Κατασκευαστικών Ψηφιακών Διδύμων, χρησιμοποιώντας κοινή σημασιολογία που να γίνεται κατανοητή από όλους. Το εννοιολογικό πλαίσιο για το Εργοστάσιο ΨΔ μπορεί να επεκταθεί σε κοντινούς τομείς οι οποίοι ενθαρρύνονται να υιοθετήσουν παρόμοια φιλοσοφία για την τυποποίηση της των ΨΔ. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ανάγκη για διασυνδεσιμότητα και διαλειτουργικότητα μεταξύ ΨΔ διαφορετικών τύπων, κλιμάκων και πεδίων εφαρμογής.

- Τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να βοηθήσουν την ανάπτυξη των Έξυπνων Κτιρίων και Πόλεων. Αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για τη δημιουργία, τη παρακολούθηση και την λειτουργία τους. Αξιοποιώντας αισθητήρες, το IoT και πλήθος άλλων συσκευών, συλλέγουν δεδομένα από την επαφή με τους κατοίκους και πετυχαίνουν με αυτόν το τρόπο την καλύτερη κατανόηση των διαδικασιών και υπηρεσιών που απαιτούνται στην καθημερινότητα τους.
- Οι τηλεπικοινωνίες διαδραματίζουν καίριο ρόλο τόσο στη λειτουργία των Έξυπνων Πόλεων όσο και στη δημιουργία του Ψηφιακού Διδύμου αυτής, δεδομένου ότι λειτουργούν ως πλατφόρμα για τη συλλογή και τη συγκέντρωση πληροφοριών και δεδομένων από το αστικό περιβάλλον σε πραγματικό χρόνο. Για να το επιτύχουν αυτό χρησιμοποιούν ένα μεγάλο πλήθος τόσο ενσύρματων όσο και ασύρματων τεχνολογιών επικοινωνίας.
- Τα Ψηφιακά Δίδυμα Έξυπνων Πόλεων παρέχουν την δυνατότητα της παρακολούθησης της κατάστασης της πόλης σε πραγματικό χρόνο, βοηθώντας τους υπεύθυνους της διοίκησης στη λήψη αποφάσεων και ελέγχου των διάφορων λειτουργιών και υπηρεσιών.
- Τα Ψηφιακά Δίδυμα Έξυπνων Πόλεων συμβάλουν στον αποτελεσματικό Αστικό Σχεδιασμό, στην καλύτερη Διαχείριση της Κίνησης και των Μεταφορών, της Ενέργειας, των Αποβλήτων, των Υποδομών και Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης, καθώς επίσης και στη Βελτίωση του Συστήματος Δημόσιας Υγείας και στη Διασφάλιση της Ποιότητας Τροφίμων και Νερού. Εξασφαλίζουν έτσι ένα υψηλό επίπεδο ζωής για τους κατοίκους της πόλης.
- Τα Ψηφιακά Δίδυμα Έξυπνων Πόλεων χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση φυσικών φαινομένων και καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Επομένως οι αρμόδιοι διοικούντες μπορούν να προβλέψουν τις επιπτώσεις τέτοιων φαινομένων και να λάβουν τα απαραίτητα μέτρα για τον μετριασμό βλαβών και κινδύνων για τους πολίτες. Επίσης, μπορούν να προβούν ταχύτερα και με μεγαλύτερη οργάνωση σε επιδιορθώσεις στην πόλη, εξασφαλίζοντας καλύτερο βιοτικό επίπεδο και το αίσθημα της Ασφάλειας στους κατοίκους.

6.3. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παρούσα διπλωματική εργασία, τα ΨΔ πρόκειται να αποτελέσουν βασικό εργαλείο της σύγχρονης εποχής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται μια εκθετική αύξηση των ερευνητικών εργασιών και δημοσιεύσεων γύρω από τις εφαρμογές των ΨΔ, ωστόσο στον κατασκευαστικό κλάδο και τον τομέα των Πολιτικών Μηχανικών οι έρευνες βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο και απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση.

Ορισμένες ιδέες για πιο εκτενή μελέτη είναι οι εξής :

- i. Η δημιουργία ενός τυποποιημένου προτύπου ενός Ψηφιακού Διδύμου μιας κατασκευής, είτε νέας ή υφιστάμενης, για την γρήγορη και αποτελεσματική ανάπτυξη ΨΔ.
- ii. Η μελέτη ενσωμάτωσης της Τεχνητής Νοημοσύνης στις προσομοιώσεις με τη βοήθεια των ΨΔ, για να εξετάζονται ακόμα περισσότερα πιθανά σενάρια.
- iii. Η ανάλυση κόστους της χρήσης των ΨΔ στην κατασκευή ενός κτιρίου ή ενός τεχνικού έργου, για την επίτευξη οικονομικότερων αποτελεσμάτων.
- iv. Η μελέτη εφαρμογής των ΨΔ για την ανάπτυξη «πράσινων» και ενεργειακά βιώσιμων κτιρίων και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις.
- v. Η μελέτη εφαρμογής ΨΔ για την παρακολούθηση της κατάστασης αρχαιολογικών χώρων και ιστορικών κτιρίων για τη διασφάλιση της επιβίωσής τους.
- vi. Η μελέτη εφαρμογής διασυνδεδεμένων ΨΔ σε κλίμακα μιας μικρής πόλης, για την επίτευξη της αποτελεσματικής επικοινωνίας και αρμονικής συνεργασίας μεταξύ τους.

7ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ : Βιβλιογραφία

5 Key benefits of smart buildings. (n.d.). <https://www.irisys.net/blog/5-key-benefits-of-smart-buildings>

Authena. (2022, September 26). *What are digital twins and how do they affect the manufacturing industry?* Authena. <https://authena.io/what-are-digital-twins/>

Bajaj, M., Cole, B., & Zwemer, D. (2016). Architecture to Geometry - integrating system models with mechanical design. *AIAA SPACE 2016*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-5470>

Bakhtiari, V., Piadeh, F., Behzadian, K., & Kapelan, Z. (2023). A critical review for the application of cutting-edge digital visualisation technologies for effective urban flood risk management. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104958. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104958>

Bazilevs, Y., Deng, X., Korobenko, A., Di Scalea, F. L., Todd, M. D., & Taylor, S. G. (2015). Isogeometric fatigue damage prediction in Large-Scale composite structures driven by dynamic sensor data. *Journal of Applied Mechanics*, 82(9). <https://doi.org/10.1115/1.4030795>

Boje, C., Guerriero, A., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>

Boje, C., Kubicki, S., Zarli, A., & Rezgui, Y. (2021). A Digital Twin factory for construction. In *CRC Press eBooks* (pp. 299–304). <https://doi.org/10.1201/9781003191476-41>

Botín-Sanabria, D. M., Mihăiță, A., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & De J Lozoya-Santos, J. (2022). Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive review. *Remote Sensing*, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/rs14061335>

Brilakis, I., Pan, Y., Borrmann, A., Mayer, H.-G., Rhein, F., Vos, C., Pettinato, E., & Wagner, S. (2019). “*Built Environment Digital Twinning*”. International Workshop on Built Environment Digital Twinning presented by TUM Institute for Advanced Study and Siemens AG. <https://doi.org/10.17863/CAM.65445>

Canedo, A. (2016). Industrial IOT lifecycle via Digital Twins. *Proceedings of the Eleventh IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis*. <https://doi.org/10.1145/2968456.2974007>

Chen, Y. (2017). Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and enablers. *Engineering*, 3(5), 588–595. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.04.009>

Cisco. (2023, October 16). *What is a smart building?* Cisco. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/smart-building/what-is-a-smart-building.html>

Davila Delgado, J. M., & Oyedele, L. (2021). Digital Twins for the built environment: Learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*, 49, 101332. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332>

Definition of digital twin - gartner information technology glossary. (n.d.). <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>

Demkovich, N., Yablochnikov, E., & Abaev, G. (2018). Multiscale modeling and simulation for industrial cyber-physical systems. *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. <https://doi.org/10.1109/icphys.2018.8387674>

Digital Twin | Siemens. (n.d.). Siemens Digital Industries Software. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/digital-twin/24465>

Douglas, D., Kelly, G., & Kassem, K. (2021). Bim, digital twin and cyber-physical systems: Crossing and blurring boundaries. *Proceedings of the 2021 European Conference on Computing in Construction*. <https://doi.org/10.35490/ec3.2021.196>

Drosos, D., Vougioukas, D., Kalligeros, E., Kokolakis, S., Skianis, C., Δρόσος, Δ., Βουγιούκας, Δ., Καλλίγερος, Ε., Κοκολάκης, Σ., & Σκιάνης, Χ. (2015). Εισαγωγή στην Επιστήμη των Υπολογιστών & Επικοινωνιών. <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/4582>

Fan, C., Zhang, C., Yahja, A., & Mostafavi, A. (2021). Disaster City Digital Twin: A Vision for integrating artificial and Human Intelligence for Disaster Management. *International Journal of Information Management*, 56, 102049. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.102049>

Feng, J., Ma, L., Broyd, T., & Chen, K. (2021). Digital twin and its implementations in the civil engineering sector. *Automation in Construction*, 130, 103838. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103838>

Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital Twin: enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2998358>

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for future NASA and U.S. Air Force Vehicles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference. 14th AIAA*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>

Gockel, B., Tudor, A., Brandyberry, M., Penmetsa, R., & Tuegel, E. (2012). Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles. *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference. 14th AIAA*. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1813>

Grieves M., (2011), *Virtually Perfect: Driving Innovative and Lean Products through Product Lifecycle Management.*, Space Coast Press

Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper, 1(2014)*, 1-7.

Grieves, M. W. (2005). Product Lifecycle Management: The New Paradigm For Enterprises. *International Journal of Product Development*, 2(1/2), 71. <https://doi.org/10.1504/ijpd.2005.006669>

Grieves, M. W. (2023). Digital Twins: Past, present, and future. *The Digital Twin*, 97–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_4

Grieves, M., & Vickers, J. (2016). Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 85–113. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

Grübel, J., Thrash, T., Aguilar, L., Gath-Morad, M., Chatain, J., Sumner, R. W., Hölscher, C., & Schinazi, V. R. (2022). The Hitchhiker's Guide to Fused Twins: A Review of Access to Digital Twins in situ in Smart Cities. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2202.07104>

Haidine, A., Hassani, S. E., Aqqal, A., & Hannani, A. (2016). The role of communication technologies in building future smart cities. In InTech eBooks. <https://doi.org/10.5772/64732>

Hochhalter, J.D., Leser, W.P., Newman, J.A., Glaessgen, E.H., Gupta, V.K., & Yamakov, V.I. (2014). Coupling Damage-Sensing Particles to the Digital Twin Concept.

How Digital Twins enable intelligent Cities - Huawei Enterprise. (n.d.). Huawei Enterprise. <https://e.huawei.com/it/blogs/industries/insights/2020/how-digital-twins-enable-intelligent-cities>

Huurdeeman, A. A. (2003b). *The worldwide history of telecommunications*. <https://doi.org/10.1002/0471722243>

Kanowitz, S. (2023, July 10). *How digital twins can enrich emergency response*. Route Fifty. <https://www.route-fifty.com/infrastructure/2023/04/how-digital-twins-can-enrich-emergency-response/385286/>

Khajavi, S. H., Motlagh, N. H., Jaribion, A., Werner, L. C., & Holmström, J. (2019). Digital Twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. *IEEE Access*, 7, 147406–147419. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2946515>

Kraft, E. (2016). The Air Force Digital Thread/Digital Twin - Life cycle integration and use of computational and experimental knowledge. *54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.2016-0897>

Lee, E. A. (2015). The Past, Present and Future of Cyber-Physical Systems: A focus on models. *Sensors*, 15(3), 4837–4869. <https://doi.org/10.3390/s150304837>

Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. (2013). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38–41. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>

Lee, J., Lapira, E., Bagheri, B., & Kao, H. (2013b). Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, 1(1), 38–41. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2013.09.005>

Li, D., Yu, W., & Shao, Z. (2021). Smart city based on digital twins. *Computational Urban Science*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s43762-021-00005-y>

Liu, C., Zhang, P. H., & Xu, X. (2023). Literature review of digital twin technologies for civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 2(3), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2023.100050>

Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2021). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>

Liu, Y., Zhang, L., Yang, Y., Zhou, L., Ren, L., Wang, F., Liu, R., Pang, Z., & Deen, M.J. (2019). A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin. *IEEE Access*, 7, 49088-49101.

Liu, Z., & Deng, Z. (2017). A systematic method of integrating BIM and sensor technology for sustainable construction design. *Journal of Physics: Conference Series*, 910, 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/910/1/012071>

Liu, Z., Meyendorf, N., & Mrad, N. (2018). The role of data fusion in predictive maintenance using digital twin. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5031520>

Lu, Y., Liu, C., Wang, K. I., Huang, H., & Xu, X. (2020). Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101837. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>

Madni, A. M., Madni, C. C., & Lucero, S. (2019). Leveraging Digital twin technology in Model-Based Systems engineering. *Systems*, 7(1), 7. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>

Madubiike, O. C., Anumba, C. J., & Khallaf, R. (2022). A review of digital twin applications in construction. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 145–172. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.008>

Microsoft. (2020). The promise of a digital twin strategy, Best practices for designers and manufacturers of products and industrial equipment

Napolitano, E. V. (2023). Intelligent Technologies for Urban Progress: Exploring the role of AI and advanced telecommunications in smart city evolution. In *Communications in computer and information science* (pp. 676–683). https://doi.org/10.1007/978-3-031-42941-5_61

Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia Manufacturing*, *11*, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>

Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). Digital Twin Application in the construction industry: A literature review. *Journal of Building Engineering*, *40*, 102726. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102726>

Parrott, A., & Warshaw, L. (2017). *Industry 4.0 and the Digital Twin: Manufacturing Meets Its Match*. New York: Deloitte University Press.

Philips. (2019, November 21). *The rise of the digital twin: how healthcare can benefit*. <https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html>

Pregolato, M., Gunner, S., Voyagaki, E., De Risi, R., Carhart, N. J., Gavriel, G., Tully, P., Tryfonas, T., Macdonald, J. H. G., & Taylor, C. R. (2022). Towards Civil Engineering 4.0: Concept, workflow and application of Digital Twins for existing infrastructure. *Automation in Construction*, *141*, 104421. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421>

Qolomany, B., Al-Fuqaha, A., Gupta, A., Benhaddou, D., Alwajidi, S., Qadir, J., & Fong, A. (2019). Leveraging machine learning and big data for smart Buildings: A comprehensive survey. *IEEE Access*, *7*, 90316–90356. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2926642>

Reifsnider, K., & Majumdar, P. (2013). Multiphysics stimulated simulation digital twin methods for fleet management. *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. <https://doi.org/10.2514/6.2013-1578>

Ríos, J., Hernández, J. C., Oliva, M., & Mas, F. (2015). Product Avatar as digital counterpart of a physical individual product: literature review and implications in an aircraft. *ISPE CE*, 657–666. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-544-9-657>

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), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>

Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015b). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>

Sacks, R., Brilakis, I., Pikas, E., Xie, H., & Girolami, M. (2020). Construction with digital twin information systems. *Data-Centric Engineering*, 1. <https://doi.org/10.1017/dce.2020.16>

Salima, Y. (2024, February 5). *History of telecommunication*. Encyclopedia. <https://encyclopedia.pub/entry/35081>

Schluse, M., & Roßmann, J. (2016). From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. *IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*. <https://doi.org/10.1109/syseng.2016.7753162>

Sharma, A., Kosasih, E. 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, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. M. (2021). Digital Twin: origin to future. *Applied System Innovation*, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/asi4020036>

Steindl, G., Stagl, M., Kasper, L., Kästner, W., & Hofmann, R. (2020). Generic Digital twin architecture for industrial energy systems. *Applied Sciences*, 10(24), 8903. <https://doi.org/10.3390/app10248903>

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2017). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(9–12), <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>

Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin in industry: State-of-the-Art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/tii.2018.2873186>

Tchana, Y., Ducellier, G., & Remy, S. (2019). Designing a unique Digital Twin for linear infrastructures lifecycle management. *Procedia CIRP*, 84, 545–549. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.176>

Technologies, U. (n.d.). *Digital twins*. Unity. <https://unity.com/solutions/digital-twins>

Tomczyk, M., & Valk, H.V. (2022). Digital Twin Paradigm Shift: The Journey of the Digital Twin Definition. *International Conference on Enterprise Information Systems*.

Tuegel, E.J. (2012). The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization.

UMaine (2009), Chapter 7, Networking And Telecommunications, <https://www.slideshare.net/mgraham213/networking-and-telecommunications>,

Utku, D. H., Çatak, F. Ö., Kuzlu, M., Sarp, S., Jovanovic, V., Cali, Ü., & Zohrabi, N. (2023). Digital Twin Applications for Smart and Connected Cities. In *Digital twin driven intelligent systems and emerging metaverse* (pp. 141–154). https://doi.org/10.1007/978-981-99-0252-1_6

Vrabič, R., Erkoyuncu, J. A., Butala, P., & Roy, R. (2018). Digital twins: Understanding the added value of integrated models for through-life engineering services. *Procedia Manufacturing*, 16, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.167>

Walters, A. (n.d.). *National Digital Twin Programme*. Centre for Digital Built Britain Completed Its Five-year Mission and Closed Its Doors at the End of September 2022. <https://www.cdbs.cam.ac.uk/what-we-did/national-digital-twin-programme>

Walters, A. (n.d.-a). *About the Centre for Digital Built Britain*. Centre for Digital Built Britain Completed Its Five-year Mission and Closed Its Doors at the End of September 2022. <https://www.cdbs.cam.ac.uk/AboutCDBB>

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Wei, H., Lim, K. Y. H., & Cai, Y. (2022). Digital Twin and Industry 4.0 enablers in building and Construction: a survey. *Buildings*, 12(11), 2004. <https://doi.org/10.3390/buildings12112004>

What is a Digital Twin? - Digital Twin Technology Explained - AWS. (n.d.). Amazon Web Services, Inc. <https://aws.amazon.com/what-is/digital-twin/>

What is a digital twin? | IBM. (n.d.). <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>

What is a digital twin? How intelligent data models can shape the built world. (2022, June 30). <https://www.autodesk.com/design-make/articles/what-is-a-digital-twin>

White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103064>

Wikipedia contributors. (2024, February 8). *Telecommunications*. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Telecommunications>

Yang, D., Karimi, H. R., Kaynak, O., & Yin, S. (2021). Developments of digital twin technologies in industrial, smart city and healthcare sectors: a survey. *Complex Engineering Systems*. <https://doi.org/10.20517/ces.2021.06>

Yaqoob, I., Hashem, M., Mehmood, Y., Gani, A., Mokhtar, S. B., & Guizani, S. (2017). Enabling communication technologies for smart cities. *IEEE Communications Magazine*, 55(1), 112–120. <https://doi.org/10.1109/mcom.2017.1600232cm>

Zheng, P., Xu, X., & Chen, C. (2018). A data-driven cyber-physical approach for personalised smart, connected product co-development in a cloud-based environment. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(1), 3–18. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1430-y>

Αλεξόπουλος Α., Λαγογιάννης Γ. (2003), *Τηλεπικοινωνίες και Δίκτυα Υπολογιστών*, 6η έκδοση
Δίπλα Τ., (2022), *Διερεύνηση της εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων στη διαχείριση τεχνικών έργων*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.

Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες (2006), Σημειώσεις διάλεξης, Ε.Κ.Π.Α. , Τμήμα Πληροφορικής & Τηλεπικοινωνιών, Τομέας Επικοινωνιών και Επεξεργασίας Σήματος

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών

Κόκκινος Α., (2022), *Digital Twins: Μελέτη εφαρμογών cyber physical συστημάτων κατασκευής κτιρίων*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π.

Λεονταρίδης Β., *Digital Twins*, Διπλωματική Εργασία, Πα.Δ.Α.

Μαλαματή Λούτα (2015), *Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες*, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Σημειώσεις διάλεξης

Μπασάς Β., (2022), *Τα Ψηφιακά Δίδυμα στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία έργων*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Α.Π.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ : Το Ψηφιακό Δίδυμο της γέφυρας Clifton

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που πρότειναν οι Pregolato et al. για να δημιουργήσουν το Ψηφιακό Δίδυμο μιας υφιστάμενης υποδομής. Πρόκειται για την κρεμαστή γέφυρα Clifton, στο Μπρίστολ του Ηνωμένου Βασιλείου. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία θα μπορεί να λειτουργήσει ως πρότυπο ώστε να τυποποιηθεί με κάποιο τρόπο η διαδικασία δημιουργίας ενός ΨΔ ενός υφιστάμενου έργου. Η ύπαρξη τέτοιων προτύπων συμβάλλουν στην εδραίωση της χρήσης ΨΔ από τον Κλάδο των Αρχιτεκτόνων και των Πολιτικών Μηχανικών (AECO).

Η διαδικασία που πρότειναν απαρτίζεται από πέντε βήματα (Σχήμα Π.1) :

Βήμα 1ο : Καθορισμός Δεδομένων και Αναγκών / Data and Need Acquisition

Αυτό το βήμα αποτελείται από μια έρευνα στο πραγματικό έργο, η οποία επισύρει τις συνεχείς πληροφορίες που απαιτούνται για την κατασκευή του Ψηφιακού Διδύμου. Δημιουργεί πληροφορίες για τις λειτουργικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση, καθιστώντας σαφή τους στόχους και τις αποφάσεις που θα υποστηρίζει το μοντέλο, καθώς και τις ενέργειες που παρέχουν την ανατροφοδότηση μεταξύ του ΨΔ και του έργου.

Βήμα 2ο : Ψηφιακή Μοντελοποίηση / Digital Modeling

Αυτό το βήμα περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός "εικονικού" μοντέλου που προσομοιώνει, οπτικοποιεί, ελέγχει και γενικώς μοντελοποιεί τη συμπεριφορά της υποδομής. Πρέπει να δημιουργηθούν ανοιχτές και καλά τεκμηριωμένες διεπαφές εάν πρόκειται να γίνει μέρος ενός οικοσυστήματος συνδεδεμένων ΨΔ, και αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τη φάση σχεδίασης. Το ΨΔ πρέπει να είναι σε θέση να συνδυάζεται και με άλλα ΨΔ και δεδομένα (π.χ. για βαθμονόμηση, επικύρωση, ενημέρωση κ.λπ.), απαιτώντας κατάλληλες διεπαφές μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών.

Βήμα 3ο : Μετάδοση Δεδομένων από Αισθητήρες / Sensor Data Transmission

Η συλλογή δεδομένων από αισθητήρες γίνεται στο πραγματικό μέρος ενός Ψηφιακού Διδύμου. Οι κατάλληλοι αισθητήρες επιτρέπουν την επικύρωση και ενημέρωση του ΨΔ, ενώ τα στοιχεία διαχείρισης δεδομένων διευκολύνουν την αυτόματη ανάκτηση και επεξεργασία τους. Το

σύστημα ανίχνευσης και μετάδοσης δεδομένων πρέπει να συλλέγει, να μεταφέρει και να αποθηκεύει δεδομένα, παρουσιάζοντας τα και τα μεταδεδομένα του μέσω ανοιχτών διεπαφών για χρήση από το πλαίσιο ενσωμάτωσης. Η απαιτούμενη ποιότητα δεδομένων (π.χ. ανάλυση και ρυθμός δειγματοληψίας) εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής και έχει επίπτωση στην τεχνολογία ανίχνευσης και επικοινωνιών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

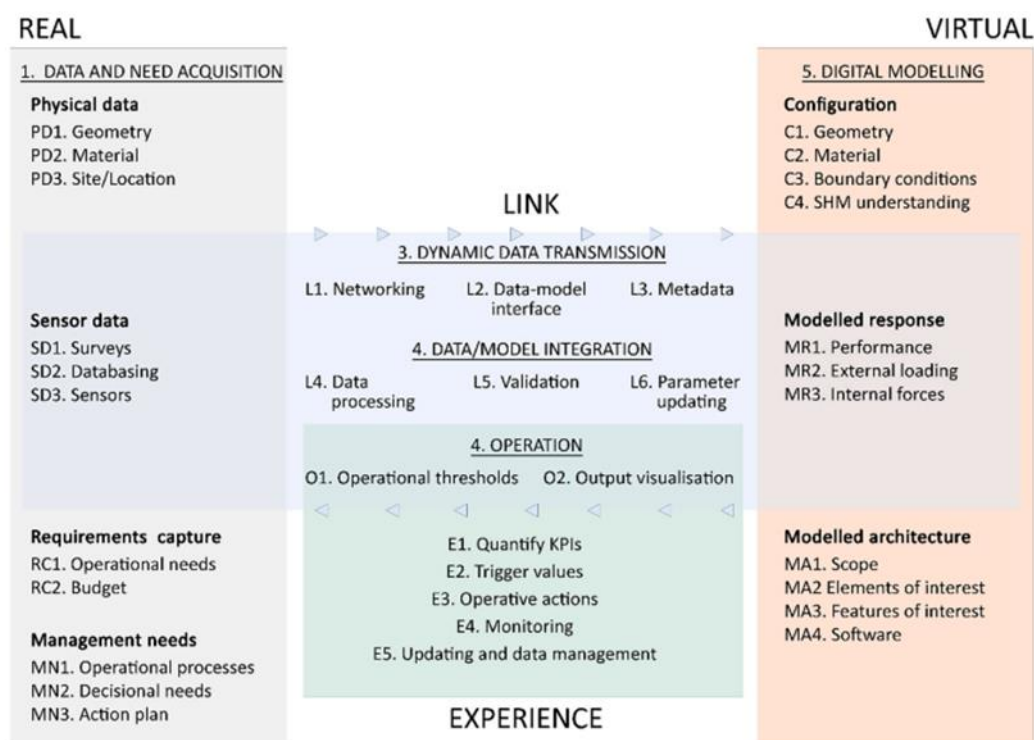
Βήμα 4ο : Ενσωμάτωση Δεδομένων – Μοντέλου / Data - Model Integration

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ενός Ψηφιακού Διδύμου είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του πραγματικού και του εικονικού μέρους. Μια αρχιτεκτονική διαλειτουργικότητας εξασφαλίζει αυτήν τη σύνδεση, η οποία πρέπει να είναι ευέλικτη για να προσαρμόζεται στις εξελίξεις της τεχνολογίας, του περιβάλλοντος και της κοινωνίας. Απαιτεί η υιοθέτηση προτύπων, καθώς και πλαισίων διακυβέρνησης που διευκρινίζουν θέματα ιδιοκτησίας δεδομένων και συμφωνιών μεταξύ των διάφορων υπηρεσιών.

Βήμα 5ο : Λειτουργία / Operation

Ο σκοπός του Ψηφιακού Διδύμου πρέπει να είναι η επιλογή των αποδοτικότερων και αποτελεσματικότερων ενεργειών για την διαχείριση μιας υποδομής. Ένα ΨΔ ενημερώνει τις λειτουργικές αποφάσεις με βάση τα αποτελέσματά από τη διαδικασία ανάλυσης των δεδομένων, δηλαδή ουσιαστικά το να επιλέγεται ποια δράση είναι η καλύτερη με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες. Αυτό θα επιτρέψει μεγαλύτερη αυτονομία λειτουργίας και βελτίωση της απόδοσης σε βάθος χρόνου.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών



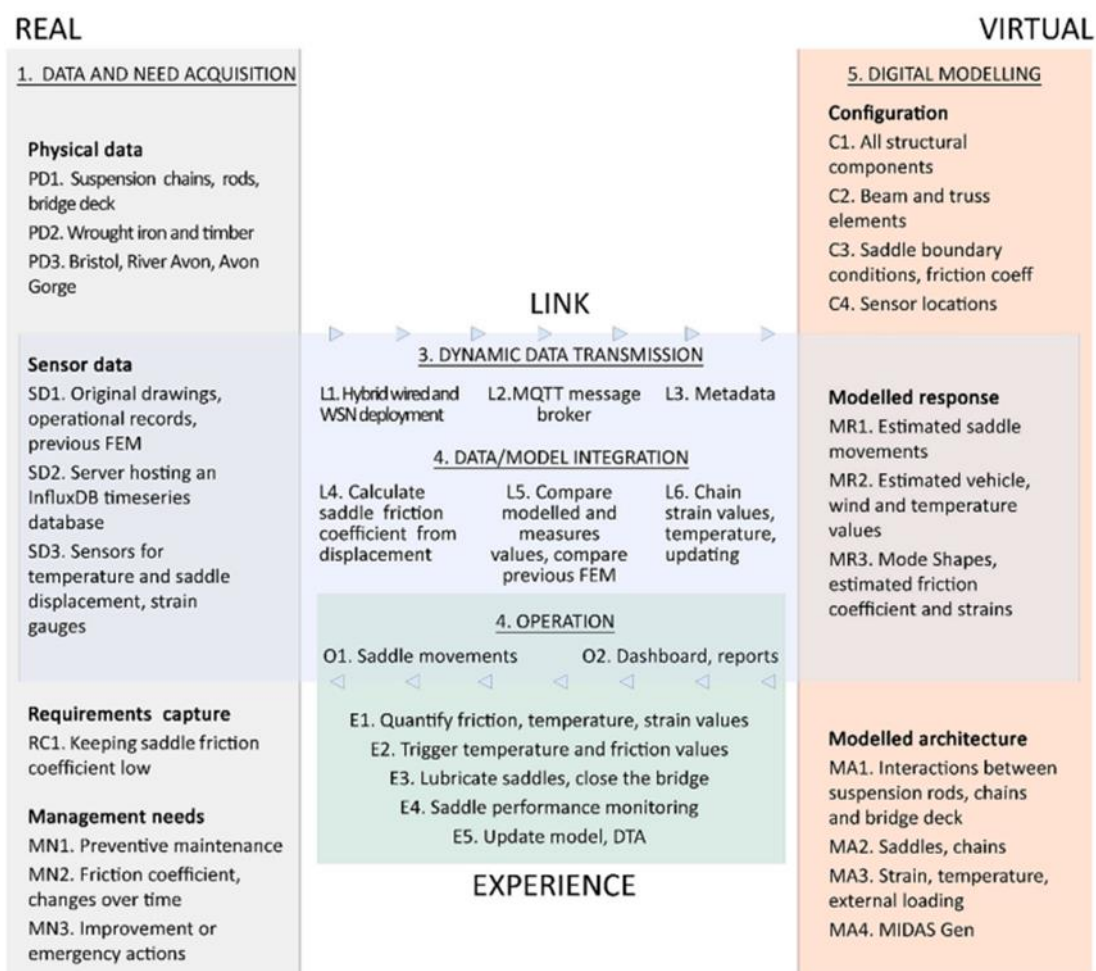
Σχήμα Π.1 : Η διαδικασία δημιουργίας ενός Ψ.Δ. μιας υφιστάμενης υποδομής, Prengolato et al., 2022

Η κρεμαστή γέφυρα Clifton βρίσκεται στο Μπρίστολ της Αγγλίας και ολοκληρώθηκε το 1864. Αποτελεί εξαιρετικό παράδειγμα παλαιάς υποδομής η οποία παρουσιάζει σημάδια γήρανσης και φθοράς και έχει γίνει ελλιπής συντήρηση τα τελευταία χρόνια. Παρόλα αυτά η γέφυρα έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών ακαδημαϊκών ερευνών, επομένως υπάρχουν ήδη αρκετά μοντέλα της δομής για βαθμονόμηση και εγκατεστημένοι αισθητήρες για την επικύρωση του εικονικού μοντέλου (Σχήμα Π.2). Η μελέτη των Prengolato et al. εφαρμόζει κάθε βήμα στα πραγματικά δεδομένα και ενέργειες, στοιχεία και συστήματα, που συλλέγονται από την γέφυρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα Π.3.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) στα πεδία εφαρμογών των Πολιτικών Μηχανικών



Σχήμα Π.2 : Οι τοποθετημένοι αισθητήρες στην κρεμαστή γέφυρα Clifton, Prengolato et al., 2022



Σχήμα Π.3 : Η διαδικασία δημιουργίας του Ψ.Δ. της γέφυρας Clifton, Prengolato et al., 2022

Σύμφωνα με την προτεινόμενη διαδικασία τα βήματα προσαρμόστηκαν στην περίπτωση της γέφυρας Clifton ως εξής :

Βήμα 1ο : Καθορισμός Δεδομένων και Αναγκών / Data and Need Acquisition

Χωρίς δεδομένα από το BIM στα οποία να βασιστεί, η έρευνα για την τρέχουσα κατάσταση της γέφυρας περιλαμβάνει την εξέταση ιστορικών σχεδίων και λειτουργικών εγγραφών από αρχεία και επί τόπου επισκέψεις για να ελεγχθούν συγκεκριμένες λεπτομέρειες από κοντά. Συλλέχθηκαν όλα τα γεωμετρικά δεδομένα και οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του φορέα, των καλωδίων ανάρτησης και των πυλώνων της γέφυρας. Για την συλλογή δεδομένων για τις θερμοκρασιακές μεταβολές, των μετακινήσεων και του βάρους των οχημάτων η γέφυρα εξοπλίστηκε με κατάλληλους αισθητήρες. Οι αισθητήρες θερμοκρασίας μετρούν τη θερμοκρασία των καλωδίων, ενώ αισθητήρες τοποθετούνται σε κάθε πυλώνα για να μετρούν τις μετατοπίσεις τους. Ο ανατολικός πυλώνας της γέφυρας διαθέτει ένα μετρητή που τοποθετείται στα καλώδια για τη μέτρηση της παραμόρφωσης τους. Τέλος, υπάρχουν ακόμα δύο μετεωρολογικοί σταθμοί και δύο ζυγαριές για τη μέτρηση του βάρους ("weigh-in-motion") των οχημάτων.

Βήμα 2ο : Ψηφιακή Μοντελοποίηση / Digital Modeling

Έχει αναπτυχθεί ένα τρισδιάστατο (3D) Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) της γέφυρας για να προσομοιώσει αριθμητικά την απόκριση της υπό διάφορες συνθήκες φορτίσης. Ολόκληρη η δομή της γέφυρας έχει συμπεριληφθεί στο 3D FEM, εξαιρουμένων των πυλώνων που έχουν θεωρηθεί ως άκαμπτες. Οι δοκοί καθορίζονται από τον χρήστη για να αντιπροσωπεύουν τις γεωμετρικές ιδιότητες των σιδερένιων συστατικών. Το ξύλινο κατάστρωμα δεν παρέχει σημαντική ακαμψία και δεν έχει μοντελοποιηθεί. Η συμβολή του στο βάρος έχει συμπεριληφθεί ως νεκρό φορτίο. Τα καλώδια ανάρτησης και οι κατακόρυφες σιδερένιες δοκοί μοντελοποιούνται ως στοιχεία δοκών. Οι ράβδοι ανάρτησης μοντελοποιούνται ως άκαμπτα στοιχεία δοκού και συνδέονται με το κατάστρωμα και τα καλώδια. Η αλληλεπίδραση των ράβδων ανάρτησης με τους κρίκους των καλωδίων έχει ληφθεί υπόψη στο μοντέλο.

Βήμα 3ο : Μετάδοση Δεδομένων από Αισθητήρες / Sensor Data Transmission

Η πλειονότητα του συστήματος των αισθητήρων βρίσκεται στις κορυφές των πυλώνων και βασίζονται στις ενσύρματες επικοινωνίες. Όσον αφορά τους αισθητήρες παραμόρφωσης που τοποθετούνται σε κάθε κρίκο, οι μετρήσεις δημοσιεύονται μέσω δικτύου IP σε έναν διακομιστή που βρίσκεται σε επίπεδο εδάφους σε ένα από τα κοντινά σπίτια. Η ανάπτυξη ενός Δικτύου Ασύρματων Αισθητήρων (WSN) καταργεί την ανάγκη παροχής ενσύρματης ενέργειας και επικοινωνίας στον χώρο χρησιμοποιώντας εναλλακτική παροχή ενέργειας και τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας. Θα λαμβάνει τις αναγνώσεις θερμοκρασίας και θα τις δημοσιεύει στον τοπικό διακομιστή που φιλοξενεί μια περίπτωση βάσης δεδομένων χρονοσειρών. Υπάρχουν δύο στρώματα στα οποία το μοντέλο και τα δεδομένα αλληλεπιδρούν : (i) το επίπεδο λογισμικού, δηλαδή η διεπαφή του λογισμικού μοντέλου μέσω της οποίας μπορούν να τροποποιηθούν παράμετροι και να κληθεί το μοντέλο και (ii) το επίπεδο εφαρμογής, δηλαδή η διεπαφή στην οποία ο σύνδεσμος "κατανοεί" τη μέτρηση εισόδου που λαμβάνει και επιστρέφει πληροφορίες σχετικά με το πώς να προσαρμόσει εν τέλει το μοντέλο. Σε επίπεδο λογισμικού, η ενσωμάτωση μεταξύ του μοντέλου και των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο απαιτεί από κάθε λειτουργική μονάδα να διαθέτει ένα σύνολο διασύνδεσης υπολογιστικών APIs μέσω των οποίων μπορεί να αλληλεπιδράσει. Το λογισμικό του ΨΔ θα εγγραφεί σε αυτήν τη ροή δεδομένων και θα λαμβάνει έτσι οποιεσδήποτε μετρήσεις λαμβάνονται από τους αισθητήρες.

Βήμα 4ο : Ενσωμάτωση Δεδομένων – Μοντέλου / Data - Model Integration

Διάφορα είδη δεδομένων αισθητήρων είναι παρόντα και πρέπει να ενσωματωθούν. Για να επιτευχθεί αυτό, το μοντέλο απαιτεί ένα σύνθετο σύνολο διεπαφών εφαρμογής (APIs). Το λογισμικό του ΨΔ πρέπει να είναι σε θέση να ενημερώνει το Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων αλλάζοντας τις διάφορες παραμέτρους. Τα χαρακτηριστικά του ενδιαφέροντος επιστρέφονται ως μεταβλητές λογισμικού που το ΨΔ μπορεί να έχει πρόσβαση. Η μελέτη αυτή βρίσκεται προς το παρόν στο στάδιο της εξερεύνησης, ωστόσο εξελιγμένα πακέτα λογισμικού επιτρέπει την κατασκευή και εκτέλεση μοντέλων σε ένα προγραμματιστικό περιβάλλον όπου τα χαρακτηριστικά μπορούν να τροποποιηθούν βασιζόμενα σε μεταβλητές. Πριν από την παραγωγή οποιασδήποτε έξοδου, το ΨΔ συγκρίνει τις μοντελοποιημένες τιμές παραμόρφωσης με την καταγεγραμμένη τιμή για να βοηθήσει στην επιβεβαίωση ότι οι παράμετροι του μοντέλου είναι σωστές. Συνεπείς ή συστηματικές αποκλίσεις μεταξύ των μοντελοποιημένων

και μετρημένων τιμών απαιτούν την ενημέρωση του μοντέλου που βασίζεται σε όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες. Στη συνέχεια, το ΨΔ συνδυάζει τις τιμές παραμόρφωσης με τις σχετικές καταγεγραμμένες τιμές μετατόπισης για να υπολογίσει το χαρακτηριστικό ενδιαφέροντος. Αυτά καταγράφονται σε μια βάση δεδομένων χρονοσειρών, ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν ιστορικές τάσεις και οι τιμές να παρουσιάζονται ύστερα στη διαχείριση της υποδομής. Για τις ανάγκες της μελέτης της γέφυρας το ΨΔ χρησιμοποιείται για την τακτική συντήρηση και για την παρακολούθηση της κατάστασης της. Όλες οι εγγραφές διατηρούνται ως ιστορικό της συμπεριφοράς της υποδομής, το οποίο μπορεί να είναι χρήσιμο για μελλοντική ανάλυση.

Βήμα 5ο : Λειτουργία / Operation

Παρά το γεγονός ότι τα ιστορικά έγγραφα θα μπορούσαν να επιτρέψουν τον καθορισμό των λειτουργικών ορίων, στην περίπτωση μελέτης της γέφυρας χρησιμοποιήθηκε η κρίση μηχανικών, για να εκτιμηθεί ποια είναι η μέγιστη ασφαλής παραμόρφωση στα καλώδια. Έτσι, το ΨΔ μπορεί να αναφέρει σε πραγματικό χρόνο και με βάση τις ιστορικές τιμές πότε είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα για την ασφαλή λειτουργία της υποδομής. Όταν η γέφυρα υπερβεί τα επιτρεπτά όρια λειτουργίας, ενεργοποιούνται ένα σύνολο προκαθορισμένων ενεργειών και ειδοποιήσεων για τον έλεγχο και την επιδιόρθωση των βλαβών. Επίσης το ΨΔ χρησιμοποιεί και άλλα δεδομένα, όπως για παράδειγμα την πρόβλεψη του καιρού, ώστε οι υπεύθυνοι για την λειτουργία της γέφυρας να προβλέπουν την κατάσταση της γέφυρας και να οργανώσουν τις διάφορες εργασίες συντήρησης της.

Το ΨΔ της γέφυρας του Clifton στοχεύει στο να βοηθήσει τους διαχειριστές να εξασφαλίζουν την καλύτερη απόδοση, τη λειτουργία και τη συντήρηση της. Βασίζεται σε ένα συνδεδεμένο περιβάλλον, έχει πρωτόκολλα για τον κανονισμό της διακυβέρνησης (DTA) και μια δομή που μπορεί να προσαρμοστεί στην τεχνολογία καθώς εξελίσσεται. Ωστόσο, ορισμένοι παράγοντες (π.χ. περιορισμοί στο πρόγραμμα συντήρησης, προϋπολογισμός) βρίσκονται προς το παρόν εκτός του πεδίου εφαρμογής του DT και, συνεπώς, εξαιρούνται από το μοντέλο, παρόλο που αναγνωρίζεται ότι θα μπορούσαν να έχουν σημαντική επίδραση στην εφαρμογή των αποτελεσμάτων του συστήματος.

Το προτεινόμενο ΨΔ έχει στόχο να καταταχθεί ως ΨΔ Επιπέδου 3, καθώς στοχεύει στο να παρέχει προληπτική συντήρηση, συνοδευόμενη από αναλύσεις της κατάστασης των εξαρτημάτων, εντοπίζοντας τυχόν απαραίτητες επισκευές ή δράσεις πριν από την αστοχία. Μια ταξινόμηση Επιπέδου 3 δικαιολογείται διότι :

- i. το ΨΔ έχει αυτονομία, μερική αυτονομία, και επίσης με την προτεινόμενη μέθοδο έναν δρόμο για πλήρη αυτονομία λήψης αποφάσεων, αν και αρχικά απαιτείται μηχανική κρίση προτού ληφθούν μέτρα
- ii. νοημοσύνη, καθώς το ΨΔ βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα για επικύρωση και ρύθμιση και χρησιμοποιεί τη μηχανική μάθηση για να βελτιώσει την απόκριση του
- iii. το ΨΔ εκπαιδεύεται χρησιμοποιώντας επιβλεπόμενη μάθηση και δεδομένα παράγονται κατά τη λήψη αποφάσεων, για το πότε και αν πρέπει να δράσει ή όχι

Η έννοια των ΨΔ έχει τη δυνατότητα να αλλάξει ριζικά τον σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση των υποδομών, ωστόσο, απαιτείται περισσότερη έρευνα προκειμένου να επιταχυνθεί ο ψηφιακός μετασχηματισμός στον τομέα της ΑΕΕΟ. Στο μέλλον, η μηχανική μάθηση και η τεχνητή νοημοσύνη θα μπορούσαν να παρέχουν στο ΨΔ αυτονομία στη λήψη αποφάσεων και στη διασύνδεση με ΨΔ άλλων υποδομών. Εντούτοις, εντοπίστηκαν ορισμένες προκλήσεις στην ανάπτυξη και υιοθέτηση των ΨΔ, όπως η επικύρωση και η επιχειρηματική περίπτωση πίσω από αυτό.