

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

**Ενσωμάτωση της Βιομηχανίας 4.0 στη βιώσιμη ανάπτυξη έξυπνων πόλεων: «Ο ρόλος των ψηφιακών διδύμων και της τεχνητής νοημοσύνης στη διαχείριση αστικών υποδομών»**

---

Φοιτητής: Καρτεράκης Γεώργιος-Διονύσιος  
Επιβλέπων Καθηγητής: Ζοπουνίδης Κωνσταντίνος

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής:  
Δούμπος Μιχάλης, Καθηγητής  
Ατσαλάκης Γεώργιος, Α. Καθηγητής

Χανιά, 2025



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τον ρόλο της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης στη βιώσιμη ανάπτυξη Έξυπνων Πόλεων, με έμφαση στις εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων και της τεχνητής νοημοσύνης στην παρακολούθηση και διαχείριση αστικών υποδομών. Καθώς οι πόλεις αντιμετωπίζουν αλληπάλληλες επιβαρύνσεις λόγω της ταχείας αστικοποίησης, του υπερπληθυσμού και των προκλήσεων της κλιματικής αλλαγής, οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 είναι σε θέση να προσφέρουν λύσεις που βελτιώνουν την απόδοση και τη βιωσιμότητα των αστικών υποδομών, λειτουργώντας ως ένα ακριβές σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Τα τελευταία χρόνια, τα ψηφιακά δίδυμα, ως δυναμικές αναπαραστάσεις φυσικών συστημάτων σε ψηφιακό περιβάλλον, αποτελούν μια αναδυόμενη αναπτυξιακή τεχνολογική επανάσταση, επιτρέποντας την ακριβή μοντελοποίηση και παρακολούθηση των λειτουργιών μιας πόλης. Μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, παρέχουν, σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη, προγνωστικά εργαλεία και αναλυτικές λύσεις που επιτρέπουν την πρόληψη και έγκαιρη πρόβλεψη κινδύνων, την αποδοτική κατανομή πόρων, και την αναβάθμιση της διαχείρισης υποδομών όπως, ενεργειακά συστήματα, υδάτινο δίκτυο, μεταφορές, δημόσιες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και πολλά άλλα. Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στην λεπτομερή παρουσίαση και αξιολόγηση των πρακτικών εφαρμογών της τεχνολογίας των ψηφιακών διδύμων και της τεχνητής νοημοσύνης σε αστικά περιβάλλοντα, αναλύοντας παραδείγματα από αναπτυσσόμενες Έξυπνες Πόλεις και προτείνοντας βέλτιστες πρακτικές για την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε μεγάλης κλίμακας σενάρια αστικού σχεδιασμού και διαχείρισης. Τέλος, εξετάζονται οι αντίστοιχες προκλήσεις, καθώς και ζητήματα ηθικής, προστασίας δεδομένων και βιωσιμότητας, ενώ διατυπώνονται προτάσεις βελτίωσης για μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας και ανάπτυξης, αναβαθμίζοντας την ασφάλεια και την ποιότητα ζωής των πολιτών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Έξυπνες Πόλεις, ψηφιακά δίδυμα, Βιομηχανία 4.0, βιωσιμότητα, τεχνητή νοημοσύνη, μηχανική μάθηση, μελέτες περιπτώσεων.

## ABSTRACT

This thesis examines the role of the Fourth Industrial Revolution in the sustainable development of smart cities, with an emphasis on the applications of digital twins and artificial intelligence in the monitoring and management of urban infrastructure. As cities are facing successive burdens due to rapid urbanization, overpopulation and climate change challenges, Industry 4.0 technologies are able to provide solutions that improve the performance and sustainability of urban infrastructure, acting as an accurate decision support system. In recent years, digital twins, as dynamic representations of physical systems in a digital environment, constitute an emerging developmental technological revolution, enabling accurate modelling and monitoring of a city's operations. Through real-time data collection and analysis, they provide, in combination with artificial intelligence, predictive tools and analytical solutions that enable prevention and early risk prediction, efficient allocation of resources, and upgrading of infrastructure management such as energy systems, water network, transportation, public emergencies and many more. This paper focuses on the detailed presentation and evaluation of practical applications of digital twins and artificial intelligence technology in urban environments, analyzing examples of developing smart cities and proposing best practices for the integration of these technologies in large-scale urban planning and management scenarios. Finally, the corresponding challenges, as well as ethical, data protection and sustainability issues are addressed, while improvement proposals are formulated for future research and development directions, enhancing the safety and quality of life of citizens.

**Key Words:** Smart cities, digital twins, Industry 4.0, sustainability, artificial intelligence, machine learning, case studies.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>3</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>4</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>7</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>8</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>10</b>
<b>ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση .....	10
1.2 Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση .....	11
1.3 Τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση .....	12
1.4 Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση .....	15
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>19</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ 4.0.....</b>	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
2.1 Βιομηχανία 4.0: Έννοιες και Τεχνολογίες .....	19
2.1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT).....	19
2.1.2 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση .....	21
2.1.3 Μεγάλα Δεδομένα και Υπολογιστικό Νέφος.....	22
2.1.4 Blockchain και Κυβερνοασφάλεια .....	24
2.1.5 Αυτόνομα Ρομποτικά Συστήματα.....	25
2.1.6 Επαυξημένη & Εικονική Πραγματικότητα.....	26
2.2 Ψηφιακά Δίδυμα: Χρήσεις και Εφαρμογές.....	27
2.2.1 Διαστάσεις Ψηφιακών Διδύμων .....	29
2.2.2 Ψηφιακά Δίδυμα και CPS .....	31
2.2.3 Οφέλη Ψηφιακών Διδύμων.....	33
2.2.4 Προκλήσεις Ψηφιακών Διδύμων .....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>36</b>
<b>ΈΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ .....</b>	<b>36</b>
3.1 Εισαγωγή.....	36
3.2 Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά Έξυπνων Πόλεων .....	37
3.2.1 Έξυπνη Οικονομία – Smart Economy .....	38
3.2.2 Έξυπνη Διακυβέρνηση – Smart Government .....	39
3.2.3 Έξυπνη Ζωή – Smart Living.....	40
3.2.4 Έξυπνη Κινητικότητα – Smart Transportation .....	41
3.2.5 Έξυπνο Περιβάλλον – Smart Environment .....	42
3.2.6 Έξυπνοι Άνθρωποι – Smart People .....	42
3.3 Δείκτες Αξιολόγησης Έξυπνων Πόλεων.....	43
3.4 Αρχιτεκτονική Έξυπνων Πόλεων.....	46

3.4.1 Επίπεδο Ανίχνευσης.....	46
3.4.2 Επίπεδο Μετάδοσης.....	47
3.4.3 Επίπεδο Διαχείρισης Δεδομένων .....	48
3.4.4 Επίπεδο Εφαρμογής.....	49
3.5 Κίνδυνοι και Προκλήσεις εντός Έξυπνων Πόλεων.....	50
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>54</b>
<b>ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΚΑΙ ΕΞΥΠΝΕΣ ΠΟΛΕΙΣ .....</b>	<b>54</b>
Εισαγωγή.....	54
4.1 Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Δίδυμων Έξυπνων Πόλεων .....	54
4.2 Μοντέλα και Εργαλεία Ψηφιακών Διδύμων στις Έξυπνες Πόλεις.....	56
4.2.1 Έδαφος.....	57
4.2.2 Κτίρια.....	58
4.2.3 Υποδομή .....	59
4.2.4 Κινητικότητα.....	60
4.2.5 Ψηφιακό Επίπεδο / Έξυπνη Πόλη.....	61
4.2.6 Επαυξημένο Επίπεδο / Ψηφιακό Δίδυμο .....	61
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....</b>	<b>65</b>
<b>ΨΗΦΙΑΚΑ ΔΙΔΥΜΑ ΣΤΗΝ ΑΣΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ .....</b>	<b>65</b>
5.1 Ενεργειακή Διαχείριση.....	65
5.1.1 Προσομοίωση Έξυπνων Μικροδικτύων Ενέργειας .....	66
5.2 Διαχείριση Αστικών Μεταφορών.....	70
5.2.1 Αστικές Εφαρμογές του Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς .....	72
5.3 Διαχείριση Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης.....	75
5.3.1 Αντιμετώπιση Πλημμύρας .....	76
5.3.2 Διαχείριση Σεισμικών Δονήσεων .....	80
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....</b>	<b>84</b>
<b>ΜΕΛΕΤΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΨΔ-ΕΞΥΠΝΩΝ ΠΟΛΕΩΝ .....</b>	<b>84</b>
6.1 Σιγκαπούρη, Ασία .....	84
6.2 Ζυρίχη, Ελβετία.....	89
6.3 Ελληνική Επικράτεια .....	92
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....</b>	<b>98</b>
<b>ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....</b>	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>100</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Γενικό μοντέλο διαστάσεων μιας έξυπνης πόλης (Embarak, 2021) .....	38
Εικόνα 2. Πυραμίδα βασικών δεικτών αξιολόγησης έξυπνων πόλεων .....	44
Εικόνα 3. Επίπεδα ανάπτυξης μιας ψηφιακής δίδυμης έξυπνης πόλης (Goyal, 2023) .....	55
Εικόνα 4. Επίπεδα ανάπτυξης μιας ψηφιακής δίδυμης έξυπνης πόλης (G. White et al., 2021a) .....	57
Εικόνα 5. Ψηφιακή δίδυμη οπτικοποίηση πόλης. Πανοραμική όψη τμήματος της πόλης πριν από πλημμύρα (α), πανοραμική όψη ίδιου τμήματος της πόλης μετά από πλημμύρα (β) (Gaur et al., 2018) .....	77
Εικόνα 6. Αστική προσομοίωση πλημμύρας (G. White et al., 2021b).....	78
Εικόνα 7. Ψηφιακή αναπαράσταση υποδομών εικονικής Σιγκαπούρης (Walker, 2023).....	85
Εικόνα 8. Αποτύπωση τμήματος της πόλης της Ζυρίχης μέσω του προγράμματος “Zürich virtuell” .....	91
Εικόνα 9. Υποθετικό σενάριο ανάλυσης συνεπειών κατά το κλείσιμο τμήματος του αστικού οδικού δικτύου (DUET, 2022) .....	95
Εικόνα 10. Ψηφιακή διασύνδεση της πόλη της Αθήνας (ASTYDAMA, 2024) .....	96

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με τον Παγκόσμιος πληθυσμό να έχει ξεπεράσει τα 8 δισεκατομμύρια και το 56% αυτού να ζει πλέον σε αστικές περιοχές, καταδεικνύεται ευδιάκριτα η εντατική αστικοποίηση που χαρακτηρίζει τη σύγχρονη εποχή. Οι Έξυπνες Πόλεις, αποτελούν μια καινοτόμο προσέγγιση στη βιώσιμη διαχείριση των αστικών υποδομών, όπου η χρήση προηγμένων τεχνολογιών της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης, επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη διαχείριση και βελτιστοποίηση των διαθέσιμων πόρων τους. Έτσι, η παρούσα εργασία εξετάζει την ενσωμάτωση της Βιομηχανίας 4.0 στη διαχείριση των έξυπνων πόλεων, αναλύοντας τις αστείρευτες δυνατότητες που διαθέτουν. Με δεδομένες τις αυξανόμενες απαιτήσεις για αστική βιωσιμότητα, στόχος της έρευνας είναι να αναδείξει τη σημασία αυτών των τεχνολογιών και να παραθέσει βέλτιστες πρακτικές για την εφαρμογή τους σε μεγάλης κλίμακας συστήματα αστικής διαχείρισης.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο, παρουσιάζεται η εξέλιξη των βιομηχανικών επαναστάσεων, μέσω μιας ιστορικής αναδρομής από την Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση, που βασίστηκε στην μετάβαση από τις αγροτικές κοινωνίες στη μηχανοκίνητη παραγωγή, έως τη Δεύτερη, όπου κυριάρχησαν η ηλεκτρική ενέργεια και η γραμμή μαζικής παραγωγής. Στη συνέχεια, αναλύεται η Ψηφιακή Επανάσταση, που εισήγαγε τους υπολογιστές και το διαδίκτυο, οδηγώντας τελικά στη Βιομηχανία 4.0, όπου η τεχνητή νοημοσύνη, το IoT και τα big data διαμορφώνουν νέες προοπτικές.

Το Δεύτερο Κεφάλαιο, αναλύει τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 και τον ρόλο της στην ανάπτυξη Βιομηχανιών και Έξυπνων Πόλεων. Αρχικά, αναλύονται οι βασικές τεχνολογίες, όπως το υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing), τα μεγάλα δεδομένα (Big Data), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και η τεχνητή νοημοσύνη (AI), τα οποία επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των αστικών υποδομών. Στη συνέχεια, δίνεται έμφαση στα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins), αναλύοντας πώς η σύγκλιση δεδομένων, αυτοματισμών και ψηφιακών προσομοιώσεων μπορεί να οδηγήσει σε αποδοτικότερη διαχείριση των υποδομών και των διαθέσιμων πόρων. Τέλος, αναλύονται τα οφέλη και οι προκλήσεις που ακολουθούν τη σύγχρονη αυτή τεχνολογία.

Στη συνέχεια, το Τρίτο Κεφάλαιο δίνει έμφαση στις διαστάσεις, τα χαρακτηριστικά, την αρχιτεκτονική και τους δείκτες μέτρησης που χαρακτηρίζουν τις Έξυπνες Πόλεις, ο συνδυασμός των οποίων συνεισφέρει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, τη διαχείριση υδάτινων πόρων και τη ρύθμιση της κυκλοφορίας μέσω προσομοιώσεων σε



πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, παρουσιάζεται η συμβολή της Τεχνητής Νοημοσύνης στην ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων, επιτρέποντας την πρόληψη προβλημάτων και την αυτοματοποίηση λειτουργιών των έξυπνων πόλεων, ενώ τέλος, περιγράφεται και το επίπεδο εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών, επισημαίνοντας τους κινδύνους και τις προκλήσεις που δύναται να προκύψουν.

Το Τέταρτο Κεφάλαιο εστιάζει στον ρόλο των Ψηφιακών Διδύμων στη διαχείριση αστικών υποδομών. Αρχικά, αναλύονται τα χαρακτηριστικά των ΨΔ, με αυτά να είναι η ακριβής χαρτογράφηση, η πραγματική-εικονική αλληλεπίδραση, ο ορισμός λογισμικού και τέλος η έξυπνη ανατροφοδότηση. Έπειτα, παρουσιάζονται ένα ψηφιακό μοντέλο έξυπνης πόλης, το οποίο χωρίζεται σε μια σειρά από έξι καθορισμένα επίπεδα, ενώ αναφέρονται ορισμένες δημοφιλείς λύσεις λογισμικού και προϊόντα εφαρμογής ΨΔ που είναι διαθέσιμα σήμερα, καθιστώντας εφικτή τη τρισδιάστατη προσομοίωση και χωρική μοντελοποίηση των υποδομών.

Το Πέμπτο Κεφάλαιο εστιάζει στον ρόλο των Ψηφιακών Διδύμων στη διαχείριση βασικών τομέων των έξυπνων πόλεων, όπως η ενέργεια, οι αστικές μεταφορές και οι καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της χρήσης μικροδικτύων, προσομοιώσεων και μοντελοποίησης, αξιολογείται η αποτελεσματική παρακολούθηση και διαχείριση της ενέργειας. Έπειτα, αναλύεται η συμβολή των ΨΔ στις αστικές μεταφορές, μέσω διαδραστικών τρισδιάστατων μοντέλων και προσομοίωσης πολύπλοκων κυκλοφοριακών σεναρίων. Τέλος, παρουσιάζεται η χρήση των ΨΔ στην αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών, όπως πλημμύρες και σεισμούς, μέσω σύγχρονων τεχνολογιών, παραδειγμάτων και πρακτικών που βελτιώνουν την απόκριση και τη διαχείριση κρίσεων.

Ολοκληρώνοντας, το Έκτο Κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, έχει ως στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των Ψηφιακών Διδύμων στις έξυπνες πόλεις, αναλύοντας συγκεκριμένες μελέτες περιπτώσεων σε πόλεις της Ευρώπης και την Ασία. Μέσα από τα παραδείγματα αυτά θα γίνει φανερό πώς οι καινοτόμες αυτές τεχνολογίες μπορούν να μεταμορφώσουν τα σύγχρονα αστικά κέντρα, προσφέροντας λύσεις στα σύνθετα προβλήματα της μητροπολιτικής διαχείρισης, ενώ θα γίνει αναφορά και στο εναρκτήριο λάκτισμα του Ελληνικού κράτους να ενταχθεί πιλοτικά στον ταχεία εξελισσόμενο τομέα των έξυπνων πόλεων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Ιστορική Αναδρομή

### 1.1 Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση

Η Βιομηχανική Επανάσταση αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους και σημαντικότερους μετασχηματισμούς της ανθρώπινης ιστορίας, έχοντας αποτελέσει το εφελκυστήρα πολλών σύγχρονων εφευρέσεων, διαμορφώνοντας και αναδιαρθρώνοντας τη σημερινή κοινωνία.

Η πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση (Βιομηχανία 1.0), αναπτύσσεται στη Μεγάλη Βρετανία το δεύτερο μισό του 18<sup>ου</sup> αιώνα με τη κορύφωση αυτής στις αρχές του 20<sup>ου</sup> (Sato Duarte et al., 2018). Διατηρεί κρίσιμη θέση στην παγκόσμια ιστορία, καθώς σηματοδότησε μια κομβική μετάβαση από τις αγροτικές κοινωνίες στην εποχή της μηχανοποίησης και στις μονάδες παραγωγής ισχύος Βιομηχανικού βεληνεκού, ωθώντας έτσι την ανθρωπότητα στη κατανόηση και χρήση διαφόρων πηγών μηχανικής και υδραυλικής ενέργειας.

Η μεγάλη Βρετανία, με την ύπαρξη σταθερού πολιτικού καθεστώτος, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της αποικιακής της δύναμης και την ελεύθερη πρόσβαση στο εμπόριο, βελτίωσαν σε τέτοιο βαθμό τον γεωργικό τομέα όπου μειώθηκε σταδιακά η ανάγκη για χειρωνακτική αγροτική εργασία. Ως αποτέλεσμα, περισσότεροι αγροτικοί πληθυσμοί μετανάστευσαν στις πόλεις, συνθέτοντας ένα μοναδικό για την εποχή φαινόμενο αστικοποίησης και ανάπτυξης νέων εργατικών τάξεων (Charles Atkins, 2017). Πυλώνες των τεχνολογικών καινοτομιών αυτής της περιόδου θεωρείται η εφεύρεση της ατμομηχανής από τον James Watt το 1776, μηχανοποιώντας την εργασία και παροτρύνοντας με τον τρόπο αυτό την εγκαθίδρυση εργοστασίων, με απώτερο σκοπό την μαζική παραγωγή προϊόντων.

Παράλληλα, ο τομέας της κλωστοϋφαντουργίας ήταν από τους πρώτους που εκβιομηχανίστηκε. Εφευρέσεις όπως η "ιπτάμενη σάιτα" του Τζον Κέι (1733) και η "συστροφή και εκτροπή" του Σάμιουελ Κρόμπτον (1779) έκαναν την επεξεργασία του νήματος και την ύφανση πιο γρήγορη και αποδοτική, συμβάλλοντας έτσι στον εκμηχανισμό και την ταχύτερη παραγωγή υφασμάτων (Singhal, 2001). Η επανάσταση αυτή έφερε τέλος, τεχνολογίες που επέτρεψαν τη μεγάλης κλίμακας παραγωγή σιδήρου και χάλυβα μέσω καύσης άνθρακα αντί ξύλου, ενώ οι σιδηρόδρομοι και τα ατμόπλοια που κατασκευάστηκαν με τη χρήση των παραπάνω υλικών, ενίσχυσαν το εμπόριο και τις μετακινήσεις.

## 1.2 Δεύτερη Βιομηχανική Επανάσταση

Η δεύτερη κατά σειρά Βιομηχανική Επανάσταση (Βιομηχανία 2.0), έλαβε χώρα στη Γερμανία και την Αμερική, κατά τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα με αρχές του 20<sup>ου</sup>, πριν τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο (Roshan Agarwal, 2021). Αποτελεί έως και σήμερα μια τεχνολογική επανάσταση που οδήγησε σε εντυπωσιακή οικονομική εξέλιξη και κοινωνικές αλλαγές. Σε αντίθεση με την Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση, όπου η ενέργεια προερχόταν κυρίως από νερό, ατμό και άνθρακα, η Δεύτερη βασίστηκε στην ηλεκτρική ενέργεια και το πετρέλαιο. Πιο συγκεκριμένα, η ευρεία υιοθέτηση του ηλεκτρισμού και του πετρελαίου, μια από τις σημαντικότερες κινητήριες δυνάμεις της επανάστασης αυτής, κατέστησαν δυνατή τη τροφοδοσία μηχανών και εργοστασίων σε αισθητά μεγαλύτερη κλίμακα, ενώ εισήχθησαν πληθώρα ηλεκτρικών συσκευών σε σπίτια και επιχειρήσεις (Iipsey, 2007).

Ακολούθως, η κατασκευή του ηλεκτρικού κινητήρα και η καθιερωμένη χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος, αποτέλεσαν την αφετηρία για τη διεύρυνση της παραγωγικότητας και αποδοτικότητας, ενώ την εμφάνιση τους έκαναν για πρώτη φορά, το 1861, οι τετράχρονοι κινητήρες εσωτερικής καύσης από τον Γερμανό μηχανικό Nicolaus Otto (Kaltscheuer, 2020), όπου σε συνεργασία με τα ορυκτά καύσιμα αποτέλεσαν το έναυσμα για την κατασκευή οχημάτων ιδιωτικής και επαγγελματικής χρήσης. Μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας ακόμη, μειώθηκαν οι αποστάσεις μεταξύ των ανθρώπων, τόσο σε επίπεδο συγκοινωνιακό, με την ευρεία χρήση μέσων μεταφοράς όπως το αυτοκίνητο και οι σιδηρόδρομοι, όσο και σε επικοινωνιακό με την εφεύρεση του τηλέγραφου και του τηλεφώνου, διευκολύνοντας έτσι την ανάπτυξη ενός παγκόσμιου δικτύου επικοινωνίας και διεθνοποίησης του εμπορίου (Mokyr & Strotz, 2000).

Στη καρδιά της Δεύτερης Βιομηχανικής Επανάστασης ακόμη, αναπτύχθηκε μια νέα τεχνολογία η οποία κατέστησε εφικτή τη πρώτη κινητή γραμμή συναρμολόγησης μαζικής παραγωγής. Παρουσιάστηκε από τον Χένρι Φόρντ το 1913 (Tomas et al., 2019), και επέτρεπε στους εργαζόμενους της αυτοκινητοβιομηχανίας του να εκτελούν μια εργασία κατ'επανάληψη, αυξάνοντας αισθητά τη παραγωγικότητα με ταυτόχρονη μείωση του χρόνου ολοκλήρωσης του εκάστοτε προϊόντος. Με τον τρόπο αυτό, διαπιστώθηκε ραγδαία μείωση στο κόστος υλοποίησης τους και δυνατότητα αγοράς των προϊόντων από καταναλωτές ευρύτερων πλέον κοινωνικών στρωμάτων, αυξάνοντας το βιοτικό επίπεδο για μεγάλα τμήματα του πληθυσμού (Smith, 2019). Ολοκληρώνοντας τα επιτεύγματα, η ανάπτυξης της

μεθόδου Bessemer στο τομέα της μεταλλουργίας, δηλαδή η κατεργασία του λιωμένου σιδήρου σε κλίβανο καύσης παρουσία αέρα υπό πίεση αφαιρώντας τις προσμίξεις άνθρακα και άλλων στοιχείων από τον χυτοσίδηρο, αποτέλεσε μοναδική καινοτομία ανοίγοντας το δρόμο για τη φθηνή παραγωγή χάλυβα σε μεγάλες ποσότητες και με αρκετά χαμηλότερο κόστος (Roshan Agarwal, 2021). Το γεγονός αυτό οδήγησε σε έκρηξη της κατασκευαστικής βιομηχανίας και στη μαζική κατασκευή ανθεκτικών κτιρίων, γεφυρών και σιδηροδρομικών γραμμών.

Η Βιομηχανία 2.0 έφερε επαναστατικές αλλαγές σε τεχνολογία, οικονομία και κοινωνία, με την ενίσχυση της ποιότητας ζωής και της καταναλωτικής κουλτούρας, καθώς και τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας σε σχέση με την Πρώτη Βιομηχανική Επανάσταση. Ωστόσο συνοδεύτηκε από πολλές αρνητικές επιπτώσεις αφήνοντας βαθύ οικολογικό και κοινωνικό αποτύπωμα. Πιο συγκεκριμένα, η εκτεταμένη χρήση άνθρακα και πετρελαίου για την παραγωγή ενέργειας και την ανάπτυξη των βιομηχανιών προκάλεσαν υψηλά για την εποχή επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης και μόλυνση υδάτινων πόρων, ενώ η αδιάκοπη εξόρυξη πρώτων υλών οδήγησε σε καταστροφή φυσικών οικοσυστημάτων (Iipsey, 2007).

Ακόμη, παρά την πρόοδο, οι εργαζόμενοι αντιμετώπιζαν συχνά σκληρές καταστάσεις, όπως μακρές ώρες εργασίας, χαμηλούς μισθούς και ανεπαρκείς συνθήκες ασφάλειας, με τη ταυτόχρονη ταχύτατη βιομηχανική ανάπτυξη και την αυξημένη εξειδίκευση να οδηγούν σε συγχωνεύσεις και τη δημιουργία μονοπωλίων. Τα μονοπώλια αυτά ασκούσαν μεγάλο έλεγχο στην οικονομία και τις αγορές, επηρέαζαν πολιτικές αποφάσεις και δημιουργούσαν ανισότητες στην αγορά με αρνητικό αντίκτυπο στις νέες και μικρές επιχειρήσεις (Stearns, 2018).

### 1.3 Τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση

Η Τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση, γνωστή και ως Ψηφιακή Επανάσταση, ξεκίνησε τη δεκαετία του 1950 και σηματοδότησε μια περίοδο ταχείας τεχνολογικής εξέλιξης. Η ευρεία χρήση αυτοματοποιημένων βιομηχανικών συστημάτων, τηλεπικοινωνιών και ηλεκτρονικών υπολογιστών, επέφεραν θετικές επιπτώσεις στην οικονομία, τη παραγωγική διαδικασία και την κοινωνία. Αυτή η εποχή ακολούθησε την εφεύρεση των μηχανών και την βελτίωση της

μαζικής παραγωγής, προσθέτοντας ένα νέο στρώμα: την προηγμένη τεχνολογία (Taalbi, 2019).

Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έκαναν την εμφάνισή τους κατά τα μέσα του 1950 από επιχειρήσεις και κυβερνητικούς οργανισμούς παγκοσμίου βεληνεκούς, για την επεξεργασία δεδομένων, την αποθήκευση πληροφοριών και την υποστήριξη διοικητικών διαδικασιών (Sherman, 2003). Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενσωμάτωσης και εξέλιξης του κεντρικού υπολογιστή αποτελεί η IBM (International Business Machines Corporation), μια Αμερικάνικη πολυεθνική εταιρεία γνωστή για τις καινοτομίες της στον τομέα των συστημάτων πληροφορικής, των υπολογιστών, της τεχνητής νοημοσύνης και των συμβουλευτικών υπηρεσιών (Danton, 2021).

Η πραγματική επανάσταση ωστόσο, προήλθε με την κατασκευή των πρώτων εμπορικά διαθέσιμων μικροεπεξεργαστών από την εταιρεία Intel το 1974, μια εταιρεία πυλώνα στον τομέα των τεχνολογιών πληροφορικής και ανάπτυξης ημιαγωγών και μικροηλεκτρονικής παγκοσμίως. Κατέστη με τον τρόπο αυτό εφικτό σε ιδιώτες και μικρές επιχειρήσεις να δημιουργούν, να επεξεργάζονται και να μοιράζονται πληροφορίες, αποκτώντας πρόσβαση σε μια τεχνολογία που προηγουμένως ήταν προνόμιο μόνο των μεγάλων οργανισμών (Mohajan, 2021).

Επιπροσθέτως, η δημιουργία του Διαδικτύου στα τέλη της δεκαετίας του 1960, μέσω της ανάπτυξης του ARPANET<sup>[1]</sup> από το Υπουργείο Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών, έθεσε τα θεμέλια για μια παγκόσμια συνδεσιμότητα και σε συνεργασία με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές επεκτάθηκε ταχύτατα στις επόμενες δεκαετίες (Featherly, 2024). Το Διαδίκτυο διαφοροποίησε τον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται και ανταλλάσσονται οι πληροφορίες, καθιστώντας δυνατή την άμεση επικοινωνία και τη δημιουργία νέων μορφών

---

<sup>1</sup> Το ARPANET ορίζεται ως το πρώτο δίκτυο υπολογιστών που βασίστηκε στη τεχνολογία μεταγωγής πακέτων για τη σύνδεση γεωγραφικά διασκορπισμένων υπολογιστών και θεωρείται ο πρόαγγελος του σύγχρονου διαδικτύου. Στο αποκορύφωμα του Ψυχρού Πολέμου ο Αμερικανικός στρατός αναζητούσε να δημιουργήσει ένα δίκτυο υπολογιστών που θα είχε τη δυνατότητα να λειτουργεί ακόμα και ύστερα από διακοπές ή βλάβες σε περίπτωση εχθρικών επιθέσεων, επιτρέποντας τη συνεχή επικοινωνία μεταξύ πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων. Με την αρχιτεκτονική του ARPANET, τα δεδομένα μεταδίδονταν μέσω του δικτύου χρησιμοποιώντας μεταγωγή πακέτων με ιεραρχική δομή, με κόμβους κορμού στην κορυφή, υπεύθυνοι για τη μεταφορά του μεγαλύτερου μέρους της κίνησης του δικτύου, και μικρότερους συμπληρωματικούς κόμβους στη βάση ικανοί να λαμβάνουν τις δικές του αποφάσεις σχετικά με την βέλτιστη διαδρομή που θα ακολουθούσαν τα δεδομένα. Ήταν εγκατεστημένοι σε μεγάλα ερευνητικά ιδρύματα και κυβερνητικές υπηρεσίες, με το ARPANET να αποτελεί τη γενέτειρα πολλών από τις τεχνολογίες που είναι απαραίτητες για το σύγχρονο διαδίκτυο, ενώ αποτέλεσε το πρώτο δίκτυο που χρησιμοποίησε τη σουίτα πρωτοκόλλων TCP/IP, η οποία εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα ως πρότυπο επικοινωνίας.

επιχειρηματικών δραστηριοτήτων, όπως οι διαδικτυακές υπηρεσίες και το ηλεκτρονικό εμπόριο σε διεθνές πλέον επίπεδο.

Στο τομέα της βιομηχανίας, ο αυτοματισμός και η ενσωμάτωση υπολογιστικών και ρομποτικών συστημάτων γίνονται ο ακρογωνιαίος λίθος των γραμμών παραγωγής, επιτρέποντας στα εργοστάσια να λειτουργούν με αυξημένη ακρίβεια κινήσεων και ταυτόχρονη μείωση των ανθρώπινων λαθών και της χειρωνακτικής εργασίας. Τα αυτοματοποιημένα ρομποτικά συστήματα μπορούν να λειτουργούν 24 ώρες το 24ωρο χωρίς διαλείμματα, κόπωση ή τις ασυνέπειες που συνοδεύουν τους εργαζόμενους.

Οι παραδοσιακές γραμμές συναρμολόγησης σταδιακά αντικαταστάθηκαν από ευέλικτα και προσαρμοστικά συστήματα παραγωγής, με τα τελευταία να γίνονται διαρκώς εξυπνότερα, καθώς τοποθετούνται αισθητήρες σε κάθε μηχανήμα, όργανο και συσκευή (Grau et al., 2017). Οι αισθητήρες αυτοί, είναι συνδεδεμένοι με ροές πόρων, οδικά συστήματα, γραμμές παραγωγής εργοστασίων, δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, σπίτια, καταστήματα και οχήματα, τροφοδοτώντας διαρκώς με δεδομένα το Διαδίκτυο. Με τον τρόπο αυτό ανοίγει ο δρόμος για αυξημένους και συντομότερους ρυθμούς παραγωγής, βελτιωμένη ποιότητα προϊόντων, αποδοτικότερη χρήση υλικών και υψηλότερη ασφάλεια (Mohajan, 2021).

Ταυτόχρονα, με τη χρήση της ρομποτικής, πραγματοποιούνται εργασίες υψηλής ακρίβειας σε επικίνδυνα περιβάλλοντα που προηγουμένως γίνονταν από τον άνθρωπο, όπως σε πυρηνικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, διαστημικές και υποθαλάσσιες δραστηριότητες κ.α. (Grau et al., 2017). Συμβάλλοντας έτσι σε λιγότερα εργατικά ατυχήματα και συνολικά βελτιωμένη αποδοτικότητα. Οι Ηνωμένες Πολιτείες πρωτοστατούν σε αυτό το τομέα, με τις πωλήσεις βιομηχανικών ρομπότ να έχουν αυξηθεί κατά 43% σε ΗΠΑ και Ευρωπαϊκή Ένωση μόλις το 2011 (Mohajan, 2021). Οι φυσικές παραγωγικές διαδικασίες γίνονται πλέον συνυφασμένες με τις ψηφιακές τεχνολογίες.

Παρ' ότι η Τρίτη Βιομηχανική Επανάσταση συνδέεται συνήθως με την αυτοματοποίηση και την πληροφορική, η αναζήτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας άρχισαν να κερδίζουν έδαφος, λόγω πολυετών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και κοινωνικών αντιδράσεων. Η εκτεταμένη και αλόγιστη, πολλές φορές, χρήση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο για παραγωγή ενέργειας, προκάλεσαν έντονες οικονομικές και οικολογικές ανισορροπίες με δυσοίωνες συνέπειες για το μέλλον του ανθρώπινου πολιτισμού και των οικοσυστημάτων της Γης (Rifkin, 2007).

Η ρύπανση του νερού και του αέρα, η καταστροφή των οικοτόπων καθώς και οι ραγδαίες και συνεχώς αυξανόμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), βαρέων μετάλλων και επιβλαβών σωματιδίων, επιβάρυναν την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου, προκαλώντας την ενεργειακή κρίση του 1970 (Liu & Zhang, 2020). Προκειμένου να λυθεί η υπάρχουσα κρίση, κρίνεται επείγουσα η μείωση της εξάρτησης από τη μη ανανεώσιμη μορφή ενέργειας. Η διαχείριση της ηλιακής ενέργειας, για παράδειγμα, άρχισε να εγκαθιδρύεται και να γίνεται πιο προσιτή τη δεκαετία του 1980, με τα φωτοβολταϊκά πάνελ να αποτελούν τη πρώτη επιλογή εκμετάλλευσης ενέργειας για οικιακή και βιομηχανική χρήση (Yang et al., 2021). Παράλληλα, με τη σύγχρονη εκδοχή των ανεμογεννητριών, άρχισε να υιοθετείται από τις χώρες-κράτη η χρήση της αιολικής ενέργειας, καθώς η τεχνολογική πρόοδος στο σχεδιασμό των γεννητριών και πτερυγίων τις κατέστησε πιο παραγωγικές και αποδοτικές (Roberts, 2015).

Τα ορυκτά καύσιμα, θα εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στα βιομηχανικά και φαρμακευτικά προϊόντα, την οικιακή θέρμανση, τη γεωργία, καθώς και πολλούς ακόμα τομείς. Ωστόσο, η ανάγκη για ανάπτυξη και σχεδιασμό τοπικών ενεργειακών δικτύων και εδραίωση εξειδικευμένων συστημάτων αποθήκευσης είναι κρίσιμη. Η συντονισμένη δράση των κυβερνήσεων και η υιοθέτηση μιας πολυεπίπεδης προσέγγισης διεθνούς συνεργασίας, εντατικοποίησης και εφαρμογής περιβαλλοντικών πολιτικών, καθώς και στήριξης της καινοτομίας στη πράσινη ενέργεια, ενεργούν ήδη από τις απαρχές της Βιομηχανίας 3.0 προκειμένου να οδηγήσουν σε μια ουσιαστική αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης και στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, διερευνώντας νέους ενεργειακούς δρόμους για έναν πιο βιώσιμο κόσμο (Vlachogianni & Valavanidis, 2013).

## 1.4 Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση

Ο όρος “Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση” αποδόθηκε κατά βάση το 2016 από τον Γερμανό Καθηγητή Klaus Schwab, Διευθύνων Σύμβουλο και εκτελεστικό πρόεδρο του World Economic Forum (Ross & Maynard, 2021). Σύμφωνα με τον ίδιο, η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση νέων τεχνολογιών αιχμής που συγχωνεύουν τον φυσικό, ψηφιακό και βιολογικό κόσμο με πρακτικές που αλλάζουν θεμελιωδώς τον τρόπο που οι άνθρωποι ζουν, αλληλεπιδρούν και εργάζονται. Αποτελεί φυσική συνέχεια της Βιομηχανίας 3.0, με τα χαρακτηριστικά που την ξεχωρίζουν από τις προηγούμενες να είναι



η ταχύτητα, η έκταση και η συστημική επίδραση που επιφέρει σε παγκόσμια κλίμακα, δημιουργώντας προκλήσεις αλλά ταυτόχρονα και πολλές οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές ευκαιρίες. Η εξέλιξη της πραγματοποιείται με εκθετικό και όχι γραμμικό ρυθμό, διαταράσσοντας σχεδόν κάθε βιομηχανική χώρα στο πέρασμα της.

Βασίζεται στην ψηφιοποίηση και την αυτοματοποίηση της Τρίτης, ανεβάζοντάς την σε υψηλότερα επίπεδα, καθορίζοντας έτσι μια πιο ολιστικά εξελιγμένη περίοδο (Ross & Maynard, 2021). Η νέα αυτή εποχή, χαρακτηρίζεται από ερευνητικές κατευθύνσεις και εφευρέσεις, οι οποίες συμβάλουν παραγωγικά σε τομείς όπως την υγεία, την εκπαίδευση και τη κατασκευαστική βιομηχανία. Το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), η τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing), η ρομποτική, η νανοτεχνολογία, τα ψηφιακά δίδυμα (DT) και πολλές ακόμα τεχνολογίες (Schwab, 2016), διαμορφώνουν την “καρδιά” της νέας αυτής εποχής.

Αξιοσημείωτος πυλώνας αυτής της επανάστασης αποτελεί το Έξυπνο Εργοστάσιο, όπου τα μηχανήματα μπορούν να αναλύουν και να επιλύουν προβλήματα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, μέσω συνδυασμού των σύγχρονων τεχνολογιών. Επιτρέπεται με τον τρόπο αυτό στις μηχανές να επικοινωνούν και να λαμβάνουν αποφάσεις αυτόνομα, οδηγώντας σε πρωτοφανή επίπεδα αποτελεσματικότητας και καινοτομίας (C. Bai et al., 2020a). Η μικρής κλίμακας παραγωγή γίνεται πιο ανταγωνιστική χάρη στον φθηνότερο αυτοματισμό, τη δυνατότητα προσαρμογής προϊόντων, αγαθών και υπηρεσιών για ένα ευρύτερο φάσμα καταναλωτών, ενώ ταυτόχρονες είναι και οι προσπάθειες πλήθους εταιρειών ρομποτικής να παράγουν οικονομικότερα μηχανικούς βοηθούς.

Ενδυναμώνονται έτσι μικρές επιχειρήσεις στο να καινοτομήσουν και να επενδύσουν σε εργοστάσια αυτοματοποιημένης λειτουργίας, ανταγωνιστικά των μεγαλύτερων εταιρειών (C. Olsen, 2022), μειώνοντας σημαντικά το κόστος. Ταυτόχρονα, ενδυναμώνεται αισθητά η ευελιξία παραγωγής και λήψης αποφάσεων ενώ δημιουργούνται εκατομμύρια νέες θέσεις εργασίας (Brynjolfsson & McAfee, 2011). Η χρήση έξυπνων συσκευών και ρομποτικών συστημάτων υποστήριξης σε θέσεις εργασίας με εργονομικές δυσκολίες και υψηλές σωματικές απαιτήσεις, συμβάλλει μακροπρόθεσμα στη διατήρηση της υγείας και της παραγωγικότητας των εργαζομένων.

Στον οικολογικό τομέα, οι τεχνολογικές δυνατότητες της Βιομηχανίας 4.0 μπορούν να ελαττώσουν την κατανάλωση πόρων και ενέργειας, συνεισφέροντας στην οργανωτική και κοινωνική βιωσιμότητα των αλυσίδων παραγωγής και εφοδιασμού (Shrouf et al., 2014),



καθώς και στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος των αποβλήτων και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Παράλληλα, τα προϊόντα έχουν τη δυνατότητα να αποσυναρμολογηθούν με σκοπό την επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή ανακατασκευή των εξαρτημάτων τους. Από οικονομική διάσταση, προκύπτουν μειωμένοι χρόνοι εγκατάστασης και παράδοσης, μειωμένο κόστος υλικών και εργασίας, ενώ η ευελιξία παραγωγής, η προσαρμογή και η παραγωγικότητα αυξάνονται εκθετικά (Dalenogare et al., 2018). Με το τρόπο αυτό, εκτός των άλλων, επιδιώκεται να ξεπεραστούν οι προκλήσεις του παγκόσμιου ανταγωνισμού, της ασταθούς αγοράς και ζήτησης, των επαγγελματικών ανισοτήτων και του μειωμένου κύκλου ζωής της καινοτομίας και των προϊόντων (C. Bai et al., 2020a).

Εντούτοις, η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση δεν έρχεται χωρίς περιορισμούς και προκλήσεις. Η εκτεταμένη αυτοματοποίηση και ψηφιοποίηση των περισσότερων πτυχών της σύγχρονης κοινωνίας, με την υιοθέτηση κατά βάση διαδικτυακών τεχνολογιών, καθώς και ο τεράστιος όγκος δεδομένων που συλλέγονται μέσω των ψηφιακών αλληλεπιδράσεων των ανθρώπων, αναδύει ηθικές ανησυχίες σχετικά με την προστασία των προσωπικών δεδομένων (Khalid Rasheed, 2021). Η διαδικτυακή λοιπόν ενοποίηση συστημάτων, ατόμων και διαδικασιών, επιτρέπει κακόβουλες παραβιάσεις ασφαλείας, που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές απώλειες δεδομένων και οικονομικές ζημιές σε επιχειρήσεις και ιδιώτες (Abomhara & Kwoien, 2015).

Ακολούθως, διεγείρεται η αβεβαιότητα σχετικά με το κατά πόσο η αυτοματοποίηση θα υποκαταστήσει τον ανθρώπινο παράγοντα. Θέσεις εργασίας χαμηλής ειδίκευσης και τεχνικό προσωπικό σε πόστα ρουτίνας κινδυνεύουν να μείνουν άνεργοι, αντικαθιστάμενοι από τεχνητά ευφυή ρομπότ (Horváth & Szabó, 2019). Έτσι, η συχνή επανεκπαίδευση του τρέχοντος προσωπικού στην ενσωμάτωση νέων ψηφιακών συστημάτων, εργαλείων και συσκευών, που τους επιτρέπουν να αλληλεπιδρούν με συνδεδεμένα συστήματα, βελτιώνοντας τις δεξιότητες και τις διαδικασίες παραγωγής κρίνεται απαραίτητη (Kiel et al., 2017). Αποτελεί, επομένως, πρόκληση για πληθώρα εταιρειών της νέας εποχής, προκειμένου να αποφευχθούν οι κοινωνικές ανισότητες, καθώς και η διεύρυνση του χάσματος μεταξύ ανθρώπου και τεχνητά ευφυούς μηχανής και λογισμικού.

Ακριβώς όπως οι βιομηχανικές επαναστάσεις του παρελθόντος, η Βιομηχανία 4.0 οδηγεί σε μια πλήρη κοινωνική αλλαγή και σε μια αυξανόμενη ανάγκη για αποδοτικά πλαίσια διακυβέρνησης, ώστε η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών να ευθυγραμμίζεται με τις ηθικές αρχές

και τις κοινωνικές αξίες (Ross & Maynard, 2021). Η κατανόηση αυτών των νέων τεχνολογιών και των δυνατοτήτων τους να επιφέρουν αλλαγές είναι εξαιρετικά σημαντική για όλα τα έθνη, ειδικότερα όμως για τις αναπτυσσόμενες χώρες (Xu et al., 2018). Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής καλούνται να συμβαδίσουν με την τεχνολογική εξέλιξη, προστατεύοντας παράλληλα τα δημόσια συμφέροντα με τρόπους περιεκτικούς και ανθρωποκεντρικούς, δίνοντας στο κίνημα σκοπό, δομή και υπόσταση (Interaction Design Foundation, 2024).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Ανάλυση Τεχνολογιών Βιομηχανίας 4.0

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της σύγχρονης Βιομηχανικής Επανάστασης, που είναι απαραίτητο για την πλήρη κατανόηση της Βιομηχανίας 4.0 και του ρόλου της στην ανάπτυξη των Έξυπνων Πόλεων. Στόχος είναι η αναλυτική παρουσίαση των κύριων εννοιών και τεχνολογιών που συγκροτούν την Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση, καθώς και η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο η συνεργασία των τελευταίων διαμορφώνουν τις δυνατότητες διαχείρισης και λειτουργίας των σύγχρονων αστικών περιοχών.

#### 2.1 Βιομηχανία 4.0: Έννοιες και Τεχνολογίες

Η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση όπως έγινε γνωστό, αναφέρεται στην ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, προηγμένης ανάλυσης και έξυπνων παραγωγικών διαδικασιών στο παραδοσιακό βιομηχανικό περιβάλλον. Αυτή η μετασχηματιστική αλλαγή χαρακτηρίζεται από τη χρήση διασυνδεδεμένων και αυτόνομων ευφών συστημάτων που μπορούν να επικοινωνούν, να επεξεργάζονται και να ανταλλάσσουν δεδομένα, καθώς και να λαμβάνουν αποφάσεις χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης (Laskurain-Iturbe et al., 2021). Οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ του ψηφιακού και του φυσικού κόσμου, εξορθολογίζοντας και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, ενώ προωθούν την καινοτομία. Αναδιαμορφώνεται έτσι η παραγωγή σε έξυπνα οικοσυστήματα, βασισμένα εξ' ολοκλήρου σε πρακτικές ανάλυση δεδομένων και ασύρματης δικτύωσης (Javaid et al., 2022). Οι κύριες τεχνολογίες που διαμορφώνουν τους εννιά τεχνολογικούς πυλώνες, θεμελιώνοντας την Ψηφιακή αυτή Επανάσταση, μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:

##### 2.1.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Στο επίκεντρο των τεχνολογιών της βιομηχανίας 4.0 εδρεύει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT). Ο όρος αυτός περιγράφεται από τους (Sezer et al., 2018), ως η

τεχνολογία που: «επιτρέπει σε πράγματα και ανθρώπους να συνδέονται ανά πάσα στιγμή, οπουδήποτε, με οτιδήποτε και οποιονδήποτε, ιδανικά χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε διαδρομή/δίκτυο και οποιαδήποτε υπηρεσία». Με άλλα λόγια, πρόκειται για μια τεχνολογία που εξασφαλίζει τη συνδεσιμότητα ανάμεσα σε μηχανές, αισθητήρες, κινητές και σταθερές συσκευές, με στόχο τη διαλειτουργικότητα των πληροφοριών και τη δημιουργία ενός δικτύου συσκευών που συλλέγουν, ανταλλάσσουν και αναλύουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση και τον αυτοματισμό των συστημάτων (Ahuet-Garza & Kurfess, 2018).

Τέτοιου είδους συσκευές που μπορούν να διοχετεύουν συνεχώς τεράστια ροή δεδομένων στο δίκτυο για επεξεργασία, είναι οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες. Ανάλογα τη συσκευή ή τον χώρο που έχουν τοποθετηθεί μπορούν και μετρούν συγκεκριμένα δεδομένα, ενώ σε συνεργασία με ενεργοποιητές και συσκευές ελέγχου (Pacchini et al., 2019a), είναι σε θέση να παρακολουθούν και να επηρεάζουν την κατάσταση ενός εξοπλισμού ή μιας διαδικασίας παραγωγής. Παράλληλα, απαραίτητες συσκευές τροφοδότησης πληροφοριών αποτελούν οι φορητές συσκευές και τα wearables, όπως κινητά τηλέφωνα ή έξυπνα ρολόγια, τα οποία χρησιμοποιούν καθημερινά οι άνθρωποι, τροφοδοτώντας με δεδομένα το δίκτυο, διαμορφώνοντας έτσι το περιβάλλον του (Zhong et al., 2017a).

Όσον αφορά τον βιομηχανικό τομέα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων προσφέρει προηγμένη συνδεσιμότητα συσκευών, υπηρεσιών και συστημάτων, υπερβαίνοντας τις επικοινωνίες μηχανής με μηχανή και καλύπτοντας μια ποικιλία τομέων, πρωτοκόλλων και εφαρμογών (Xu et al., 2018). Ήδη, σε πολλά έξυπνα εργοστάσια, ο φυσικός εξοπλισμός όπως ρομπότ, μηχανήματα και προϊόντα, έχουν ενσωματωμένα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και ετικέτες RFID<sup>[2]</sup> (Floerkemeier & Lampe, 2005), ώστε από τη μία να παρέχουν δεδομένα και πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την απόδοση, τη κατάσταση ή την τοποθεσία τους, και από την άλλη να αυτοματοποιούν πολλά τμήματα των παραγωγικών δραστηριοτήτων.

Σύμφωνα με αναφορές από το Deloitte University Press (Holdowsky et al., 2015), η μέση τιμή ενός ηλεκτρονικού αισθητήρα μειώθηκε περισσότερο από 90% στο διάστημα 1992 έως

---

<sup>2</sup> Συσκευές που χρησιμοποιούνται στην αναγνώριση και παρακολούθηση αντικειμένων μέσω ραδιοσυχνοτήτων σε συστήματα διαχείρισης αποθεμάτων, αποθήκευσης και logistics. Επιτρέπουν τον εύκολο εντοπισμό και τη διαχείριση αντικειμένων χωρίς να απαιτείται άμεση οπτική επαφή. Μια ετικέτα RFID αποτελείται από το μικροτσίπ που περιλαμβάνει μνήμη για αποθήκευση δεδομένων και μια κεραία για τη μετάδοση των δεδομένων στον αναγνώστη.

2014 (από 22,00 σε 1,40 δολάρια), ενώ οι ταχύτητες των μικροεπεξεργαστών αυξήθηκαν κατά το αξιοσημείωτο ποσοστό του 991% στο ίδιο χρονικό διάστημα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, οι εταιρείες έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται ομαλά μεγάλου όγκου αλυσίδες παραγωγής, να ελαχιστοποιούν το χρόνο διακοπής λειτουργίας του εγκατεστημένου εξοπλισμού, να παρακολουθούν προϊόντα, αποθέματα, καθώς και τις προτιμήσεις των καταναλωτών. Ο όγκος των IoT συσκευών που καταχωρούνται ετησίως, δείχνει την εκθετικά ανοδική πορεία της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Το 2018 ο αριθμός συσκευών ξεπέρασε τις 17 δισεκατομμύρια (Lueth, 2018), ενώ έως το 2025 προβλέπεται ότι θα πλησιάσουν τις 75 δισεκατομμύρια (Statista, 2016), με την αποτίμηση του κλάδου να ανέρχεται ή ακόμα και να ξεπερνάει στα 5 τρισεκατομμύρια δολάρια (Curry, 2017; Μπασάς, 2022).

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα παρακολούθησης επομένως, αυξάνει το κέρδος, εξοικονομεί ενέργεια, ενώ προβλέπει την κατάσταση της υγείας των μηχανών, ενεργοποιώντας συστήματα προληπτικής συντήρησης πριν την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων. Μειώνεται έτσι αισθητά το κόστος και ο κίνδυνος ατυχημάτων (Saqlain et al., 2019). Σε οργανωτικό επίπεδο, προβλέπεται το IoT να διευκολύνει τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την ανακύκλωση, την παραγωγή αποβλήτων, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακατασκευή, δίνοντας έτσι στις εταιρείες τη δυνατότητα να επωφεληθούν τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Σήμερα, το IoT χρησιμοποιείται ευρέως σε αδιάφορους τομείς όπως τις μεταφορές, τις επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, την υγειονομική περίθαλψη, τις Έξυπνες Πόλεις και έξυπνα σπίτια, καθώς και σε πολλές άλλες διαδικασίες μεγάλης κλίμακας, εφαρμόζοντας την υπάρχουσα υποδομή και τα πρότυπα Διαδικτύου (Din et al., 2019).

### 2.1.2 Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση

Η Τεχνητή Νοημοσύνη και η Μηχανική Μάθηση θεωρούνται οι θεμελιώδεις βάσεις της Βιομηχανίας 4.0, που βοηθούν να γίνουν οι βιομηχανικοί κλάδοι πιο αυτόνομοι και αποδοτικοί. Σύμφωνα με ορθολογικές προσεγγίσεις επιστημόνων, το πεδίο της Τεχνητής Νοημοσύνης αποτελείται από ένα σύνολο τεχνολογιών που επιτρέπουν στο λογισμικό και τις μηχανές να μιμούνται την ανθρώπινη συμπεριφορά, ώστε να κατανοούν, να αντιλαμβάνονται και να μαθαίνουν, με στόχο την επίτευξη του καλύτερου δυνατού ή ακόμα και βέλτιστου αποτελέσματος (Borges et al., 2021). Στα πρώτα στάδια της ΤΝ η βασική πρόκληση, η οποία παραμένει ακόμα και σήμερα, ήταν η εκτέλεση εργασιών που είναι εύκολες για έναν

άνθρωπο, αλλά δύσκολα περιγράφονται με μαθηματικούς κανόνες (Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville, 2018). Η δυσκολία στον καθορισμό κανόνων για αυτού του τύπου εργασιών ανέδειξε την ανάγκη για τεχνικές Τεχνητής Νοημοσύνης που θα μπορούσαν να εξάγουν μοτίβα από δεδομένα και να εμπλουτίζουν αυτόνομα τη γνώση τους.

Μια τέτοια ικανότητα, γνωστή ως Μηχανική Μάθηση, επιτρέπει την «εκπαίδευση» των υπολογιστών μέσω ανίχνευσης επαναλαμβανόμενων διαδικασιών και λογικών συμπερασμάτων, διευρύνοντας έτσι το πλήθος των εργασιών που μπορούν να εκτελέσουν, χωρίς την ανάγκη ρητού προγραμματισμού (Murphy, 2012). Με τον τρόπο αυτό, το πεδίο της Τεχνητής Νοημοσύνης εξελίχθηκε, όχι μόνο στην ανάπτυξη κανόνων που είχαν καθοριστεί από τους ανθρώπους για τη μίμηση της ανθρώπινης συμπεριφοράς στη λήψη αποφάσεων, αλλά και προς την κατεύθυνση της προσομοίωσης της ανθρώπινης μάθησης.

Η αρχή της Μηχανικής Μάθησης μοιάζει με την ανθρώπινη, καθώς βασίζεται στη μάθηση από παραδείγματα. Μέσω ταχείας ανάλυσης μεγάλων όγκων δεδομένων, οι υπολογιστές επιτυγχάνουν υψηλές ταχύτητες στην εκτέλεση λειτουργιών που θα απαιτούσαν πολύ περισσότερο χρόνο αν τις διεκπεραίωνε ένα φυσικό πρόσωπο (Nikishina, 2023). Γενικά, οι τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Μάθησης, προσφέρουν βελτιώσεις στην απόδοση, με αυξημένη ταχύτητα, ευελιξία, προσαρμοστικότητα, μείωση σφαλμάτων και προηγμένη καινοτομία (James Wilson & Daugherty, 2018).

Επιπλέον, οι επιχειρήσεις μπορούν να αξιοποιήσουν την τεχνολογία αυτή για να δημιουργήσουν αξία σε διάφορους τομείς, όπως στην αυτοματοποίηση διαδικασιών, άντληση πληροφοριών από δεδομένα για στρατηγικές αποφάσεις, προσέλκυση εργαζομένων και πελατών, καθώς και ανάπτυξη νέων προϊόντων και υπηρεσιών (Mikalef et al., 2019; Ransbotham et al., 2018). Συμβάλλεται κατ' αυτόν τον τρόπο η βελτίωση της βιωσιμότητας και της αποτελεσματικότητας πληθώρας κλάδων βιομηχανικής και μη παραγωγής.

### 2.1.3 Μεγάλα Δεδομένα και Υπολογιστικό Νέφος

Ο αδιάκοπος πολλαπλασιασμός δεδομένων από πηγές IoT και υπηρεσίες πληροφοριών, δημιούργησε την ανάγκη ανάπτυξης ορισμένων τεχνικών με στόχο την εξαγωγή γνώσης και την αποκάλυψη κρυφών, άγνωστων, έγκυρων και χρήσιμων σχέσεων, πληροφοριών και μοτίβων (Chalmeta & Grangel, 2008). Η κατάσταση αυτή έφερε στο προσκήνιο τις

τεχνολογίες των Μεγάλων Δεδομένων και του Υπολογιστικού Νέφους, με τη πρώτη να αποτελεί ένα περιβάλλον αποθήκευσης υψηλού αριθμού αδόμητων και δομημένων πληροφοριών (Orenga-Roglá & Chalmers, 2019). Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να προέρχονται από διάφορες πηγές όπως εικόνες, βίντεο, ήχους, μέσα κοινωνικής δικτύωσης, αισθητήρες και αναλυτικά στοιχεία πρόβλεψης, ώστε να παρέχουν ανά πάσα στιγμή ακριβείς πληροφορίες για τη λήψη αποφάσεων (Vaidya et al., 2018).

Συνεπώς, τα Μεγάλα Δεδομένα συνίστανται σε ένα σύνθετο, διασυνδεδεμένο και πολυεπίπεδο οικοσύστημα που περιλαμβάνει δίκτυα υψηλής χωρητικότητας, εφαρμογές, υπηρεσίες και χρήστες. Ο συνδυασμός αυτός κρίνεται απαραίτητος για την επεξεργασία, αποθήκευση, οπτικοποίηση και μεταφορά αποτελεσμάτων από ποικίλες πηγές δεδομένων, που βρίσκονται σε περίσσεια εντός του αστικού ιστού, των βιομηχανιών και των πάσης φύσεως υποδομών, σε κατάλληλες πλατφόρμες-στόχους.

Σε ένα προηγμένο βιομηχανικό οικοσύστημα, η απόκτηση, συγκέντρωση και αξιολόγηση μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω αυτής της τεχνολογίας, αποτελεί μια δαπανηρή διαδικασία, που επιτρέπει ωστόσο, την τεράστια ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των εργοστασιακών συσκευών, βελτιώνοντας έτσι την ανταπόκριση και την ευελιξία μιας επιχείρησης (Assunção et al., 2015). Η κινητικότητα των μηχανών μπορεί να καταγράφει συμβάντα ανά πάσα στιγμή, με τις βιομηχανίες να εκμεταλλεύονται τα συλλεγόμενα δεδομένα, βελτιώνοντας την επίδοση και ευελιξία τους, ενώ παράλληλα τους επιτρέπουν να εξοικονομούν πολύτιμο χρόνο και χρήμα, προάγοντας της ανταγωνιστικότητά τους (Kambatla et al., 2014).

Το Υπολογιστικό Νέφος από την άλλη, παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης του χώρου αποθήκευσης των μεγάλων δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την άμεση προσφορά των πόρων κατόπιν αιτήματος, παρέχοντας προσαρμοστικότητα στους χρήστες του (Velásquez et al., 2018). Επιπλέον, το Νέφος συμβάλλει στη μείωση του κόστους και της ενεργειακής σπατάλης, αφού δεν απαιτούνται φυσικοί εξυπηρετητές ή εξειδικευμένο προσωπικό, ενώ η εύκολη πρόσβαση σε δεδομένα από οποιοδήποτε γεωγραφικό σημείο, ενισχύει την ασφάλεια και συνεργασία ανάμεσα σε πελάτες και προμηθευτές, μέσω της έμπρακτης συμμετοχής τους στη διαδικασία παραγωγής (Thames & Schaefer, 2016).

Σε επίπεδο διαχείρισης Έξυπνων Πόλεων ακόμη, επιτρέπεται η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των υφιστάμενων εν ενεργεία μηχανισμών. Ο συνδυασμός επομένως των Μεγάλων Δεδομένων και του Υπολογιστικού Νέφους, αποτελούν εργαλεία που



μεταμορφώνουν τη βιομηχανία, ενισχύουν τη βιωσιμότητα, και διευκολύνουν τη μετάβαση σε Έξυπνες Πόλεις και οικοσυστήματα παραγωγής.

#### 2.1.4 Blockchain και Κυβερνοασφάλεια

Επί του παρόντος, το Blockchain και η Κυβερνοασφάλεια αποτελούν τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες, διασφαλίζοντας την αξιοπιστία, τη διαφάνεια, το απόρρητο και την προστασία των δεδομένων και των πληροφοριών εντός ενός επιχειρηματικού δικτύου (Hinings et al., 2018). Ουσιαστικά το Blockchain αποτελεί μια, κατανεμημένη σε εκατομμύρια υπολογιστές, βάση δεδομένων, η οποία ενσωματώνει μια συνεχόμενη και απαραβίαστη λίστα εγγραφών, κάνοντας χρήση αρχιτεκτονικών κρυπτογράφησης και ταυτοτικού ελέγχου (Bai et al., 2020b). Οι εφαρμογές της συμπεριλαμβάνουν πεδία όπως, της κατασκευής και των μεταφορών, της αρχιτεκτονικής, της χρηματοδότησης, της εφοδιαστικής αλυσίδας, της ασφάλισης και της ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η διαφανής ανταλλαγή πληροφοριών σε ένα επιχειρηματικό δίκτυο, καθώς η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται σε αυτόνομα κομμάτια που συνδέονται σε μια συνεχή αλυσίδα (Deng et al., 2021).

Αυτή η αλυσίδα δεδομένων είναι χρονολογικά ευθυγραμμισμένη και αμετάβλητη, καθώς οποιαδήποτε τροποποίηση ή διαγραφή απαιτεί τη συναίνεση και επιβεβαίωση του δικτύου. Χάρη σε αυτά τα χαρακτηριστικά, το Blockchain χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αμετάβλητων αρχείων, ιδανικών για την παρακολούθηση παραγγελιών, λογαριασμών και συναλλαγών με διαφάνεια, ενώ επιτρέπει στους οργανισμούς να κατανοούν και να εμπιστεύονται, κυρίως από τη πλευρά της ζήτησης, τους πελάτες τους (Javaid et al., 2021). Εντούτοις, διασυνδεδεμένες πλέον σε ποικίλα συστήματα IoT, οι έξυπνες ιδιωτικές και κρατικές βιομηχανίες, είναι επιρρεπείς σε κινδύνους από επιθέσεις στον κυβερνοχώρο τους μέσω κακόβουλων λογισμικών, όπου μπορούν να διαταράξουν τις παραγωγικές δραστηριότητες, καθιστώντας τον εντοπισμό τους μια πολύ δύσκολη διαδικασία για τους κατασκευαστές (Culot et al., 2019).

Τέτοιες επιθέσεις ιών, εάν εισέλθουν σε ένα φυσικό σύστημα παραγωγής, μπορούν να τροποποιήσουν τις καθορισμένες διαδικασίες του, επιφέροντας βλάβες των μηχανημάτων ή ακόμα και καθολική διακοπή της λειτουργίας τους (Elmamy et al., 2020). Η Κυβερνοασφάλεια επομένως, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη προστασία των συστημάτων,



με τις βασικότερες στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για ανίχνευση απειλών να είναι οι εφαρμογές τακτικών ενημερώσεων ασφαλείας στα λογισμικά των συσκευών, η ενεργοποίηση ισχυρών τοίχων προστασίας (firewalls) περιορίζοντας την πρόσβαση σε κρίσιμα δίκτυα (Andibasic et al., 2022), και τέλος η διαίρεση των δικτύων σε μικρότερες ζώνες ασφαλείας έτσι ώστε η οποιαδήποτε “μόλυνση” να μην επεκταθεί στο σύνολο των συστημάτων.

### 2.1.5 Αυτόνομα Ρομποτικά Συστήματα

Οι προηγμένοι αισθητήρες, η Τεχνητή Νοημοσύνη και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αποτελούν το κράμα των τεχνολογιών που συντέλεσαν στην ανάδυση μιας νέας γενιάς αυτόνομων ρομποτικών συστημάτων, με στόχο την αυτοματοποίηση και αναβάθμιση των παραγωγικών διαδικασιών (Vaidya et al., 2018). Προγραμματισμένα και ικανά να εκτελούν ακριβείς εργασίες με την ελάχιστη δυνατή ανθρώπινη παρέμβαση, διαχωρίζονται ανά μέγεθος και λειτουργία, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από drones για σάρωση αποθεμάτων, έως αυτόνομα κινούμενα ρομπότ για εργασίες συναρμολόγησης και συντήρησης (Ricadela, 2023). Έτσι, είναι πλέον σε θέση να ολοκληρώνουν συγκεκριμένες εργασίες με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα εντός αυστηρών χρονοδιαγραμμάτων, εστιάζοντας πρωτίστως στην ασφάλεια, την ευελιξία και την συνεργατικότητα με το περιβάλλον τους (Bahrin et al., 2016).

Παρόμοιου τύπου μη επανδρωμένων αεροσκαφών, με ορισμένες κρίσιμες παραλλαγές και εξοπλισμένα με συγκεκριμένες ομάδες αισθητήρων, χρησιμοποιούνται πλέον τόσο σε αγροτικές περιοχές για τη παρακολούθηση καλλιεργειών, την ανάλυση εδαφών και την πρόσβαση σε δύσβατα γεωγραφικά σημεία, όσο και σε αστικές περιοχές για την επιτήρηση δημόσιων χώρων, την παροχή επείγουσας ιατρικής βοήθειας, ή την συλλογή μετεωρολογικών και ατμοσφαιρικών δεδομένων, όπως ρύπων και μοτίβων καιρού. Είναι λοιπόν ικανά μέσω κατάλληλης διαχείρισης, να προβλέπουν υφιστάμενες και επερχόμενες φυσικές καταστροφές χαρτογραφώντας περιοχών που έχουν πληγεί από σεισμούς, πλημμύρες ή πυρκαγιές, να διαχειρίζονται τη κυκλοφορία βελτιώνοντας την ροή, καθώς και να ελέγχουν τα αστικά απορρίμματα ή τις χωματερές (Mohammed et al., 2014).

Τα παραδοσιακά ρομπότ στα εργοστάσια, βρίσκονται μέσα σε μεταλλικά κλουβιά που διασφαλίζουν τον φυσικό διαχωρισμό τους από τους εργαζόμενους κατά την λειτουργία τους, δεδομένου ότι οι κινήσεις των ανθρώπων είναι συχνά απρόβλεπτες. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στο ότι οι εργασίες που εκτελούν είναι εγγενώς επικίνδυνες, αλλά και στο γεγονός ότι τα ρομπότ δεν διαθέτουν επαρκή ευφυΐα για να προσαρμόζονται δυναμικά σε ένα ασαφές και ταχύτατα μεταβαλλόμενο περιβάλλον (T. L. Olsen & Tomlin, 2020). Οι πρόσφατες εξελίξεις των σύγχρονων τεχνολογιών, ωστόσο, επιτρέπουν μια νέα γενιά ρομποτικών μηχανημάτων, προορισμένα για άμεση αλληλεπίδραση ανθρώπου-ρομπότ, χωρίς την ανάγκη φυσικού διαχωρισμού, ικανά να ενταχθούν ακόμα και σε μια πλήρως ανθρώπινα ελεγχόμενη γραμμή παραγωγής. Η συνεχής πρόοδος της συνεργατικής ρομποτικής, αποτελούν ενεργά πεδία έρευνας του επιστημονικού τομέα, με κύριο μέλημα την αύξηση της διαδικασίας παραγωγής, τη βελτίωση της ποιότητας και τη μείωση των κινδύνων για τους εργαζομένους (Michael Rüßmann, 2015). Υποστηρίζεται έτσι η μετάβαση προς περισσότερο ανθρωποκεντρικές και ευέλικτες βιομηχανικές διαδικασίες, όπου οι τεχνολογίες αιχμής δεν αντικαθιστούν, αλλά ενισχύουν την ανθρώπινη εργασία, προάγοντας την καινοτομία και τη βιωσιμότητα.

### 2.1.6 Επαυξημένη & Εικονική Πραγματικότητα

Αποτελούν ένα σύνολο τεχνολογιών οι οποίες εμπλουτίζουν το περιβάλλον ενός ατόμου με πρόσθετες πληροφορίες, επιτρέποντάς του να αλληλοεπιδρά με εικονικά αντικείμενα εντός του φυσικού του χώρου. Αυτά τα εικονικά στοιχεία συνυπάρχουν και ενσωματώνονται οπτικά στην ίδια χωροταξική περιοχή με τη βοήθεια γραφικών υπολογιστή, παρέχοντας μια μοναδική εμπειρία όπου ο φυσικός και ο ψηφιακός κόσμος συγχωνεύονται (Pacchini et al., 2019b).

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα διαθέτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, με τον τομέα της παραγωγής να είναι αυτός που ελκύει περισσότερο τους ερευνητές (Damiani et al., 2020). Αν και σε αρχικό στάδιο, με ένα τέτοιο σύστημα, οι εργαζόμενοι μέσω κινητών συσκευών όπως έξυπνα γυαλιά ή Smartphones, θα είναι σε θέση, κοιτάζοντας ένα φυσικό αντικείμενο, να οπτικοποιούν σε πραγματικό χρόνο τα αποθηκευμένα διαδικτυακά δεδομένα, ψηφιοποιώντας εξαρτήματα, οδηγίες συναρμολόγησης ή επισκευής, εκπαιδευτικό υλικό και πολλά ακόμα. Η προσομοίωση αυτή είναι ικανή να μειώσει τους χρόνους διακοπής λειτουργίας της

παραγωγής, τους χρόνους υποστήριξης, το κόστος και τα εκάστοτε σφάλματα (Ceruti et al., 2019).

Ομοίως, οι τεχνολογίες Εικονικής Πραγματικότητας έχουν ανοίξει νέους βιομηχανικούς ορίζοντες, παρέχοντας καινοτόμες λύσεις μέσω εργαλείων προσομοίωσης, ευφών μηχανών, ανάλυσης δεδομένων και προηγμένων συστημάτων διασύνδεσης μεταξύ σταθμών εργασίας (Bottani & Vignali, 2019). Οι αλλαγές αυτές στις γραμμές παραγωγής έχουν συμβάλει στην ενίσχυση της παραγωγικής ικανότητας, επιτρέποντας στις βιομηχανίες να λαμβάνουν ορθές αποφάσεις και να ανταποκρίνονται με επιτυχία στις ταχύτατα μεταβαλλόμενες απαιτήσεις της αγοράς (Lai et al., 2020).

Κατά την υιοθέτηση, ωστόσο, των τεχνολογιών της Εικονικής και Επαυξημένης Πραγματικότητας, οι επιχειρήσεις πρέπει να διαχειριστούν αρχικά το υψηλό κόστος ανάπτυξης και εφαρμογής, καθώς απαιτούνται προηγμένα συστήματα υλικού και λογισμικού εξοπλισμού, με την ανάγκη για ισχυρή συνδεσιμότητα και χρόνου απόκρισης μεταξύ των συσκευών να είναι επιτακτική. Η εξοικείωση, τέλος, του ανθρώπινου δυναμικού με αυτές τις τεχνολογίες, προκειμένου να κατανοήσουν τα οφέλη και τις εφαρμογές τους, μπορεί να είναι χρονοβόρα, απαιτώντας συνεχή εκπαίδευση και ανάπτυξη νέων πρωτοφανών δεξιοτήτων (Raja, 2019).

## 2.2 Ψηφιακά Δίδυμα: Χρήσεις και Εφαρμογές

Τα Ψηφιακά Δίδυμα (ΨΔ) αποτελούν μια αναδυόμενη τεχνολογία στη διαδικασία ψηφιοποίησης της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης. Με την ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης, του Διαδικτύου των Πραγμάτων, της Επαυξημένης Πραγματικότητας και της ανάλυσης δεδομένων, έχει εξελιχθεί από ένα μέσο παρακολούθησης πληροφοριών, σε εργαλείο ψηφιακής προσομοίωσης, λήψης αποφάσεων και υλοποίησης (Warke et al., 2021a). Η έννοια της συγκεκριμένης τεχνολογίας, παρότι βρίσκεται ακόμα υπό εξέλιξη, ορίστηκε από τους (VanDerHorn & Mahadevan, 2021) ως μια «εικονική αναπαράσταση φυσικών αντικειμένων ή συστημάτων, και των σχετικών διαδικασιών και περιβαλλόντων του, η οποία ενημερώνεται ανταλλάσσοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο μεταξύ εικονικού και φυσικού συστήματος».

Λόγω των τεχνολογικών περιορισμών κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης του Ψηφιακού Διδύμου, η ιστορία του είναι σχετικά σύντομη. Το πρώτο “Φυσικό Δίδυμο”, αποτελεί όρο

που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από την NASA το 1970, μέσω της αποστολής του Apollo 13 (Ferguson, 2020). Μια σοβαρή βλάβη στις δεξαμενές οξυγόνου του διαστημόπλοιου, σε απόσταση μεγαλύτερη από 330.000 χιλιόμετρα από τη βάση του, οδήγησε τους επιστήμονες και μηχανικούς στη κατασκευή ενός πανομοιότυπου φυσικού οχήματος στη Γη.

Το τελευταίο, σε συνεργασία με πολλαπλούς προσομοιωτές, χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση τόσο του προσωπικού ελέγχου εδάφους, όσο και των αστροναυτών σε διαφορετικά κρίσιμα σενάρια, προσαρμόζοντας και ανατροφοδοτώντας τα δεδομένα σε διαφορετικά συμβάντα της αποστολής (Ferguson, 2020). Η ουσιαστική ιδέα, ωστόσο, του Ψηφιακού Διδύμου εμφανίστηκε από τον καθηγητή Grieves, το 2003, στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν (Riaz et al., 2023). Η πρόοδος σε βασικές τεχνολογίες πληροφοριών και υπολογιστών, επέτρεψαν στον καθηγητή, την απεικόνιση, μέσω ψηφιακού περιβάλλοντος, ενός φυσικού χώρου ως έναν εικονικό χώρο, με δεδομένα και πληροφορίες να μεταφέρονται αμφίδρομα.

Παρ' όλα αυτά, το όνομα Ψηφιακά Δίδυμα δόθηκε επίσημα το 2010 από τη NASA, μέσω των τεχνολογικών οδικών χαρτών της (Shafto et al., 2010), περιγράφοντάς τα ως μια ολοκληρωμένη και πολλαπλής κλίμακας πολυφυσική προσομοίωση ενός πλήρως εξοπλισμένου οχήματος, που αντικατοπτρίζει τις συνθήκες του ιπτάμενου διδύμου του.

Η εγκαθίδρυση και κατανόηση του τεχνολογικού αυτού επιτεύγματος, καθώς και η έκρηξη της ασύρματης επικοινωνίας, της Μηχανικής Μάθησης και του Υπολογιστικού Νέφους, ενίσχυσαν την εκθετική κλιμάκωση της δημοτικότητάς του. Τα τελευταία χρόνια, η προσοχή πλήθους ερευνητών και ακαδημαϊκών έχει στραφεί στην αποτελεσματική ενσωμάτωση των ΨΔ, εντός μιας ποικιλίας πρακτικών εφαρμογών επιστημονικού και μηχανολογικού τομέα, όπως για παράδειγμα στην Ιατρική, την αυτοκινητοβιομηχανία, τις Έξυπνες Πόλεις και τις αστικές υποδομές (Botín-Sanabria et al., 2022).

Η πρώτη υιοθέτηση τους, ωστόσο, τόσο σε υποθετικό όσο και σε εφαρμοσμένο επίπεδο, πραγματοποιείται κυρίως στον Βιομηχανικό κλάδο, καθώς προορίζονταν ως ένα μέσο καταγραφής των πολυσύνθετων λειτουργιών ενός εργοστασίου και του κύκλου ζωής μιας επαγγελματικής εγκατάστασης (Halúsková, 2023).

Οι κατασκευαστές είχαν τη δυνατότητα να αναπτύξουν εικονικά αντίγραφα γραμμών παραγωγής, αλυσίδων εφοδιασμού και πλήθους αντίστοιχων διαδικασιών, αυξάνοντας τη παραγωγικότητα και βελτιστοποιώντας τις ροές εργασιών, μέσω προσομοιώσεων

βασισμένων σε δεδομένα (Ariyachandra & Wedawatta, 2023a). Κάθε ψηφιακή αναπαράσταση φυσικών συστημάτων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η διευκόλυνση της προγνωστικής ανάλυσης, η αποφυγή διακοπών λειτουργίας ή καθυστερήσεων και η σχεδιαστική βελτιστοποίηση προϊόντων με χαμηλότερα κόστη (Khan et al., 2022).

Μια ιδιαίτερα υποσχόμενη προοπτική χρήσης της έννοιας των ψηφιακών διδύμων, σχετίζεται με συστήματα μεγάλης κλίμακας, πλήθους αλληλεπιδράσεων και όγκου δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά αυτά συναντώνται κυρίως σε αναπτυσσόμενες Έξυπνες Πόλεις, οι οποίες λόγω αύξησης του πληθυσμού, των οικονομικών δραστηριοτήτων και των πιέσεων εξαιτίας της απειλητικής κλιματικής κρίσης, δυσχεραίνεται αισθητά η διαχείριση των πόρων τους (Fortino & Savaglio, 2023). Τα ΨΔ μπορούν να προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα αντιμετώπισης τέτοιου είδους σύνθετων προκλήσεων, λειτουργώντας ως απλουστευμένα εικονικά μοντέλα του αστικού χώρου, επιτρέποντας τη κατανόηση των υποδομών, καθώς και το σχεδιασμό και την εποπτεία πολύπλοκων ψηφιακών δεδομένων στο μητροπολιτικό τοπίο (Milner, 2021).

### 2.2.1 Διαστάσεις Ψηφιακών Διδύμων

Μέχρι και σήμερα υπάρχει σαφής αβεβαιότητα γύρω από την κατανόηση της έννοιας του Ψηφιακού Διδύμου και των διαφορετικών του διαστάσεων. Σύμφωνα με εμπειριστατωμένες έρευνες των (Tao & Zhang, 2017), προτείνεται ότι το ΨΔ αποτελείται από πέντε βασικές διαστάσεις: το φυσικό και το εικονικό μέρος, τη σύνδεση, τα δεδομένα, καθώς και την παροχή υπηρεσιών.

- Το φυσικό μέρος αναφέρεται στο πραγματικό σύστημα ή αντικείμενο που παρακολουθείται ή ελέγχεται από το Ψηφιακό Δίδυμο. Είναι το αντικείμενο που βρίσκεται στον φυσικό κόσμο και παρέχει δεδομένα για την κατάσταση, τη συμπεριφορά και την απόδοσή του, όπως για παράδειγμα ένα μηχάνημα παραγωγής σε εργοστάσιο, μια τουρμπίνα αεροπλάνου, ή ακόμα και ένα κτίριο που παρακολουθείται για λόγους συντήρησης.
- Το εικονικό μέρος αποτελεί τη ψηφιακή αναπαράσταση του φυσικού αντικειμένου, καθώς αποτελείται από προσομοιώσεις, μοντέλα και αναλύσεις που αναπαριστούν τη συμπεριφορά του φυσικού αντικειμένου ή συστήματος (3D απεικόνιση μιας μηχανής ή υποδομής).

- Η σύνδεση αναφέρεται στην αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ του φυσικού και του εικονικού μέρους, μέσω δικτύων, αισθητήρων και ενεργοποιητών. Αυτή η σύνδεση επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του φυσικού αντικειμένου και της ψηφιακής του αναπαράστασης, διασφαλίζοντας τη συνέχεια της επικοινωνίας (αποστολή για παράδειγμα δεδομένων αισθητήρων θερμοκρασίας και πίεσης από μια τουρμπίνα αεροπλάνου στο ψηφιακό δίδυμο μέσω ενός δικτύου).
- Τα δεδομένα είναι η βασική πρώτη ύλη για τη λειτουργία ενός Ψηφιακού Διδύμου. Αυτά συλλέγονται από το φυσικό σύστημα μέσω αισθητήρων και ενεργοποιητών και μεταφέρονται στο ΨΔ για ανάλυση και επεξεργασία. Περιλαμβάνουν παραμέτρους λειτουργίας, περιβαλλοντικές συνθήκες και άλλα σχετικά δεδομένα, όπως εκείνα που αντλούνται από αισθητήρες που παρακολουθούν τη θερμοκρασία, τη θέση και την κατάσταση ενός μηχανήματος ή μιας υποδομής.
- Οι υπηρεσίες είναι οι λειτουργίες και τα εργαλεία που προσφέρει το ΨΔ, όπως η προσομοίωση, η νοημοσύνη, η ανάλυση, η πρόβλεψη ή η υποστήριξη λήψης αποφάσεων. Αυτές οι υπηρεσίες χρησιμοποιούν τα δεδομένα και τα μοντέλα του ΨΔ για να βοηθήσουν τις επιχειρήσεις να βελτιώσουν τη λειτουργία τους, να μειώσουν τα κόστη και να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα (υπηρεσίες πρόγνωσης για την πρόβλεψη πιθανού βλάβης ή υπηρεσίες ανάλυσης για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παραγωγής).

Μια ιδιαίτερα υποσχόμενη προοπτική χρήσης της έννοιας των Ψηφιακών Διδύμων, σχετίζεται με συστήματα μεγάλης κλίμακας, πλήθους αλληλεπιδράσεων και όγκου δεδομένων. Τα χαρακτηριστικά αυτά συναντώνται κυρίως σε αναπτυσσόμενες Έξυπνες Πόλεις, οι οποίες λόγω αύξησης του πληθυσμού, των οικονομικών δραστηριοτήτων και των πιέσεων εξαιτίας της απειλητικής κλιματικής κρίσης, δυσχεραίνεται αισθητά η διαχείριση των πόρων τους (Fortino & Savaglio, 2023). Τα Ψηφιακά Δίδυμα μπορούν να προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα αντιμετώπισης τέτοιου είδους σύνθετων προκλήσεων, λειτουργώντας ως απλουστευμένα εικονικά μοντέλα του αστικού χώρου, επιτρέποντας τη κατανόηση των υποδομών, καθώς και το σχεδιασμό και την εποπτεία πολύπλοκων ψηφιακών δεδομένων εντός οποιουδήποτε μητροπολιτικού τοπίου (Milner, 2021).

Σύμφωνα με πρόσφατες εκτιμήσεις (MarketsandMarkets, 2023), η παγκόσμια αγορά των ψηφιακών διδύμων προβλέπεται να αυξηθεί από 10,1 δισεκατομμύρια δολάρια που αποτιμήθηκε το 2023, σε 110,1 μέχρι το 2028, μια αύξηση δηλαδή της τάξης του 61.3%,

κρίνοντας εμφανές, ότι η τεχνολογία αυτή, παρότι βρίσκεται σε αρχικά ακόμα επίπεδα, αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους τομείς, με σημαντικές προοπτικές για την ενίσχυση της αποδοτικότητας, της καινοτομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης.

### 2.2.2 Ψηφιακά Δίδυμα και CPS

Στο δυναμικό περιβάλλον των σύγχρονων κοινωνιών, τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (CPS) έχουν αποδειχθεί ως μια από τις πιο μετασχηματιστικές τεχνολογικές έννοιες, αποτελώντας το θεμελιώδες συστατικό για τη προσφορά νέων δυνατοτήτων αντιμετώπισης πλήθους απαιτήσεων και προκλήσεων της σημερινής εποχής (Napoleone et al., 2020). Πιο αναλυτικά, το CPS αποτελεί έναν μηχανισμό παροχής στενής σύνδεσης μεταξύ συνεργαζόμενων φυσικών αντικειμένων και λογισμικών στοιχείων, δίνοντας τη δυνατότητα να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω μαζικής προσαρμογής και αμφίδρομης ανταλλαγής πληροφοριών. Στον φυσικό κόσμο, η δυναμική ενός συστήματος αφορά την εξέλιξη της κατάστασής του σε βάθος χρόνου. Στον κυβερνοχώρο, ωστόσο, η έννοια της δυναμικής περιορίζεται σε διαδοχικές αλλαγές καταστάσεων, χωρίς να αποδίδεται χρονική σημασία (Zhong et al., 2017b).

Ο πυρήνας των Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων (CPS) έγκειται στη μελέτη της αλληλεπίδρασης και της κοινής δυναμικής που αναπτύσσεται μεταξύ των φυσικών διαδικασιών, των δικτύων και του λογισμικού. Η ευρεία υιοθέτηση του όρου συνδέεται με τη γενική αντίληψη της Βιομηχανίας 4.0, η οποία δίνει υπόσταση στη διαδικασία συνδυασμού γνώσης και τεχνολογιών, παρέχοντας αξιοπιστία, συστηματικότητα, αυτονομία και έλεγχο χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης συμμετοχής. Αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη και ενίσχυση όχι μόνο βιομηχανικών συστημάτων αλλά και πιο πολυσύνθετων τομέων, όπως την αεροδιαστημική, τις Έξυπνες Πόλεις και υποδομές, τα αμυντικά συστήματα, την αυτοκινητοβιομηχανία κ.α (Groumpos, 2014).

Μέσω αισθητήρων για την απόκτηση δεδομένων, δικτύων επικοινωνίας και ενεργοποιητών για φυσικό έλεγχο, το CPS διαμορφώνει ένα σύστημα ενσωμάτωσης σύγχρονων υπολογιστικών και επικοινωνιακών τεχνολογιών (embedded systems), συνδεδεμένων σε έναν κοινό Κυβερνοχώρο. Αυτή η κατηγορία συστημάτων περιλαμβάνει υπολογιστικές μονάδες και δίκτυα που παρακολουθούν φυσικούς μηχανισμούς, συνήθως μέσω βρόχων



ανάδρασης, όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ φυσικών και υπολογιστικών διεργασιών είναι αμοιβαία και συντονισμένη (Swink & Nair, 2007).

Παρόλο που η εστίαση των ενσωματωμένων συστημάτων είναι κυρίως στις υπολογιστικές λειτουργίες, υπάρχει μικρότερη έμφαση στην ισχυρή σύνδεση μεταξύ των φυσικών και υπολογιστικών στοιχείων. Οι κοινωνικές και οικονομικές δυνατότητες αυτών των συστημάτων είναι τεράστιες, αν και μέχρι στιγμής έχουν αξιοποιηθεί μερικώς, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες επενδύσεις με σκοπό την περαιτέρω ανάπτυξή τους. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται σε μια παλαιότερη αλλά ακόμα εξελισσόμενη τεχνολογική κατεύθυνση, όπου λογισμικό και υπολογιστές ενσωματώνονται και προσαρμόζονται σε συσκευές που δεν έχουν ως κύριο σκοπό τους την υπολογιστική λειτουργία, όπως τα αυτοκίνητα, οι ιατρικές συσκευές, τα παιχνίδια και τα επιστημονικά εργαλεία (Alguliyev et al., 2018).

Τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα και τα Ψηφιακά Δίδυμα αλληλοσυμπληρώνονται στην ενίσχυση της αυτοματοποίησης, της παρακολούθησης και της λήψης αποφάσεων σε συστήματα παραγωγής και όχι μόνο. Ένα ΨΔ, μέσω της ψηφιακής αναπαράστασης φυσικών διαδικασιών, παρέχει σε πραγματικό χρόνο ένα δυναμικό μοντέλο δεδομένων, τα οποία συλλέγονται μέσω συσκευών CPS, όπως αισθητήρες, υπολογιστικά δίκτυα και ελεγκτές (Kantaros & Ganetsos, 2024), ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε επίπεδο εγκατάστασης, επίπεδο καταστήματος και επίπεδο προϊόντος. Αυτή η υποδομή είναι απαραίτητη για τη λειτουργία ενός ΨΔ, καθώς διασφαλίζει τη ροή δεδομένων από το φυσικό αντικείμενο στο ψηφιακό μοντέλο για ανάλυση, προσομοίωση και πρόβλεψη.

Οι εικονικές απεικονίσεις που δημιουργούνται μέσω των ΨΔ επιτρέπουν σε κατασκευαστές και επιστήμονες να εκτελούν προγνωστικές προσομοιώσεις, να αξιολογούν κρίσιμες μετρήσεις απόδοσης και να προσαρμόζουν τις παραγωγικές τους κακτικές, προωθώντας μια περισσότερο στρατηγική και αποδοτική λειτουργία (E. Lee, 2007). Από κοινού λοιπόν, συμβάλλουν στη δημιουργία έξυπνων και προσαρμοστικών συστημάτων, τα οποία είναι θεμελιώδη στη Βιομηχανία 4.0, στις κατασκευές, τις Έξυπνες Πόλεις και τη σύγχρονη παραγωγή.



### 2.2.3 Οφέλη Ψηφιακών Διδύμων

Η αδιαμφισβήτητα καινοτόμα τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων, προσφέρει, ανεξαρτήτως πεδίου εφαρμογής και πέραν της προσομοίωσης συστημάτων, πλήθος οφελών που εντοπίζονται συστηματικά, εξαιτίας του αυξανόμενου ρυθμού χρήσης τους. Μέσω ενός συνόλου δυνατοτήτων για το σχεδιασμό και λειτουργία αυτών, που αποκτάται από τη Μηχανική Μάθηση και την κατανοημένη αρχιτεκτονική τους, είναι σε θέση να παρέχουν ενδεδειγμένη θεώρηση πολύπλοκων φυσικών συστημάτων ή προϊόντων σε πραγματικό χρόνο και για όσο διάστημα ενεργούν (Mylonas et al., 2021a). Τα οφέλη μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αναλυτικής, προγνωστικής, περιγραφικής και διαγνωστικής αξίας (Warke et al., 2021b).

Πιο συγκεκριμένα, η αναλυτική αξία, θεωρείται η συλλογή και ανάλυση των δεδομένων, από τα οποία είναι δυνατή η λήψη αποφάσεων, καθώς ο διαθέσιμος όγκος πληροφοριών παρέχει βαθύτερες γνώσεις στους χρήστες σχετικά με τη λειτουργία και αποτελεσματικότητα ενός συστήματος, καθώς και την απόδοση του μηχανημάτων και της παραγωγής.

Όσον αφορά την προγνωστική αξία των ΨΔ, προβλέπονται οι συμπεριφορές και οι τάσεις των συστημάτων μέσω αισθητήρων άντλησης δεδομένων, με αποτέλεσμα τη πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός έργου, την ανίχνευση τυχών μη φυσιολογικών δραστηριοτήτων και τις οποιεσδήποτε μεταβολές στη λειτουργικότητα του. Ιχνηλατείτε επομένως χρονικά η συμπεριφορά ενός φυσικού αντικείμενου μέσω του ψηφιακού του αντιγράφου, καταλήγοντας σε μια αυτόνομη προγνωστική απόφαση (Uhlemann et al., 2017). Η περιγραφική και διαγνωστική αξία αποτελούν τα οφέλη, τόσο της συλλογής και μεταφοράς δεδομένων, επιτρέποντας την εξ αποστάσεως παρακολούθηση και έλεγχο των διαδικασιών, όσο και τον εντοπισμό, μέσω αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης και ανάλυσης, πιθανών αιτιών βλάβης ή αποτυχίας.

Με κύριο στόχο των εταιρειών να είναι η ελαχιστοποίηση των παραγόμενων δαπανών και κατ' επέκταση η μεγιστοποίηση των κερδών της, τα ΨΔ επιτρέπουν τη δοκιμή συστημάτων, μοντέλων και εξοπλισμού πριν προβούν στην οριστική υλοποίησή τους. Έτσι, μειώνονται αισθητά τα έξοδα και το ποσοστό αποτυχίας, επιτρέποντας στις εταιρείες να βελτιώνουν τη συνολική παραγωγής τους, διατηρώντας πρωτίστως σε υψηλά επίπεδα το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα (Aivaliotis et al., 2019).

Τέλος, αποτελεί καθολική πρόκληση σε όλους τους τομείς η διατήρηση και αντικατάσταση των εργαζομένων. Κατά την αποχώρηση ενός εξειδικευμένου προσωπικού, αποχωρεί αναπόφευκτα η γνώση και η εμπειρία του. Με τον τρόπο αυτό, τα κενά που δημιουργούνται και είναι ικανά να επηρεάσουν τη αποδοτικότητα σε τομείς πολεοδομικής μηχανικής και Βιομηχανίας, έρχονται να μετριάσουν τα ΨΔ, επιτρέποντας την απομακρυσμένη βοήθεια και παρακολούθηση, τόσο της λειτουργίας ενός εξοπλισμού όσο και της εξυπηρέτησης ενός πελάτη.

Οι τεχνικοί μπορούν να εκτελούν διαγνωστικούς ελέγχους και να καθοδηγούν τους καταναλωτές ή τεχνικούς σε διαδικασίες επισκευής, μέσω εικονικών μοντέλων, παρακάμπτοντας τα παραδοσιακά και συχνά περιορισμένα πρωτόκολλα. Αυτό καθιστά τις διαδικασίες πιο αποτελεσματικές και προσαρμοσμένες στις ανάγκες μιας κοινωνίας, ενώ ενισχύει τη σχέση εταιρείας-πελάτη με την παροχή άμεσης και εξειδικευμένης υποστήριξης (White, 2022).

#### 2.2.4 Προκλήσεις Ψηφιακών Διδύμων

Τα Ψηφιακά Δίδυμα, όπως οι περισσότερες ραγδαία αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, αντιμετωπίζουν πολυάριθμες προκλήσεις. Κατά την εφαρμογή τους, έχουν παρουσιαστεί προβλήματα, με το μέγεθος ορισμένων να είναι ικανά ακόμα και να εμποδίσει την ευρεία υιοθέτησή τους, εάν δεν αντιμετωπιστούν άμεσα. Μία από τις σημαντικότερες δυσκολίες για τη μέγιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των Ψηφιακών Διδύμων αποτελεί η αυξημένη οικονομική επιβάρυνση υλοποίησής τους. Η ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων με πολύ υψηλή επίδοση και ακρίβεια, καθώς και η διαδικαστική προσομοίωση προκειμένου να αβαπτυχθεί ένα δίδυμο, αποτελεί μία περίπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ (Rathore et al., 2021).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση αισθητήρων στις υπάρχουσες βιομηχανικές και πολεοδομικές εγκαταστάσεις για τη καταγραφή αποτελεσμάτων, σε συνδυασμό με την ανάγκη για υποδομές πληροφοριακής τεχνολογίας ενισχυμένης αποδοτικότητας, για την αποθήκευση και την επεξεργασία τέτοιων δεδομένων, την καθιστά μια επένδυση υψηλού κόστους (Boreham, 2023). Με την εξέλιξη ωστόσο των ΨΔ και την τεχνολογία να γίνεται ευκολότερα διαθέσιμη, το κόστος αυτών των υπηρεσιών προβλέπεται πως θα μειωθεί, με αποτέλεσμα αυτό να είναι πιθανότατα μια πρόκληση βραχυπρόθεσμου βεληνεκούς.

Παράλληλα, ένας από τους εντονότερους προβληματισμούς αφορά την ιδιοκτησία, την ιδιωτικότητα, τη σαφήνεια και την εμπιστευτικότητα των αποτελεσμάτων που συλλέγονται από τα ΨΔ και διανέμονται εντός των τμημάτων διαφόρων κρατικών ή ιδιωτικών οργανισμών (Λεονταρίδης, 2023; Πανταζή, 2023). Η ιδιωτικότητα και η ασφάλεια αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις, κυρίως λόγω του τεράστιου όγκου δεδομένων που χρησιμοποιούνται και του κινδύνου διαρροής ευαίσθητων πληροφοριών (Singh et al., 2021a). Η έλλειψη μιας σαφούς πολιτικής για την ανταλλαγή δεδομένων, τόσο εντός όσο και εκτός ενός οργανισμού και μιας επιχείρησης, μπορεί να αποβεί επιζήμια για την εξέλιξη των δραστηριοτήτων τους, οδηγώντας σε προβλήματα συγχρονισμού και ασυνέπειας (Λεονταρίδης, 2023).

Σε ένα περιβάλλον συνύπαρξης πλήθους ΨΔ και παραγωγής διαφορετικού τύπου δεδομένων εντός ιεραρχικών επιπέδων, όπου το ένα τροφοδοτεί το άλλο, η μη προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας, εκθέτουν τα συστήματα σε μεγάλους κινδύνους κυβερνοεπιθέσεων. Η εφαρμογή λοιπόν, σύγχρονων κανονισμών και πρακτικών ασφάλειας είναι απαραίτητη για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης στους χρήστες (Fuller, 2020; Tao et al., 2019).

Ολοκληρώνοντας, η αδιαμφισβήτητη πολυπλοκότητα των περισσότερων σύγχρονων τεχνολογιών, διευρύνει το εκπαιδευτικό κενό που πρέπει να καλυφθεί. Συγκεκριμένα, στον τομέα της χρήσης, κατασκευής και εφαρμογής των ΨΔ, τόσο οι ερευνητές και μηχανικοί, όσο οι πελάτες και οι τελικοί χρήστες, υπόκεινται σε περιορισμένη εκπαίδευση, ιδίως όταν βρίσκονται σε περιβάλλοντα με ανεπαρκή πρόσβαση σε σύγχρονη τεχνολογία και εξειδικευμένες δεξιότητες (Modoni et al., 2019). Η εκπαίδευση για τα Ψηφιακά Δίδυμα προϋποθέτει υψηλό κόστος λογισμικού, εργαλείων και εξοπλισμού. Απαιτούνται αναβαθμίσεις στα προγράμματα σπουδών και επενδύσεις σε τεχνολογικές υποδομές (Boreham, 2023). Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων προϋποθέτει συνεργασία μεταξύ εκπαιδευτικών ιδρυμάτων, επιχειρήσεων και κυβερνήσεων, ώστε να μειωθεί το εκπαιδευτικό χάσμα, και να υποστηριχθεί η ανάπτυξη δεξιοτήτων για τη χρήση αυτής της καινοτόμου τεχνολογίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Έξυπνες Πόλεις

#### 3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία αστικοποίηση και η περιβαλλοντική επιβάρυνση έχουν οδηγήσει στην εμφάνιση του φαινομένου που συχνά αποκαλείται «ασθένεια των πόλεων». Αναζητώντας λύσεις, η ιδέα των Έξυπνων Πόλεων έχει αποκτήσει μεγάλη δυναμική. Με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών, βασισμένων στη Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση, οι Έξυπνες Πόλεις αποσκοπούν στη βελτίωση της κατανομής των διαθέσιμων πόρων, στην ενίσχυση της αποδοτικότητας και στη δημιουργία της μέγιστης δυνατής αξίας για τους κατοίκους τους.

Η έννοια της «Έξυπνης Πόλης» εισήχθη για πρώτη φορά από το Γραφείο Κοινοτικής Ανάλυσης των ΗΠΑ, τη δεκαετία του 1970, χρησιμοποιώντας αεροφωτογραφίες, βάσεις δεδομένων και ανάλυση συμπλεγμάτων, με σκοπό τη κατανομή πόρων, συλλογή πληροφοριών και την προετοιμασία σε ενδεχόμενα έκτακτης ανάγκης (Montes, 2020). Εφαρμόστηκε αρχικά, με την διεύρυνση του Διαδικτύου, στο Άμστερνταμ κατά τα τέλη του 1990, θέτοντας ως στόχο τη χρήση προηγμένων Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών<sup>3</sup> (ΤΠΕ) για τη βελτίωση του αστικού σχεδιασμού (Bibri and Krogstie, 2017). Οι Έξυπνες Πόλεις χρησιμοποιούν τις ΤΠΕ για να βελτιώσουν, τόσο την ποιότητα ζωής των πολιτών, ενισχύοντας ταυτόχρονα την ικανότητα των κοινωνικών, οικονομικών και θεσμικών υποδομών της, όσο και να επιλύσουν προβλήματα που σχετίζονται με τη μετακίνηση και την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Οι αστικές κοινωνίες οδηγούνται έτσι προς ένα καθαρό και πιο βιώσιμο περιβάλλον, αλληλεπιδραστικό με τις κρατικές αρχές (Ismagilova et al., 2019).

Ήδη, με το 56% του παγκόσμιου πληθυσμού, κατά μέσο όρο, να κατοικεί πλέον σε αστικές περιοχές, και την εκτίμηση του ποσοστού αυτού να ανέρχεται στο 68% έως το 2050 (Ritchie et al., 2024), καταδεικνύεται ευδιάκριτα η εντατική αστικοποίηση και η εξέλιξη του αστικού

---

<sup>3</sup> Οι ΤΠΕ στις σύγχρονες Έξυπνες Πόλεις ορίζονται ως ένα σύνολο τεχνολογικών εργαλείων και πόρων που χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά ενσωματώνοντας τις αστικές απαιτήσεις σχετικά με την ενέργεια, τη προστασία του περιβάλλοντος και τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας για του πολίτες. Χρησιμοποιώντας έξυπνες τεχνολογίες και ανάλυση δεδομένων, οι ΤΠΕ σε συνδυασμό με Ψηφιακά Δεδομένα διαχειρίζονται τις αστικές ροές και αποκρίσεις σε πραγματικό χρόνο δημιουργώντας ελκυστικές έξυπνες κοινότητες για τον πληθυσμό.

σχεδιασμού που χαρακτηρίζει τη σύγχρονη εποχή. Το γεγονός αυτό ωθεί τους χωροταξικούς ρυθμιστές να επικεντρώσουν την προσοχή τους στην ευημερία του πληθυσμού μέσω μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης που συνδυάζει ανθρώπινες, περιβαλλοντικές, κοινωνικές, ενεργειακές, πολιτιστικές και τεχνολογικές πτυχές. Ο σχεδιασμός Έξυπνων Πόλεων στοχεύει στην αντιμετώπιση κρίσιμων προκλήσεων, όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση, ενεργοβόρα δίκτυα, συντήρηση υποδομών, καθώς και ζητήματα ασφάλειας και πολιτικής, αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0. Παραδείγματα πόλεων όπως η Σιγκαπούρη, το Χονγκ Κονγκ, η Ζυρίχη, η Νέα Υόρκη, η Μόσχα και πολλές άλλες, δραστηριοποιούνται μέσω της χρήσης Τεχνητής Νοημοσύνης, Ψηφιακών Ψιδύμων και ρομποτικής για την ανάπτυξη εφαρμογών Έξυπνων Πόλεων (Sharif & Pokharel, 2022).

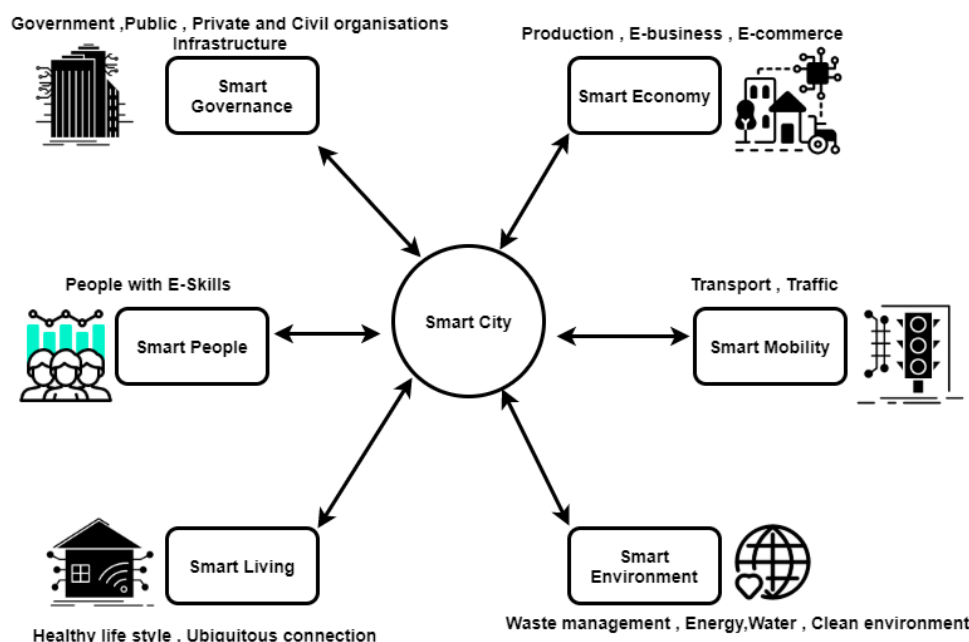
Ωστόσο, η χρήση αυτών των τεχνολογιών εγκυμονεί κινδύνους που μπορεί να επηρεάσουν την εύρυθμη λειτουργικότητα ενός αστικού περιβάλλοντος. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών τα καθιστά ευάλωτα σε επιχειρησιακούς, στρατηγικούς και εξωτερικούς κινδύνους, ενώ παράλληλα έχει αποδειχτεί ότι υπάρχουν κίνδυνοι που σχετίζονται με την πολιτική, την τεχνολογία, τη χρηματοδότηση και τη διαχείριση πόρων.

Η αποτελεσματική διακυβέρνηση μιας Έξυπνης Πόλης απαιτεί συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων φορέων, της κυβέρνησης, των πολιτών και των κοινωνικοτεχνικών συστημάτων. Η βιωσιμότητα, σε αυτό το πλαίσιο, περιλαμβάνει τη μείωση της κατανάλωσης μη ανανεώσιμων πόρων, την διαφύλαξη του περιβάλλοντος, τη δημιουργία ανθεκτικών και ποικιλόμορφων οικονομιών, καθώς και τη διασφάλιση της ευημερίας και της ικανοποίησης των πολιτών (Bouzguenda et al., 2019).

### 3.2 Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά Έξυπνων Πόλεων

Οι Έξυπνες Πόλεις συνήθως αναπτύσσονται γύρω από τέσσερις κύριους πυλώνες: τη θεσμική, τη φυσική, την κοινωνική και την οικονομική υποδομή, με αρκετούς ερευνητές, ωστόσο, να έχουν διαχωρίσει την έννοια αυτή σε διαστάσεις και χαρακτηριστικά, προσεγγίζοντας ολιστικά τη πολυπλοκότητα των πόλεων. Νέες έρευνες κάνουν χρήση ενός μοντέλου έξι συστατικών, διαχωρίζοντας και ενσωματώνοντας τις ανάγκες μιας σύνθετης κοινωνίας, καθώς και αποδεικνύοντας τη βαρύτητα που φέρει η κάθε μια διάσταση στη παροχή έξυπνων υπηρεσιών (Silva et al., 2018a). Οι διαφορετικές διαστάσεις των Έξυπνων

Πόλεων επικοινωνούν και συνδυάζονται για να ενισχύουν και να στηρίζουν αυτούς τους πυλώνες, οι οποίοι αναλύονται ως εξής:



Εικόνα 1. Γενικό μοντέλο διαστάσεων μιας έξυπνης πόλης (Embarak, 2021)

### 3.2.1 Έξυπνη Οικονομία – Smart Economy

Η έξυπνη οικονομία αναφέρεται στην ικανότητα μιας πόλης να παραμένει ανταγωνιστική μέσω της χρήσης στρατηγικών καινοτομίας και τεχνολογίας, σε συνδυασμό με την επιστημονική έρευνα, επεκτείνοντας δραστηριότητες όπως το ηλεκτρονικό εμπόριο, την ανάπτυξη καινοτόμων προϊόντων, και τις τεχνολογικά υποστηριζόμενες υπηρεσίες. Βελτιώνεται έτσι το επιχειρηματικό περιβάλλον και η προσέλκυση επενδύσεων μέσω ταλαντούχων ανθρώπων (M. Wang & Zhou, 2023). Οι Sharif and Pokharel (2022) τονίζουν ότι η έξυπνη οικονομία αφορά και μια οικονομία γνώσης, που βασίζεται σε έρευνες αιχμής σε τομείς όπως η επιστήμη, οι επιχειρήσεις, η βιομηχανία, η πολιτιστική κληρονομιά και ο πολεοδομικός σχεδιασμός.

Το προτεινόμενο μοντέλο για την έξυπνη οικονομία βασίζεται σε κερδοφόρες δραστηριότητες, οικονομική βιωσιμότητα και την ανάπτυξη της πόλης μέσω της αξιοποίησης Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ). Ένας σημαντικός τομέας είναι οι έξυπνες πωλήσεις, που περιλαμβάνουν την αλυσίδα εφοδιασμού, το μάρκετινγκ, και την ανάπτυξη αγορών. Παράλληλα, η έξυπνη γεωργία αξιοποιεί τεχνολογίες IoT, μειώνοντας

κόστη και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα μέσω πρακτικών όπως η έξυπνη άρδευση και συγκομιδή (Kumar & Dahiya, 2017).

Το ξέσπασμα της πανδημίας του κορονοϊού, παράλληλα, δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την ενίσχυση της έξυπνης οικονομίας, επιταχύνοντας τη μετάβαση από παραδοσιακές επιχειρηματικές πρακτικές σε διαδικτυακές πλατφόρμες. Σύμφωνα με μελέτες, κατά το πρώτο εξάμηνο της πανδημίας καταγράφηκαν περισσότερες από ένα δισεκατομμύριο διαδικτυακές αγορές σε πάνω από 34 χώρες (Bhagavan et al., 2018), επιφέροντας σημαντικές οικονομικές συνέπειες. Αυτό καταδεικνύει τη σύνδεση μεταξύ της έξυπνης οικονομίας και άλλων υποσυστημάτων μιας σύγχρονης πόλης, τα οποία λειτουργούν αλληλοσυνδεόμενα, σχηματίζοντας ένα δυναμικό δίκτυο. Σε αυτό, οι διαθέσιμοι πόροι χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή και ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων, επιφέροντας αύξηση του εμπορικού ισοζυγίου καθώς και του ακαθάριστου εγχώριου και εθνικού εισοδήματος (Zygiaris, 2012).

### 3.2.2 Έξυπνη Διακυβέρνηση – Smart Government

Η έξυπνη διακυβέρνηση αναφέρεται στη διαχείριση αστικών και διακυβερνητικών διαδικασιών μέσω ολοκληρωμένων συστημάτων, με στόχο τη λειτουργία των πόλεων ως ενιαίων και αποδοτικών οργανισμών Sharif and Pokharel (2022). Αυτό περιλαμβάνει την ενσωμάτωση υπηρεσιών δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, καθώς και οργανισμών της κοινωνίας των πολιτών, προκειμένου να επιτευχθεί η αρμονική λειτουργία, η αποδοτικότητα και η βέλτιστη εξυπηρέτηση του κοινωνικού συνόλου.

Κύριοι παράγοντες της έξυπνης διακυβέρνησης περιλαμβάνουν την ύπαρξη τεχνολογικών υποδομών, όπως κέντρα δεδομένων, δορυφορικές εγκαταστάσεις και συστήματα δικτύωσης, που υποστηρίζουν τη συλλογή, ανάλυση και διαχείριση δεδομένων (Masik et al., 2021). Μέσω αυτών, οι πολίτες μπορούν να συμμετέχουν στη λήψη αποφάσεων, να συνεργάζονται με κυβερνητικούς φορείς και να έχουν πρόσβαση σε κρίσιμες πληροφορίες που αφορούν τη διαχείριση της πόλης τους.

Παράλληλα, η έξυπνη διακυβέρνηση ενισχύει τη διεθνή θέση μιας αστικής περιοχής μέσω στρατηγικών για τον τουρισμό και την προσέλκυση ξένων επενδύσεων, συμβάλλοντας στην οικονομική της ανάπτυξη. Επίσης, περιλαμβάνει τη διαχείριση κρίσεων, την ασφάλεια, και την υποστήριξη στρατιωτικών και άλλων κυβερνητικών δυνάμεων, ενώ απαιτείται η θέσπιση κανόνων για τη χρήση δεδομένων (João et al., 2020). Η διαφάνεια και οι σαφείς κανόνες για



τη χρήση δεδομένων είναι καίριοι, ειδικά μετά την COVID-19, όπου η δημόσια εμπιστοσύνη στην ανταλλαγή πληροφοριών αυξήθηκε. Ο Nilssen (2019), προσθέτει ότι *«η διακυβέρνηση αποτελεί το θεμέλιο των συνεργατικών προσπαθειών για την ενίσχυση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των φορέων εντός των έξυπνων πόλεων»* και προτείνει την ενίσχυση μιας διαδραστικής καθοδήγησης για την προώθηση της ανοιχτής καινοτομίας, την οποία μπορούν να υποστηρίξουν οι ηλεκτρονικές διακυβερνητικές υπηρεσίες (Ismagilova et al., 2019).

### 3.2.3 Έξυπνη Ζωή – Smart Living

Η έννοια της έξυπνης ζωής αποσκοπεί στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων των Έξυπνων Πόλεων μέσω της εξασφάλισης ασφαλών, υγιεινών και ψυχαγωγικών συνθηκών διαβίωσης. Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της ζωής σε Έξυπνες Πόλεις είναι η εύκολη πρόσβαση σε πολιτιστικές και κοινωνικές υπηρεσίες, όπως βιβλιοθήκες, πολιτιστικά κέντρα, θρησκευτικούς και αρχαιολογικούς χώρους, καθώς και εγκαταστάσεις αναψυχής. Ένας υγιής συνδυασμός κοινωνικής συνοχής, επαρκούς εισοδήματος και δημόσιας υγείας είναι απαραίτητος για την επίτευξη έξυπνης διαβίωσης, καθώς και η αλληλεπίδραση με άλλες υποομάδες όπως το έξυπνο περιβάλλον, η έξυπνη υγεία και η έξυπνη οικονομία Silva, Khan and Han (2018). Ιδίως στις περιπτώσεις του γηρασμένου πληθυσμού, μπορούν να αξιοποιηθούν εφαρμογές, όπως γίνεται ήδη στη Σιγκαπούρη και το Τόκυο, τηλεϊατρικής και απομακρυσμένης παρακολούθησης ασθενών, παρέχοντας άμεση βοήθεια σε ηλικιωμένους που αντιμετωπίζουν κινητικά προβλήματα (Okonta & Vukovic, 2024).

Στον τομέα της υγείας, το έξυπνο περιβάλλον υποστηρίζει απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών μέσω τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), όπως φορητές συσκευές και βιοαισθητήρες. Αυτές οι λύσεις διευκολύνουν την άμεση πρόσβαση σε δεδομένα ασθενών και ενισχύουν τη συνεργασία μεταξύ επαγγελματιών υγείας, παρέχοντας ποιοτικότερη και έγκαιρη φροντίδα (Pareek et al., 2021). Η σχέση αυτή επισημαίνεται ως αναπόσπαστο μέρος του συνολικού συστήματος μιας προοδευτικής πόλης, όπου κάθε υποομάδα συνδέεται δυναμικά με τις υπόλοιπες, δημιουργώντας ένα ισχυρό και συνεκτικό δίκτυο (McKinsey Global Institute, 2018). Έτσι, παρ' ότι η τεχνολογία έχει στοιχεία αποξένωσης, οι πόλεις έχουν τη δυνατότητα να ανακατευθύνουν αυτή την πορεία, ενσωματώνοντας καινοτόμες λύσεις που προάγουν την προσωπικής επαφής και ενισχύουν την έννοια της κοινότητας. Ωστόσο, τονίζεται ότι οι εφαρμογές έξυπνης ζωής, αν και συλλέγουν προσωπικά δεδομένα,



δεν αντιμετωπίζουν πάντα τους κινδύνους που αφορούν την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των χρηστών με τη δέουσα διαφάνεια (Elahi et al., 2019).

### 3.2.4 Έξυπνη Κινητικότητα – Smart Transportation

Οι Appio, Lima and Paroutis (2019), επικεντρώνονται στην έξυπνη κινητικότητα και τα προβλήματα μεταφορών, όπως η συμφόρηση σε ώρες αιχμής, οι μεγάλες ουρές και οι καθυστερήσεις στις πόλεις. Η έξυπνη κινητικότητα αναγνωρίζεται ως βασική διάσταση των Έξυπνων Πόλεων. Οι έξυπνες μεταφορές περιλαμβάνουν τη στήριξη υποδομών ΤΠΕ, ολοκληρωμένα συστήματα μεταφορών και logistics, καθαρές και ασφαλείς μετακινήσεις, καθώς και έξυπνες οδικές μεταφορές. Κεντρικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του αποτυπώματος άνθρακα μέσω "καθαρών" μέσων, όπως drones, υβριδικά ή ηλεκτρικά οχήματα και ποδήλατα, που παρουσιάζουν χαμηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση (Attaran et al., 2022).

Με την αύξηση του αστικού πληθυσμού και του αριθμού οχημάτων, δίνεται έμφαση στη δημιουργία έξυπνων δρόμων και χώρων στάθμευσης. Επιπλέον, υιοθετούνται ενεργειακά αποδοτικά συστήματα αστικού φωτισμού, όπως έξυπνα φανάρια και έξυπνοι στύλοι φωτός για τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Η έξυπνη μεταφορά ακόμη, μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια μέσω τεχνολογιών παρακολούθησης εντός των οχημάτων, με εστίαση σε παράγοντες όπως ο καπνός, η φωτιά, τα αέρια, η κατάσταση των επιβατών και των οδηγών, μειώνοντας τα τροχαία και σοβαρά ατυχήματα (Bhagavan et al., 2018).

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας, που αξίζει να αναφερθεί, είναι η ανάπτυξη βιώσιμων συστημάτων μεταφοράς μέσω έξυπνων logistics. Με τη χρήση του IoT, οι χειροκίνητες διαδικασίες στην εφοδιαστική αντικαθίστανται από αυτοματοποιημένες λύσεις, βελτιώνοντας την ακρίβεια και μειώνοντας τις καθυστερήσεις (Korczak & Kijewska, 2019). Τα έξυπνα logistics προσφέρουν άμεση παροχή πληροφοριών σχετικά με την κατάσταση του φορτίου, επιτρέποντας ταχύτερη και πιο αποτελεσματική διαχείριση στη διαδικασία μεταφοράς εμπορευμάτων εντός πόλεων.

### 3.2.5 Έξυπνο Περιβάλλον – Smart Environment

Το έξυπνο περιβάλλον αποτελεί μία από τις σημαντικότερες διαστάσεις, στοχεύοντας στη βελτίωση της ποιότητας ζωής μέσω φυσικών, υγιεινών και ασφαλών συνθηκών διαβίωσης και στην ανάπτυξη βιώσιμων πρακτικών. Περιλαμβάνει πολλές συνιστώσες, όπως την βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης, τα βιώσιμα κτίρια, την παρακολούθηση και μείωση της ρύπανσης, την αύξηση χώρων πρασίνου, καθώς και τη βελτίωση ή επαναχρησιμοποίηση των φυσικών πόρων. Επιπλέον, αναπόσπαστο μέρος αυτού του τομέα αποτελούν οι πολιτικές που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Αυτές οι τεχνολογικές πρωτοβουλίες συμβάλλουν στην εξοικονόμηση και την προώθηση βιώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ παράλληλα οι εφαρμογές διαχείρισης φυσικών πόρων περιλαμβάνουν τον έλεγχο θορύβου, πόσιμου νερού, κλιματικής ποιότητας και απορριμμάτων, με στόχο τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και την προστασία του πόσιμου νερού μέσω έξυπνων ενεργειακών δικτύων και πράσινης ενέργειας (Ismagilova et al., 2019).

Παρ' όλα αυτά, η απουσία ενός κανονιστικού πλαισίου για το έξυπνο περιβάλλον αυξάνει τις δυσκολίες στην υλοποίηση έξυπνων περιβαλλοντικών πρακτικών. Οι Bohli & Bouallegue, (2016), παρουσιάζουν το Διαδίκτυο Δεδομένων και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ως βασικές τεχνολογίες για την ανάπτυξη εφαρμογών σε έξυπνα αστικά περιβάλλοντα. Αυτές οι τεχνολογίες αξιοποιούν ποικιλία αισθητήρων, όπως οπτικούς αισθητήρες, ολοκληρωμένα κυκλώματα και αισθητήρες πίεσης, προκειμένου να διαχειριστούν αποτελεσματικά τις λειτουργίες μιας έξυπνης πόλης. Τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο που συλλέγονται μέσω αυτών των συστημάτων υποστηρίζουν τη βελτιστοποίηση διαδικασιών όπως η συλλογή, η ανακύκλωση και η διαλογή απορριμμάτων.

### 3.2.6 Έξυπνοι Άνθρωποι – Smart People

Η επιτυχία μιας ευφυούς έξυπνης πόλης εξαρτάται πρωτίστως από τους πολίτες της, παρά από τις τεχνολογικές της υποδομές. Δημιουργικότητα, προσαρμοστικότητα και υπευθυνότητα είναι απαραίτητα χαρακτηριστικά για τη βελτίωση της διακυβέρνησης, της καινοτομίας και της κοινωνικής ανάπτυξης (Pinochet et al., 2019). Χωρίς τεχνολογικές δεξιότητες, καθώς και χωρίς ενεργούς και απαιτητικούς πολίτες, ακόμα και οι πιο προηγμένες

έξυπνες υπηρεσίες παραμένουν ανεκμετάλλευτες. Η επένδυση στην εκπαίδευση, την καλλιέργεια πρωτοβουλίας και τη διαχείριση του ανθρώπινου κεφαλαίου είναι καθοριστική για τη λειτουργία και την επιτυχία αυτών των αστικών περιβαλλόντων, με την αξιοποίηση και συμβολή των τεχνολογιών στην παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών να ενισχύουν την οικονομία και το βιοτικό επίπεδο (Mohanty et al., 2016).

Οι πόλεις, μέσω της τεχνολογίας μπορούν να πάρουν τον παλμό της κοινής γνώμης, χρησιμοποιώντας την ανατροφοδότηση του κοινού σε ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, ως βασικό συστατικό για συνεχείς βελτιώσεις στο σύστημα. Η προσέλευση και συμμετοχή των κατοίκων, ήδη από την αρχή δημιουργίας των αστικών εφαρμογών, μπορεί να αναπτύξει ομαλά τη κοινωνική συμμετοχικότητα, με τη ταυτόχρονη διαδικτυακή σύνδεση όλο και μεγαλύτερου μέρους του πληθυσμού, να αποτελεί κρίσιμη προτεραιότητα.

### 3.3 Δείκτες Αξιολόγησης έξυπνων πόλεων

Η συνεχής αστική ανάπτυξη διευρύνει την ανάγκη για αποδοτικότερη και πιο βιώσιμη διαχείριση πλήθους πόρων και υποδομών. Οι διαρκώς εξελισσόμενες έξυπνες πόλεις, αξιοποιώντας τις διαθέσιμες προηγμένες τεχνολογίες για την βελτίωση της βιωσιμότητας και ποιότητας ζωής των πολιτών, την ενίσχυση της οικονομικής ανταγωνιστικότητας και την αναβάθμιση της διακυβέρνησης, μπορούν να παρέχουν διορθωτικές λύσεις στην αντιμετώπιση σοβαρών προκλήσεων. Ωστόσο, ένας βασικός προβληματισμός που διαφαίνεται να απασχολεί μεγάλο αριθμό ερευνητών, είναι το πως μπορούν οι ηγέτες των πόλεων, έχοντας περιορισμένους πόρους, να προσδιορίσουν στρατηγικά τα έργα που θα αποφέρουν τα μεγαλύτερα οφέλη. Οι δείκτες αξιολόγησης και προτεραιοποίησης, όπως η απόδοση επένδυσης (ROI), η συμβολή στη βιωσιμότητα, η κοινωνική αποδοχή, και η τεχνολογική σκοπιμότητα, αποτελούν κρίσιμα εργαλεία στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, με χρήση της οποίας οι ηγέτες των πόλεων μπορούν να εκτιμήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα έργα που θα έχουν τη πιο θετική επίδραση στους πολίτες και το κοινωνικό σύνολο.



*Εικόνα 2. Πυραμίδα βασικών δεικτών αξιολόγησης έξυπνων πόλεων*

Η Εικόνα 2 παραθέτει, σύμφωνα με τους (Gracias et al., 2023) τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες ως θεμελιώδεις παράγοντες για την επιλογή και ιεράρχηση έργων ενσωματωμένων στις έξυπνες πόλεις.

- **Ποιότητα Ζωής (QoL):** Ο δείκτης αυτός αξιολογεί την ευημερία των πολιτών, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η υγεία, η εκπαίδευση, η ασφάλεια και άλλους τομείς που συνεισφέρουν στην διαμόρφωση της ποιότητας ζωής. Με την αξιοποίηση τεχνολογιών, τα έργα έξυπνων πόλεων που επικεντρώνονται στην QoL μπορεί να περιλαμβάνουν καλύτερη πρόσβαση σε βασικές δημόσιες υπηρεσίες με κύριες αυτές της υγειονομικής περίθαλψης και της εκπαίδευσης, ενίσχυση των συγκοινωνιών και μείωση του χρόνου μετακίνησης, καθώς και αντιμετώπιση της εγκληματικότητας, αυξάνοντας και προωθώντας την ασφάλεια.
- **Βιωσιμότητα:** Η βιωσιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα της πόλης να ικανοποιεί τις τρέχουσες ανάγκες της, διατηρώντας σε ισορροπία το οικοσύστημά της, χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τις δυνατότητες κάλυψης αναγκών των μελλοντικών γενεών. Περιλαμβάνει την περιβαλλοντική διαχείριση και την βέλτιστη εκμετάλλευση πόρων, υποστηρίζοντας τη χρήση ΑΠΕ. Έργα που προτεραιοποιούν τη βιωσιμότητα μπορεί να περιλαμβάνουν δράσεις για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πόλεων, τη βελτίωση της ενεργειακής

αποδοτικότητας ή την ενίσχυση της ανακύκλωσης, δημιουργώντας ιδανικές συνθήκες για ένα “πράσινο” μέλλον.

- **Οικονομική Ανταγωνιστικότητα:** Μέσω αυτού του δείκτη μετράται η ικανότητα της πόλης να προάγει καινοτόμες ιδέες και να δημιουργεί οικονομικές ευκαιρίες, προσελκύοντας νέες και διατηρώντας υφιστάμενες επιχειρήσεις, επενδυτές και επαγγελματίες. Έργα που ενισχύουν την οικονομική ανταγωνιστικότητα μπορεί να περιλαμβάνουν έργα βελτίωσης μεταφορικών υποδομών, ενίσχυση της ελεύθερης και ασφαλούς πρόσβασης στο διαδίκτυο καθώς και υποστήριξη της επιχειρηματικότητας.
- **Κυβερνητική Απόδοση:** Ο δείκτης αυτός αξιολογεί την αποτελεσματικότητα της τοπικής κυβέρνησης στην ικανοποίηση των αναγκών των πολιτών και στην παροχή υπηρεσιών. Έργα που ενισχύουν την απόδοση της κυβέρνησης μπορεί να περιλαμβάνουν βελτιώσεις στο τομέα των διαδικασιών αδειοδότησης, της αύξησης της διαφάνειας και της λογοδοσίας ή της μείωσης της γραφειοκρατίας.
- **Συμμετοχή Πολιτών:** Ο δείκτης αυτός συνεισφέρει στη καταμέτρηση της συμμετοχής των πολιτών σε ενδεχόμενα λήψης αποφάσεων καθώς και στην ικανότητα της πόλης να προάγει την ανατροφοδότηση και την αλληλεπίδραση δια μέσω των πολιτών. Έργα που έχουν ως επίκεντρο τη συμμετοχή των πολιτών μπορεί να περιλαμβάνουν την ενίσχυση των δημόσιων φόρουμ, ή την εφαρμογή διαδικασιών συμμετοχικού προϋπολογισμού.
- **Ψηφιακή Ετοιμότητα:** Μετράται η πρόοδος της πόλης στον τομέα της τεχνολογίας, συμπεριλαμβάνοντας τις υποδομές, τη διαχείριση δεδομένων και τις ψηφιακές υπηρεσίες. Έργα που επικεντρώνονται στην ψηφιακή ετοιμότητα μπορεί να περιλαμβάνουν πρωτοβουλίες για την εγκατάσταση έξυπνων αισθητήρων με σκοπό την παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα ή της κυκλοφορίας, την διεύρυνση του δημοσίου διαδικτύου ή την εφαρμογή επεξεργασίας δεδομένων για την αποδοτικότερη λήψη αποφάσεων. Ενισχύεται έτσι η διαλειτουργικότητα, προάγοντας τη δημιουργία μιας περισσότερο ενοποιημένης και διασυνδεδεμένης υποδομής, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση προκλήσεων και στη δημιουργία ένα περιβάλλον αρμονικής τεχνολογικής συνεργασίας.

### 3.4 Αρχιτεκτονική Έξυπνων Πόλεων

Η έξυπνη κινητικότητα, τα έξυπνα κτίρια, η έξυπνη ενέργεια και η έξυπνη διαχείριση νερού και αποβλήτων, αποτελούν μερικές από τις υπηρεσίες αστικών υποδομών, οι οποίες βασίζονται σε ένα κεντρικό σύστημα με μορφή ιστού για τη λειτουργία τους. Μέσω ενός δικτύου αισθητήρων, τοποθετημένων σε διάφορα σημεία της πόλης, συλλέγονται δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον και μεταφέρονται στο κέντρο ελέγχου, όπου επεξεργάζονται και μετατρέπονται σε χρήσιμες πληροφορίες, οι οποίες στη συνέχεια διαμοιράζονται στα αρμόδια τμήματα της τοπικής αυτοδιοίκησης (Badami, 2016). Τα τελευταία χρόνια είναι αρκετά τα μοντέλα αρχιτεκτονικής που κυκλοφορούν, με το κάθε ένα να επιδιώκει την ρεαλιστική αντιμετώπιση συγκεκριμένων αστικών ζητημάτων, με απώτερο σκοπό το καλύτερο συντονισμό και την ορθή λήψη αποφάσεων. Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα είναι το από πάνω προς τα κάτω (Top-down), στο οποίο εντάσσονται κυρίως οι πολιτικές των έξυπνων πόλεων, καθώς και το από κάτω προς τα πάνω (Bottom-up), όπου βασίζεται στις τεχνολογικές πρωτοβουλίες πολιτών για την επίλυση αστικών προβλημάτων (Mora et al., 2019). Η τελευταία αρχιτεκτονική είναι περισσότερο διαδεδομένη και διαμορφώνεται από τα επίπεδα ανίχνευσης, μετάδοσης, διαχείρισης δεδομένων και εφαρμογής, ως εξής:

#### 3.4.1 Επίπεδο Ανίχνευσης

Το κατώτερο και θεμελιώδες μέρος της αρχιτεκτονικής διαμορφώνεται από το στρώμα ανίχνευσης, με βασική του ευθύνη να αποτελεί η συλλογή και διαχείριση υπερμεγέθους ποσότητας δεδομένων μέσω φυσικών συσκευών και κόμβων διασκορπισμένων σε ολόκληρο τον αστικό κλοιό. Από τη μία πλευρά, η συλλογή δεδομένων αναγνωρίζεται ως θεμελιώδης διαδικασία, αφού επηρεάζει όλες τις υπόλοιπες λειτουργίες της πόλης, ενώ από την άλλη, αποτελεί μια εξαιρετικά απαιτητική και περίπλοκη πρακτική λόγω της μεγάλης ετερογένειας που χαρακτηρίζει τα δεδομένα αυτά. Ο έλεγχος φυσικών συσκευών σε έξυπνα σπίτια και αυτοκίνητα για τη βελτιστοποίηση του ενεργειακού φορτίου, η παρακολούθηση της υγείας των πολιτών, η διαχείριση απορριμμάτων και καταστροφών, καθώς και η αντιμετώπιση επιδημιών, αποτελούν ορισμένα από τα δεδομένα που συλλέγονται από κόμβους IoT και επεξεργάζονται καταλλήλως (Sanchez et al., 2014).

Μέσω ασύρματου δικτύου αισθητήρων, όπως αισθητήρες Zigbee, αναγνώρισης ραδιοσυχνοτήτων (RFID), Bluetooth, κάμερες, ενεργοποιητές και συσκευών παγκόσμιου συστήματος εντοπισμού θέσης (GPS), συλλέγονται ποικίλοι παράμετροι δεδομένων, όπως θερμοκρασία, υγρασία, επίπεδο ακτινοβολίας, φως και πίεση. Έτσι, εκτός από την ενσωμάτωση εξελιγμένων αισθητήρων, η συλλογή δεδομένων βασίζεται σε φυσικές συσκευές και υποδομές, εμπλουτίζοντας το δίκτυο μιας έξυπνης πόλης, βελτιώνοντας την προσβασιμότητα και την ευφύια, ενώ με τα κατάλληλα διαμορφωμένα μοντέλα επεξεργαστών μειώνεται η αβεβαιότητα των πληροφοριών (Nathali et al., 2016).

### 3.4.2 Επίπεδο Μετάδοσης

Με την ύπαρξη δισεκατομμυρίων κατανεμημένων κόμβων IoT, το επίπεδο μετάδοσης αποτελεί τη ραχοκοκαλιά των έξυπνων πόλεων, καθώς διαμορφώνει τη γέφυρα επικοινωνίας μεταξύ πηγών δεδομένων και σταθμών διαχείρισης, μέσω διαφόρων τύπων ασύρματων, ενσύρματων και δορυφορικών τεχνολογιών. Ανάλογα το εύρος της κάλυψης, διακρίνονται οι τεχνολογίες δικτύου πρόσβασης μικρής εμβέλειας, όπως είναι και πάλι το Zigbee, το Zwave, το Bluetooth και η αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων (RFID), καθώς και οι τεχνολογίες δικτύου μετάδοσης που προσφέρουν ευρύτερη κάλυψη, όπως τα, 5G, LTE και LP-WAN (Δίκτυα χαμηλής ισχύος ευρείας κάλυψης). Πιο αναλυτικά, για την αναγνώριση ατόμων, ζώων, οχημάτων και αντικειμένων, γίνεται χρήση της RFID τεχνολογίας, η οποία χρησιμοποιεί κύματα ραδιοσυχνοτήτων (RF) εντός του ηλεκτρομαγνητικού της φάσματος. Με τον τρόπο αυτό, πραγματοποιεί μοναδική και ακριβή αναγνώριση αποδίδοντας ακόμα και σε αυξημένες αποστάσεις μεταξύ πομπού και δέκτη (H. Wang et al., 2024).

Ακολούθως, το Bluetooth, μια διεθνούς χρήσης τεχνολογία πρόσβασης, χρησιμοποιώντας ραδιοκύματα μικρού μήκος, μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το ευρέως διαδεδομένο για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών σε μέτριες αποστάσεις, όπως ακουστικά, κινητά τηλέφωνα και υπολογιστές (Jung et al., 2017). Το ZigBee είναι σχεδιασμένο για επικοινωνία χαμηλής ισχύος και εντός μικρών αποστάσεων, περίπου 10 μέτρων. Διακρίνεται για τη χρήση αυτό-οργανωμένης δικτύωσης πλέγματος (mesh networking), την αξιοπιστία και την ενεργειακή αποδοτικότητα του, κάνοντάς το, εκτός των άλλων, ιδανικό για



εφαρμογές στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), όπως έξυπνα σπίτια και συστήματα αυτοματισμού (Prabatama et al., 2024).

Οι απαιτήσεις για διευρυμένη κάλυψη και η αυξημένη κινητικότητα εντός πόλεων έχουν συμβάλει στη ταχύτερη αξιοποίηση ασύρματων τεχνολογιών. Το LTE, μια από τις κορυφαίες υπηρεσίες 4G, ξεχωρίζει για την υψηλή απόδοσή του, τη μεγαλύτερη ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων και τη μειωμένη καθυστέρηση, υπερτερώντας έναντι του 3G και του WiFi. Σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, το 4G αποδίδει ακόμα ικανοποιητικά, αλλά η πλέον πέμπτη γενιά (5G) κυριαρχεί στις σύγχρονες τηλεπικοινωνίες, καθώς ενσωματώνει μεγάλο αριθμό κεραίων στους σταθμούς βάσης, επιτρέποντας μεταφορά δεδομένων σε επίπεδα gigabit. Το Wi-Fi, που ανήκει στις προδιαγραφές IEEE 802.11, είναι ευρέως διαδεδομένο λόγω του υψηλού εύρους ζώνης που προσφέρει, ωστόσο, λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένο φάσμα, ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται από παρεμβολές στο κοινόχρηστο και λιγότερο ασφαλές φάσμα των 2,4 GHz (Esmaili Gorjan & Gil Jiménez, 2024).

Τέλος, Το LP-WAN αποτελεί μια νέα σύγχρονη προσέγγιση στη δικτύωση, σχεδιασμένη να βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση, ιδιαίτερα για βιομηχανικές εφαρμογές. Είναι πολλά υποσχόμενο για έξυπνες πόλεις, καθώς παρέχει ευρύτερη κάλυψη με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (Sanchez-Iborra & Cano, 2016).

### 3.4.3 Επίπεδο Διαχείρισης Δεδομένων

Αποτελεί το επίπεδο νοημοσύνης της αρχιτεκτονικής των έξυπνων πόλεων. Μέσω κατάλληλης βάσης δεδομένων και ορθής οργάνωσης, αποθήκευσης και λήψης αποφάσεων, οι μεγάλες έξυπνες πόλεις μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά. Το πρωταρχικό καθήκον του επιπέδου αυτού είναι να διασφαλίζει τη ακεραιότητα των δεδομένων μέσω διαδικασιών καθαρισμού, εξέλιξης, συσχέτισης και συντήρησης (Al Nuaimi et al., 2015). Το επίπεδο διαχείρισης δεδομένων διακρίνεται σε πέντε βασικές κατηγορίες (Silva et al., 2018b):

- **Συγχώνευση δεδομένων:** Περιλαμβάνει τον συνδυασμό δεδομένων από ετερογενείς πηγές για τη βελτίωση της ακρίβειας και τη δημιουργία αξιόπιστων αποφάσεων, αποφεύγοντας την εξάρτηση από μία μόνο πηγή. Τεχνικές όπως το φίλτρο Kalman χρησιμοποιούνται συχνά για αυτή τη διαδικασία.



- **Ανάλυση δεδομένων:** Εστιάζει στην αποκάλυψη πολύτιμων πληροφοριών που δεν είναι άμεσα ορατές μέσω τεχνικών εξόρυξης δεδομένων. Αυτή η ανάλυση επιτρέπει την κατανόηση κρυμμένων μοτίβων και τη λήψη καλύτερων αποφάσεων.
- **Επεξεργασία δεδομένων:** Βελτιώνει τη λειτουργικότητα μέσω φιλτραρίσματος, μειώνοντας το θόρυβο και ενισχύοντας την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται.
- **Αποθήκευση δεδομένων:** Διασφαλίζει τη σωστή οργάνωση και διατήρηση δεδομένων, ώστε να είναι διαθέσιμα για μελλοντική χρήση. Για την επίτευξη του σκοπού της μαζικής αποθήκευσης δεδομένων, εφαρμόζονται αρχιτεκτονικές Cloud, υβριδικών και μη συστημάτων μεγάλης κλίμακας κ.α.
- **Διαχείριση συμβάντων και αποφάσεων:** Περιλαμβάνει τη λήψη μέτρων βάσει των δεδομένων που συλλέγονται και αναλύονται, διευκολύνοντας την άμεση ανταπόκριση σε αστικά ζητήματα.

### 3.4.4 Επίπεδο Εφαρμογής

Το επίπεδο εφαρμογής ενεργεί ως το κέντρο λειτουργίας και ελέγχου μεταξύ των τμημάτων, ενώ αποτελεί το ανώτερο επίπεδο στην αρχιτεκτονική κατάταξη, αλληλοεπιδρώντας άμεσα με τους πολίτες. Οι κύριες υπηρεσίες που παρέχει το συγκεκριμένο επίπεδο περιλαμβάνουν δραστηριότητες όπως ανάπτυξη κοινοτήτων, διανομή ενέργειας, έξυπνη διαχείριση μεταφορών και πρόβλεψη καιρού, οι οποίες αξιοποιούν επεξεργασμένα και αποθηκευμένα δεδομένα. Ωστόσο, η υλοποίηση ανεξάρτητων εφαρμογών παρέχει περιορισμένα οφέλη όσον αφορά τη συνολική βελτίωση των αστικών λειτουργιών. Για τον λόγο αυτό, η ενοποίηση και η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ εφαρμογών θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική για την προαγωγή των έξυπνων πόλεων (Yamamoto, 2022).

Οι έξυπνες εφαρμογές υλοποιούν αποφάσεις που προέρχονται από το επίπεδο διαχείρισης δεδομένων, μετατρέποντάς τις σε πραγματικές λύσεις. Καθώς οι πολίτες έρχονται σε επαφή μόνο με τα αποτελέσματα του επιπέδου εφαρμογών, η αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών τους επηρεάζει άμεσα την αντίληψη της απόδοσης της πόλης. Συνεπώς, οι εφαρμογές αυτές οφείλουν να ανταποκρίνονται τόσο σε σαφείς όσο και σε απρόβλεπτες ανάγκες των χρηστών, εξασφαλίζοντας υψηλή ακρίβεια και αποτελεσματικότητα και ενισχύοντας τη διαλειτουργικότητα με άλλες έξυπνες υλοποιήσεις (Embarak, 2021). Για την κάλυψη αυτών

των απαιτήσεων, χρειάζεται περισσότερη έρευνα σε θέματα όπως, η βελτιστοποίηση των αναλυτικών εργαλείων, οι προκλήσεις σχεδιασμού, η ασφάλεια δεδομένων και η δημιουργία κοινών προτύπων υποστήριξης.

### 3.5 Κίνδυνοι και Προκλήσεις εντός Έξυπνων Πόλεων

Η παγκοσμίου επιπέδου πρόοδος των έξυπνων πόλεων έχει ενισχύσει την ικανότητα των πολιτών να αξιοποιούν πλήθος υπηρεσιών, να αλληλεπιδρούν με διαφορετικά επίπεδα διακυβέρνησης και να βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα των αστικών συστημάτων, ενισχύοντας το βιοτικό επίπεδο και την οικονομική σταθερότητα. Παρ' όλα αυτά, δεν παύουν να υφίστανται σοβαρές προκλήσεις, κυρίως σε ζητήματα που αφορούν την προστασία της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας, με την τεχνολογική εξέλιξη και τη μετάβαση σε μια πλήρως ψηφιακή κοινωνία να απειλούν να επηρεάσουν ποικίλες κοινωνικές και πολιτιστικές διαστάσεις της καθημερινότητας.

Οι περιορισμένοι φυσικοί πόροι, η έλλειψη εξειδικευμένου ανθρωπίνου δυναμικού και οι δημοσιονομικοί περιορισμοί, θέτουν προκλήσεις που απαιτούν αξιολόγηση, προκειμένου η πληθυσμιακή, οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη να συμβαδίζουν αρμονικά. Παρ' ότι στις πόλεις παράγεται το μεγαλύτερο ποσοστό του παγκόσμιου ΑΕΠ, εάν δεν διαχειριστούν και αντιμετωπιστούν ορθά οι μητροπολιτικές ανισότητες, εγκυμονεί ο κίνδυνος οι θετικές επιπτώσεις να επισκιαστούν από τις αρνητικές (Monzon, 2015).

#### ο **Κινητικότητα**

Στον τομέα της κινητικότητας, η εκθετική αύξηση του πληθυσμού, η ανάγκη άμεσης μετάβασης σε έναν προορισμό και η σταδιακή μείωση των τιμών των οχημάτων, έχει αυξήσει εκθετικά τον αριθμό των τελευταίων που κυκλοφορούν στους δρόμους, με τις οδικές υποδομές, ωστόσο, να μην πορεύονται με τον ίδιο ρυθμό. Η μειωμένη χρήση Μέσων Μαζικής Μεταφοράς αυξάνει την κυκλοφοριακή συμφόρηση και επιβαρύνει αισθητά τις υποδομές των πόλεων (Dipak S & P.S, 2022).

Οι προκλήσεις αυτές διαφέρουν από πόλη σε πόλη και εξαρτώνται από την αστική διαρρύθμιση και την διαθέσιμη έκταση γης για επέκταση δρόμων και σιδηροδρομικών γραμμών. Η εφαρμογή συστήματος πολύτροπων δημόσιων μεταφορών, η πρόσβαση των δημόσιων μεταφορών σε όλους τους πολίτες και η προώθηση εναλλακτικών λύσεων για την

κινητικότητα χωρίς αυτοκίνητο, αποτελούν τους τρεις βασικοί άξονες που θα επιτρέψουν τη μείωση της ρύπανσης, της συμφόρησης και της βελτίωσης της συνδεσιμότητας εντός των πόλεων (Monzon, 2015).

#### ο Οικονομικοί περιορισμοί

Παρόλο που η Τεχνητή Νοημοσύνη και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων προσφέρουν καινοτόμες λύσεις για την αστική ανάπτυξη, πολλές πόλεις, ιδίως στις αναπτυσσόμενες περιοχές, δυσκολεύονται να εξασφαλίσουν την απαραίτητη χρηματοδότηση για τις υψηλές αρχικές επενδύσεις που απαιτούνται προκειμένου να διατηρηθούν ή να αναβαθμιστούν οι υποδομές τους. Οι κρατικοί προϋπολογισμοί αδυνατούν να καλύψουν την δαπανηρή διαδικασία εγκατάστασης και διαχείρισης πλήθους αισθητήρων, δικτύων IoT και κέντρων επεξεργασίας δεδομένων πληροφορικής υποδομής, με αποτέλεσμα να καταφεύγουν σε διεθνείς χρηματοδοτήσεις, ή συμπράξεις ιδιωτικού και δημοσίου τομέα (Bhardwaj et al., 2024). Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται συχνά ενδεχόμενα συγκρούσεων και εξαρτήσεων κατά την επιλογή συγκεκριμένου είδους εξαρτημάτων ή τεχνολογιών έναντι άλλων, ενώ απαιτείται η κατάλληλη στρατηγική που θα επιφέρει περισσότερα έσοδα από ότι έξοδα στο κυβερνητικό σύνολο.

#### ο Διαφάνεια και ιδιωτικότητα δεδομένων

Οι πόλεις για να θεωρηθούν έξυπνες, βασίζονται στην ανάλυση και συλλογή δεδομένων από πλήθος πηγών, φέρνοντάς τες αντιμέτωπες με αρκετά ρυθμιστικά και πολιτικά ζητήματα. Η υιοθέτηση έξυπνων συστημάτων και η υψηλή διασύνδεση μεταξύ αυτών, απαιτεί ισχυρά νομικά πλαίσια και πρωτόκολλα, που στοχεύουν στην ασφάλεια του κυβερνοχώρου, στην προστασία του απορρήτου και τη προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας (Baig et al., 2017). Ο κολοσσιαίος όγκος δεδομένων που παράγεται από τους εξοπλισμούς που βρίσκονται εγκατεστημένοι σε ολόκληρη την έκταση του αστικού κλοιού αυξάνει τον κίνδυνο για λανθασμένη διαχείριση της επιτήρησης και παραβιάσεις δεδομένων από κακόβουλα λογισμικά, καθιστώντας τις πόλεις και τους πολίτες δυνητικά εκτεθειμένους και ευάλωτους.

Θα πρέπει να αναλογιστεί κανείς, πως τα εκατοντάδες έξυπνα συστήματα που βασίζονται στη Τεχνητή Νοημοσύνη σήμερα, δεν συλλέγουν απλά ευαίσθητες πληροφορίες από τους ανθρώπους, αλλά ταυτόχρονα διαχειρίζονται τις περισσότερες εγκαταστάσεις μιας πόλης επηρεάζοντας τη καθημερινότητα των πολιτών. Δίκτυα μεταφορών και ηλεκτρικής

ενέργειας, συστήματα επικοινωνίας και εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού, αποτελούν ορισμένα ζωτικά στοιχεία, που η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε αυτά μπορεί να επηρεάσει ολόκληρη τη πόλη (Ahmed, 2020).

Οι εντάσεις για ανάπτυξη συστημάτων βελτιωμένου τρόπου αποτελεσματικότητας και διακυβέρνησης, με δυνητικό αντίκτυπο σε θέματα εμπιστευτικότητας και ιδιωτικότητας, ενδέχεται να αυξηθούν. Έτσι, η ασφάλεια των πιο ευαίσθητων περιουσιακών στοιχείων μιας πόλης αποτελεί βασικό παράγοντα αποδοχής της σύγχρονης τεχνολογίας, με ζητήματα Κυβερνοασφάλειας να πρέπει να ενσωματώνονται στο σχεδιασμό και την αρχιτεκτονική των υποδομών με τους πιο αυστηρούς αμυντικούς μηχανισμούς. Θετικό πρόσημο αποτελούν οι εταιρείες τεχνολογίας, οι οποίες προχωρούν σε ολοένα και καλύτερες λύσεις ασφαλείας (Chataut et al., 2023).

Μια εκ των πολλών θεμελιωδών τεχνικών που εφαρμόζουν κατά τη μεταφορά ευαίσθητων δεδομένων, όπως οικονομικά αρχεία ή βίντεο παρακολούθησης, είναι η κρυπτογράφηση αυτών, ώστε να αποτρέπεται η υποκλοπή και η μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση από κακόβουλους παράγοντες. Μέσω συνεργατικών προσπάθειών μεταξύ κυβερνήσεων, ιδιωτικών οργανισμών και ερευνητικών φορέων ενισχύεται η ανθεκτικότητα των πόλεων, επιτρέποντάς τους να ανταποκρίνονται σε νέες απειλές, να βελτιώνουν τις υποδομές τους και να διατηρούν υψηλά μακροπρόθεσμα επίπεδα ασφαλείας (Joss, 2018).

#### ο Κοινωνική ενσωμάτωση

Κατά την οικοδόμηση μιας έξυπνης πόλης, μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις αποτελεί η ικανότητα διασφάλισης ίσης πρόσβασης και κοινωνικής ενσωμάτωσης των πολιτών στις υποδομές και τις υπηρεσίες, ανεξαρτήτως οικονομικής, κοινωνικής ή πολιτιστικής θέσης. Όπως είναι αναμενόμενο σε μια πολυσύνθετη κοινωνία, ορισμένα τμήματα του πληθυσμού, όπως ηλικιωμένοι, άτομα με αναπηρία ή μη εξοικειωμένοι με τη τεχνολογία, ενδέχεται να αδυνατούν να εφαρμόσουν το πλήθος των σύγχρονων τεχνολογιών. Ως αποτέλεσμα, εντείνεται ο ψηφιακός αποκλεισμός τους και η ανισότητα πρόσβασης σε βασικές υπηρεσίες υγειονομικής περίθαλψης, μέσα μαζικής μεταφοράς ή ενημερωτικές πλατφόρμες. Με τον τρόπο αυτό ενδυναμώνονται τα εμπόδια κοινωνικής ενσωμάτωσης και δίκαιης πρόσβασης στις υπηρεσίες.

Παράλληλα, ένα σημαντικό μειονέκτημα που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, αφορά τις περιοχές της Νότιας και Ανατολικής Μεσογείου, όπου κυριαρχεί μειωμένη διείσδυση τεχνολογιών ΤΠΕ και έξυπνων τηλεφώνων, συγκριτικά με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες. Η μειωμένη

πρόσβαση, επομένως, της συντριπτικής πλειοψηφίας του πληθυσμού στην απαραίτητη τεχνολογία, εξαιτίας των υψηλών επιπέδων φτώχειας, καθιστά τη προώθηση εκπαιδευτικών προγραμμάτων, με σκοπό την απόκτηση θεμελιώδους τεχνολογικής γνώσης, μια ισχυρή πρόκληση (Monzon, 2015).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Ψηφιακά Δίδυμα και Έξυπνες Πόλεις

#### Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων συνδέεται άρρηκτα με την έννοια του Ψηφιακού Διδύμου. Οι έξυπνες πόλεις, όπως έχει αναφερθεί, αξιοποιούν τεχνολογίες όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και πλήθος συστημάτων πληροφορικής για να προσφέρουν ολοκληρωμένες και αποδοτικές λύσεις στη διαχείριση των αστικών περιοχών, ενισχύοντας τη λειτουργικότητα, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και την ποιότητα ζωής των κατοίκων. Η κατασκευή ενός αστικού ΨΔ μοντέλου είναι μια ολοκληρωμένη χρήση της δορυφορικής και UAV τηλεπισκόπησης, του LiDAR, της φορητής μέτρησης, της λοξής φωτογραφίας, και άλλων μεθόδων τρισδιάστατης ψηφιακής απόκτησης ενός σύνθετου αστικού χώρου.

Λειτουργώντας ως εικονικό αντίγραφο της φυσικής πόλης, επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση, προσομοίωση και βελτιστοποίηση αστικών εγκαταστάσεων, εξοπλισμού και πόρων. Σε αυτό το πλαίσιο, το Ψηφιακό Δίδυμο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων μπορούν να εντοπίσουν προβληματικά σημεία, να προτείνουν στοχευμένες βελτιώσεις και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις που ενισχύουν τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των υπηρεσιών.

Επιπλέον, η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου προσφέρει πολύτιμα εργαλεία στους πολεοδόμους, καθώς μέσα από τη δημιουργία μιας αστικής εικονικής αναπαράστασης, είναι δυνατή η προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων, η δοκιμή διαφορετικών επιλογών σχεδιασμού και η αξιολόγηση των ενδεχόμενων επιπτώσεων που επιφέρουν. Διευκολύνεται με τον τρόπο αυτό ο στρατηγικός σχεδιασμός και η υλοποίηση βιώσιμων λύσεων για το μητροπολιτικό περιβάλλον.

#### 4.1 Χαρακτηριστικά Ψηφιακών Δίδυμων Έξυπνων Πόλεων

Τα Ψηφιακά Δίδυμα, δεδομένων των εφαρμογών και των σταδίων υλοποίησής τους εντός μιας έξυπνης πόλης, παρουσιάζουν διαφοροποιημένα χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα πολλές φορές να κρίνεται αδύνατη η πρακτική και κατανόηση αυτών, καθώς και ο

διαχωρισμός τους από συγκεκριμένες εφαρμογές, αντικείμενα και ανάγκες. Επεκτείνοντας, επομένως, την ιδέα των Ψηφιακών Δίδυμων Πόλεων στον αστικό τομέα, αναπτύσσονται τέσσερα κύρια χαρακτηριστικά που τις διαμορφώνουν, με αυτά να είναι η ακριβής χαρτογράφηση, η πραγματική-εικονική αλληλεπίδραση, ο ορισμός λογισμικού και τέλος η έξυπνη ανατροφοδότηση.



Εικόνα 3. Επίπεδα ανάπτυξης μιας ψηφιακής δίδυμης έξυπνης πόλης (Goyal, 2023)

Πιο αναλυτικά, ως ακριβής χαρτογράφηση θεωρείται η ολοκληρωμένη ψηφιακή μοντελοποίηση που πραγματοποιεί μια ψηφιακή δίδυμη πόλη, μέσω τοποθέτησης κατάλληλων αισθητήρων σε επίπεδο εδάφους, υπογείου, αέρα καθώς και υδάτινων περιβαλλόντων. Χαρτογραφούνται έτσι, αστικές γέφυρες, δρόμοι, λαμπτήρες, καλύμματα φρεατίων, κτίρια και πλήθος άλλων υποδομών. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται ορθή αντίληψη και δυναμική παρακολούθηση των καταστάσεων λειτουργίας μιας πόλης, σχηματίζοντας και αποκωδικοποιώντας τις ακριβείς τελικές πληροφορίες των αντλούμενων δεδομένων, αντιστοιχίζοντας έτσι την φυσική με την εικονική πραγματικότητα.

Το δεύτερο χαρακτηριστικό της πραγματικής-εικονικής αλληλεπίδρασης, έρχεται να εμπλουτίσει και να ολοκληρώσει το πρώτο, με τη δυνατότητα αναπαράστασης και ένταξης όλων των κινούμενων και μη «ιχνών», όπως ανθρώπους, οχήματα, υλικοτεχνικά συστήματα υποστήριξης και πολλά ακόμα. Ένα ΨΔ πρέπει να διαθέτει πολύ υψηλό βαθμό ακρίβειας, όσον αφορά το περιεχόμενο, την εμφάνιση και τη λειτουργικότητα, ώστε να μιμηθεί με αξιοπιστία κάθε πτυχή του φυσικού του διδύμου, περιέχοντας στο σύνολο πληροφοριών του



δεδομένα από μικροατομικό έως μακρογεωμετρικό επίπεδο των πραγμάτων (Singh et al., 2021b).

Ο ορισμός λογισμικού, στη συνέχεια, συνδυάζει την υλοποιημένη κατάσταση των προηγούμενων χαρακτηριστικών, δημιουργώντας ένα αντίστοιχο εικονικό μοντέλο, βασισμένο εξ ολοκλήρου στην εκάστοτε φυσική πόλη, προσομοιάζοντας αυτή τη φορά, μέσω εξειδικευμένων πλατφόρμων λογισμικού, τη συμπεριφορά των πολιτών, αντικειμένων και γεγονότων στον εικονικό χώρο. Δίνεται έτσι η δυνατότητα για υλοποίηση ρεαλιστικών σεναρίων που μπορεί να συμβούν εντός μιας πόλης, όπως κυκλοφοριακή συμφόρηση, πλημμύρες και σεισμοί, διαχειρίζοντας τα πριν αυτά συμβούν.

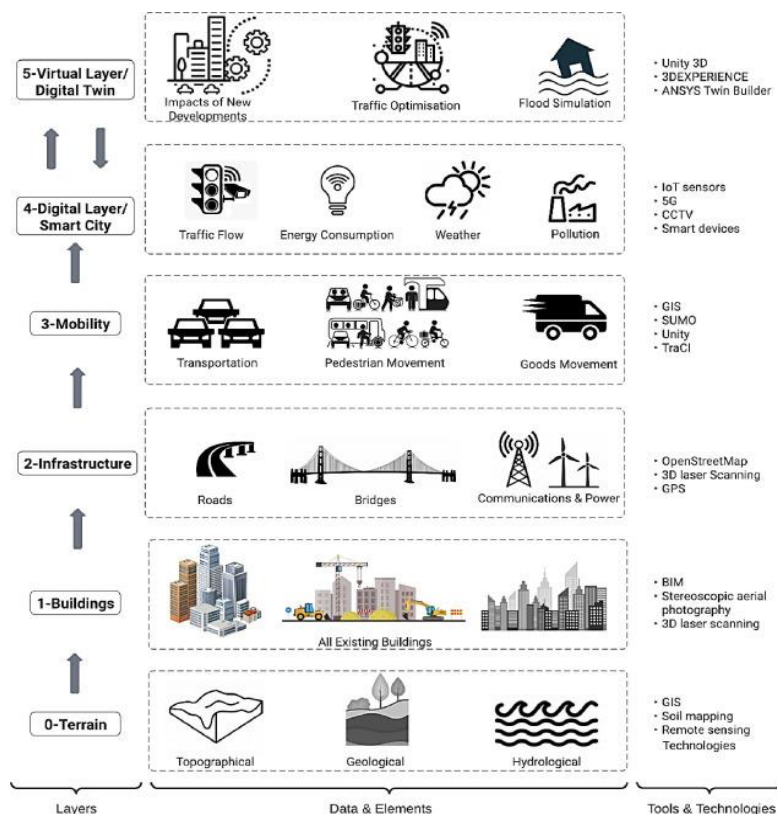
Τέλος, η έξυπνη ανάδραση, ως φυσική συνέχεια των προηγούμενων χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβάνει την έγκυρη και έγκαιρη προειδοποίηση πιθανών κινδύνων και δυσμενών επιπτώσεων εντός του άστυ, μέσω προγραμματισμού και σχεδιασμού των γεγονότων, παρέχοντας απαραίτητα και εφικτά αντίμετρα. Παράλληλα, λόγω της δυναμικότητας των πόλεων και των συνεχών αλλαγών στο πέρασμα του χρόνου, τα ΨΔ πρέπει να προσαρμόζονται άμεσα. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μέσω συνεχούς ανταλλαγής δυναμικών πληροφοριών, όπως περιγραφικά και ιστορικά αστικά δεδομένα (Barricelli et al., 2019). Έτσι, συνδυάζοντας και ενοποιώντας αυτά τα χαρακτηριστικά με τις τεχνολογίες νέας γενιάς της Βιομηχανίας 4.0, όπως το Cloud Computing, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, την Τεχνητή Νοημοσύνη κ.α, θα ενισχυθεί περισσότερο η κατασκευή έξυπνων πόλεων, βελτιώνοντας ταυτόχρονα τις παροχές υπηρεσιών προς τους πολίτες.

## 4.2 Μοντέλα και Εργαλεία Ψηφιακών Διδύμων στις έξυπνες πόλεις

Οι εφαρμογές των Ψηφιακών Διδύμων έχουν αρχίσει πλέον να εμφανίζονται στις έξυπνες πόλεις, συνδυάζοντας τρισδιάστατες αναπαραστάσεις, χωρική μοντελοποίηση, καθώς και αριθμητικές και φυσικές προσομοιώσεις ηλεκτρικών και μηχανικών μοντέλων με αμφίδρομες ροές δεδομένων. Από αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε κτίρια, έως μηχανήματα της πόλης γεωγραφικά κατανεμημένοι σε διάφορες συσκευές IoT (Dani et al., 2023). Μέσω επιλεγμένων εργαλείων και τεχνολογιών που θα αναφερθούν στην ενότητα αυτή, παρουσιάζεται ένα ψηφιακό μοντέλο έξυπνης πόλης, το οποίο μπορεί να αποτελέσει μια πλατφόρμα με σκοπό την υποστήριξη ακριβών αποστάσεων, την προσομοίωση των αστικών συνθηκών καθώς και τη συμμετοχή των κοινοτήτων στη παροχή πληροφοριών (G.



White et al., 2021a). Το αναπτυξιακό αυτό μοντέλο βασίζεται στο ψηφιακό μοντέλο δίδυμης έξυπνης πόλης το οποίο χωρίζεται σε μια σειρά από έξι επίπεδα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4. Επίπεδα ανάπτυξης μιας ψηφιακής δίδυμης έξυπνης πόλης (G. White et al., 2021a)

Τα πέντε πρώτα επίπεδα, δηλαδή το έδαφος, τα κτίρια, η υποδομή, η κινητικότητα και το ψηφιακό επίπεδο/έξυπνη πόλη, χτίζονται το ένα πάνω στο άλλο συλλέγοντας ταυτόχρονα δεδομένα από την πόλη. Αυτά διαβιβάζονται τελικά στο εικονικό και τελικό επίπεδο, όπου πραγματοποιούνται πρόσθετες προσομοιώσεις βελτιστοποίησης της τοποθέτησης κτιρίων, της κινητικότητας, της ενεργειακής σπατάλης κ.α. Η περιγραφή των επιπέδων του μοντέλου αυτού αναλύεται ως εξής:

#### 4.2.1 Έδαφος

Στο μηδενικό επίπεδο των Ψηφιακών Δίδυμων Έξυπνων Πόλεων, αναπαρίστανται οι βασικές πληροφορίες και τα χαρακτηριστικά του εδάφους στο οποίο είναι κτισμένη η εκάστοτε πόλη.

Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να αποτελούν την ύπαρξη υπεράκτιων τμημάτων, καναλιών ή ποταμιών που την διασχίζουν, πιθανές απότομες κλίσεις ή λόφους, περιοχές με γόνιμο έδαφος για καλλιέργειες, καθώς και περιοχές που παρουσιάζουν κακή αποστράγγιση υδάτων σε περιπτώσεις έντονης βροχόπτωσης (Mylonas et al., 2021b). Με χρήση κατάλληλων χαρτών που αναπαριστούν το ακριβές ανάγλυφο του εδάφους διευκολύνεται πλέον η ενσωμάτωση των οποιονδήποτε λεπτομερειών και πληροφοριών στο μοντέλο, όπως στη περίπτωση πλημμύρας, όπου ειδικές πλατφόρμες όπως η Unity3D (Dani et al., 2023), επιτρέπει τη δυναμική απεικόνιση της ανόδου της στάθμης του νερού. Αυτό διευκολύνει τον εντοπισμό περιοχών που θα επηρεάζονταν πρώτες σε περίπτωση υπερχειλίσσης ποταμού ή έντονων βροχοπτώσεων, κάτι που είναι χρήσιμο για τον σχεδιασμό των αρχών όσον αφορά την ανάπτυξη μέτρων όπως η εκκένωση συγκεκριμένων περιοχών και η έγκαιρη ενημέρωση των πολιτών (G. White et al., 2021a). Για παράδειγμα, μέσω προσομοίωσης του ποταμού Liffey στο Δουβλίνο, αναλύονται οι επιπτώσεις της πλημμύρας σε γειτονικές περιοχές, με έμφαση στους δρόμους και τις διαδρομές που θα γίνουν απρόσιτες. Η ανάλυση αυτή είναι σημαντική για μονόδρομους, όπου ο κίνδυνος εγκλωβισμού οχημάτων είναι μεγαλύτερος.

#### 4.2.2 Κτίρια

Στο πρώτο επίπεδο του ψηφιακού μοντέλου προστίθενται στο ήδη μελετημένο έδαφος, τα τρέχοντα κτίρια της πόλης, με χρήση κυρίως Μοντέλων Δομικών Πληροφοριών (BIM) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως Ψηφιακό Δίδυμο αυτών. Το BIM είναι ουσιαστικά η πιο ολοκληρωμένη και έξυπνη ψηφιακή αναπαράσταση μιας υποδομής με όλα τα απαραίτητα λειτουργικά και φυσικά χαρακτηριστικά της (El-Agamy et al., 2024). Αποτελεί πηγή αναγκαίων αρχιτεκτονικών, υδραυλικών και ηλεκτρικών πληροφοριών ενός κτιρίου ή μιας υποδομής. Οι πληροφορίες αυτές συμβάλλουν σε έναν πολυδιάστατο και πολυσύνθετο σχεδιασμό, δημιουργώντας παράλληλα μια αξιόπιστη βάση λήψης αποφάσεων, για ολόκληρο το κύκλο ζωής του έργου, δηλαδή από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού και υλοποίησης έως την κατεδάφιση (G. White et al., 2021a).

Το BIM, εξυπηρετεί κυρίως τις ανάγκες των σταδίων σχεδιασμού και κατασκευής, ενώ τα ΨΔ διακρίνονται για την αποδοτικότητά τους στη συντήρηση και τη λειτουργία κτιρίων. Η συγχώνευση επομένως της λεπτομερούς αρχιτεκτονικής και δομικής πληροφορίας που παρέχει το BIM, με τα λειτουργικά δεδομένα και τις αναλυτικές δυνατότητες του ΨΔ

επιτρέπει τη δημιουργία ολοκληρωμένων και ακριβών ψηφιακών κτιριακών μοντέλων (El-Agamy et al., 2024). Ποικίλες παράμετροι, όπως το τρισδιάστατο μοντέλο, τα χρονοδιαγράμματα, η κοστολόγηση, η βιωσιμότητα και η λειτουργικότητα, συνθέτουν μια εργονομική προσέγγιση της διαδικασίας υλοποίησης του κατασκευαστικού έργου, με απώτερο σκοπό τη μείωση σπατάλης πόρων και χρόνου, καθώς και την αύξηση της αποδοτικότητας.

Τα τρισδιάστατα δεδομένα κτιρίου μπορούν να δημιουργηθούν μέσω στερεοσκοπικής αεροφωτογράφισης από ειδικά διαμορφωμένα Drones, χρησιμοποιώντας δεδομένα Shapefile (GIS), και προσφέροντας πλεονεκτήματα όπως, ακριβή μοντελοποίηση και βελτιωμένη απεικόνιση εδάφους, καθώς και δυνατότητα παρακολούθησης τροποποιήσεων με τη πάροδο του χρόνου (Mylonas et al., 2021b). Η παρακολούθηση επίσης και η συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής χρήσης των κτιρίων σε πραγματικό χρόνο, αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι του επιπέδου αυτού, διασφαλίζοντας την φυσική δομή του αστικού περιβάλλοντος και συμβάλλοντας αισθητά στην αποδοτική και βιώσιμη ενεργειακή διαχείριση, μειώνοντας το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα (Mylonas et al., 2021b).

Ωστόσο, παρόλο που το BIM έχει επεκταθεί ώστε να περιλαμβάνει τη διαχείριση του κύκλου ζωής των ενσωματωμένων περιουσιακών στοιχείων, δεν είναι ακόμη πλήρως συμβατό με τεχνολογίες όπως τα μεγάλα δεδομένα, το IoT και τη Τεχνητή Νοημοσύνη. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση, η εξέλιξή του πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά, μεταβαίνοντας από ένα στατικό μοντέλο με περιορισμένη διαλειτουργικότητα σε ένα δυναμικό σύστημα διασυνδεδεμένων δεδομένων, όπου τα κατασκευαστικά στοιχεία θα μπορούν να αναπαρίστανται πλήρως μέσω ενός Ψηφιακού Διδύμου (Evangelou et al., 2022).

#### 4.2.3 Υποδομή

Στο δεύτερο επίπεδο προστίθεται η υποδομή που περιβάλλει τα κατασκευασμένα κτίρια της πόλης, όπως δρόμοι, τηλεπικοινωνίες και πηγές ενέργειας, που αποτελούν τις βασικές οργανωτικές και φυσικές δομές, απαραίτητες για τη λειτουργικότητα μιας κοινωνίας. Ονόματα κτιρίων, οδών, περιοχών, δικτύων αποχέτευσης και διανομής νερού, καθώς και πολλές ακόμα χρήσιμες πληροφορίες διαμόρφωσης του βασικού χάρτη υποδομής μιας πόλης, μπορούν να ληφθούν από δισδιάστατους χάρτες οι οποίοι ανακτώνται από εφαρμογές όπως το OpenStreetMap ή το Google Maps (Dani et al., 2023). Έρευνες, στερεοσκοπικές

αεροφωτογραφίες και δορυφορικές απεικονίσεις, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τις δημόσιες συγκοινωνίες, την ηλεκτρική ενέργεια, τους αυτοκινητόδρομους, τις γέφυρες, τις τηλεπικοινωνίες και τις κολώνες φωτισμού (G. White et al., 2021a).

Οι οργανισμοί, επομένως, έχουν τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν τα δεδομένα του OpenStreetMap σε εφαρμογές ανάλυσης αγοράς, βελτίωσης των διαδρομών και του χρόνου μετακίνησης, ενώ η συνεργατική φύση του επιτρέπει στον εκάστοτε χρήστη να βελτιώνει τους χάρτες, συμμετέχοντας ενεργά και διασφαλίζοντας την ακρίβεια και τη διαρκή συνάφεια των πληροφοριών.

#### 4.2.4 Κινητικότητα

Το Επίπεδο 3 του μοντέλου Ψηφιακής Δίδυμης Έξυπνης Πόλης ενσωματώνει την πτυχή της κινητικότητας στις υποδομές και τα επίπεδα κτιρίων, εστιάζοντας στη ροή ανθρώπων και αγαθών. Η κινητικότητα αναφέρεται στις καθημερινές μετακινήσεις των πολιτών και τη διανομή αγαθών, συμβάλλοντας στην καθημερινότητά τους (G. White et al., 2021a).

Η εφαρμογή SUMO (Simulation of Urban Mobility) αποτελεί ένα από τα πολλά χρήσιμα εργαλεία αυτοματοποίησης βασικών εργασιών δημιουργίας, εκτέλεσης και αξιολόγησης για την προσομοίωση της αστικής κινητικότητας (Krajzewicz et al., 2002). Ο εγκατεστημένος προσομοιωτής, υποστηρίζει διάφορες μορφές μεταφοράς και διαχείρισης κυκλοφορίας, όπως το περπάτημα, η χρήση ποδηλάτων, μηχανοκίνητων δίτροχων, καθώς και παραμετροποιήσεων οχημάτων, ενώ παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης σιδηροδρομικών γραμμών και πλωτών οδών.

Το λογισμικό Unity3D (Kassim & Bakar, 2021) προσφέρει μια διαδραστική προσέγγιση για τη βελτίωση αυτών των προσομοιώσεων μέσω της διεπαφής ελέγχου κυκλοφορίας (TraCI), η οποία συνδέει τις λειτουργίες του SUMO με τρισδιάστατα μοντέλα. Επιτρέπεται έτσι η εισαγωγή νέων σεναρίων και συμπεριφορών που δεν υποστηρίζονται εγγενώς από τον SUMO. Ένα παράδειγμα αποτελεί η προσθήκη διαφορετικών κατηγοριών πεζών, όπως ενήλικες και ηλικιωμένοι, ώστε να εξεταστεί η δυναμική τους στο αστικό περιβάλλον και να βελτιωθεί η προσβασιμότητα και η ασφάλεια των μετακινήσεών τους.

#### 4.2.5 Ψηφιακό Επίπεδο / Έξυπνη Πόλη

Η αναγνωσιμότητα της αξίας του επιπέδου αυτού έχει πολλαπλασιαστεί εξαιτίας των πολυάριθμων έργων που επικεντρώνονται στην ενσωμάτωση αισθητήρων, καμερών κλειστού κυκλώματος και IoT στην πόλη για συλλογή δεδομένων ανά πάσα στιγμή. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται για την παρακολούθηση και διαχείριση κρίσιμων υποδομών (Mylonas et al., 2021b), όπως η κυκλοφορία και οι μεταφορές, οι υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, η διαχείριση απορριμμάτων, η ανίχνευση εγκλημάτων, τα δίκτυα ύδρευσης, η μέτρηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και άλλες κοινοτικές υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένων σχολείων και νοσοκομείων (Williamson, 2015).

Αυτό το επίπεδο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην υποστήριξη του εικονικού επιπέδου/Ψηφιακού Δίδυμου, καθώς συγκεντρώνει δεδομένα από όλες τις προαναφερθείσες υποδομές της πόλης. Τα δεδομένα προέρχονται από διάφορες πηγές, όπως συσκευές, αισθητήρες καθώς και τους ίδιους τους πολίτες, που μέσω κινητών τηλεφώνων αναφέρουν καταστάσεις τη στιγμή ακριβώς που συμβαίνουν. Αντίστοιχα, συνδεδεμένα σύγχρονα οχήματα αναφέρουν δεδομένα κυκλοφορίας για την προσαρμογή των φωτεινών σηματοδοτών, βελτιστοποιώντας τη ροή στους δρόμους. Παράλληλα, “έξυπνα δέντρα” με αισθητήρες υγρασίας ενημερώνουν για την ανάγκη ποτίσματος, ενώ αισθητήρες ανέμου συλλέγουν δεδομένα από παράκτιες περιοχές για τον σχεδιασμό υπεράκτιων αιολικών πάρκων (A. C. K. Lee et al., 2015).

#### 4.2.6 Επαυξημένο Επίπεδο / Ψηφιακό Δίδυμο

Στη κορυφή της κατάταξης παρουσιάζεται το επαυξημένο επίπεδο που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων, βασισμένων στο σύνολο των δεδομένων κινητικότητας, υποδομής, κτιρίων και εδάφους, που παράγονται από το ψηφιακό επίπεδο. Διασυνδέεται επομένως αποτελεσματικά με το ψηφιακό επίπεδο, επιτρέποντας μια αμφίδρομη ροή δεδομένων. Σε συνέχεια του προηγούμενου παραδείγματος υπεράκτιων αιολικών πάρκων (A. C. K. Lee et al., 2015), τα δεδομένα ανέμου συλλέγονται στο ψηφιακό στρώμα και χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή λεπτομερών προσομοιώσεων, μέσω των οποίων θα κριθεί αν ένα τέτοιο εγχείρημα θα επιτεύξει τους στόχους παροχής ανανεώσιμης ενέργειας για τη πόλη.

Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί να δημιουργηθεί ένα Ψηφιακό Δίδυμο ανεμογεννητριών εξαιρετικής ακρίβειας, καθορίζοντας την βέλτιστη διάσταση των πτερυγίων τους και το βέλτιστο σημείο τοποθέτησής τους. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούνται μόνο τα απαραίτητα δεδομένα από τα πέντε επίπεδα. Για παράδειγμα, δεδομένα σχετικά με το αστικό έδαφος και κινητικότητα, τα κτίρια της πόλης ή το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο 5G δεν είναι απαραίτητα για αυτήν την προσομοίωση (G. White et al., 2021a). Η εστίαση είναι αποκλειστικά στις πληροφορίες που σχετίζονται με την υπεράκτια κυκλοφορία, τις αιολικές συνθήκες και την ανατροφοδότηση των πολιτών για να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις υλοποίησής της εγκατάστασής τους.

Το Ψηφιακό Δίδυμο μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής κτιρίων μέσα στην πόλη. Με την αξιοποίηση δεδομένων ανίχνευσης από το ψηφιακό στρώμα, μέσω διαφόρων προγραμμάτων, όπως για παράδειγμα του Skyline Simulation, μπορούν να πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις στο εικονικό επίπεδο για να αξιολογηθεί η επίδραση των εκάστοτε κτιρίων στο φυσικό περιβάλλον (Dani et al., 2023). Ταυτόχρονα, θα επιτρέπεται σε δημοσίους αξιωματούχους και απλούς πολίτες να περιηγηθούν γύρω από το Ψηφιακό Δίδυμο, παρατηρώντας τις επιδράσεις που θα επιφέρει ένα μεγάλο κτίριο, όπως για παράδειγμα το αν θα εμποδίζει την πρόσβαση της ηλιακής ακτινοβολίας στα υπάρχοντα κοντινά πάρκα και τους δημοσίους χώρους.

Παράλληλα, η ολοκλήρωση σύνθετων οικοδομικών εργασιών απαιτούν χρόνια για να κατασκευαστούν, με αποτέλεσμα να υπάρξει απόκλιση σχετικά με την τωρινή άποψη της πόλης και την εμφάνιση αυτής όταν τα έργα θα έχουν ολοκληρωθεί. Μέσω της προσομοίωσης Skyline, ο εκάστοτε χρήστης μπορεί να ψηφίσει αν εγκρίνει το νέο κτίριο ή όχι, όπως και να σχολιάσει αιτιολογώντας την απόφασή του (G. White et al., 2021a). Επιπλέον, ένα ολοκληρωμένο Ψηφιακό Δίδυμο των προτεινόμενων κτιρίων μπορεί να υποβληθεί σε δοκιμές έναντι των γνωστών προκλήσεων, όπως οι έντονοι άνεμοι ή η εγγύτητα σε σεισμικές ρήξεις (Mylonas et al., 2021b). Δεδομένα σχετικά με αιολικές συνθήκες και σεισμική δραστηριότητα, που συλλέγονται στο ίδιο επίπεδο επομένως, μπορούν να ενσωματωθούν στο σχεδιασμό για να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα των νέων υποδομών. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία και τα κτίρια πληρούν τα απαιτούμενα πρότυπα ασφαλείας, μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα διαδικτυακό ΨΔ για παρακολούθηση και περαιτέρω διαχείριση (G. White et al., 2021a).

Παρακάτω, αναφέρονται κάποιες από τις πιο δημοφιλείς λύσεις λογισμικού και προϊόντα εφαρμογής ΨΔ που είναι διαθέσιμα σήμερα, σύμφωνα με τους (Mylonas et al., 2021c), καθιστώντας εφικτή τη τρισδιάστατη προσομοίωση και χωρική μοντελοποίηση των υποδομών:

- Η πλατφόρμα 3DEXPERIENCE της Dassault Systemes χρησιμοποιείται για τη δημιουργία Ψηφιακών Διδύμων σε κλίμακα πόλης, όπως το έργο Virtual Singapore, το οποίο αποτελεί τη πρώτη πλατφόρμα ψηφιακής αναπαράστασης έξυπνης πόλης που φτιάχτηκε ποτέ και αποτέλεσε το εφαλτήριο για όλες τις μετέπειτα υλοποιήσεις. Το χαρτοφυλάκιο της περιλαμβάνει εργαλεία για το σχεδιασμό και τη δημιουργία 3D μοντέλων (π.χ., Solidworks, CATIA), τη δημιουργία και προσομοίωση ΨΔ αντικειμένων και διαδικασιών (π.χ., SIMULIA, DELMIA) και για τη διαχείριση πληροφοριών με έξυπνο τρόπο (π.χ., NETVIBES), εξασφαλίζοντας έναν ολιστικό τρόπο για τους αστικούς σχεδιαστές να λαμβάνουν σωστές αποφάσεις σε όλα τα στάδια κατασκευής.
- Η Microsoft προσφέρει την πλατφόρμα Azure Digital Twins, χαρακτηρίζοντας την με τον όρο «Πλατφόρμα ως Υπηρεσία» (PaaS), η οποία επιτρέπει τη δημιουργία γραφημάτων γνώσης, βάσει ψηφιακών μοντέλων ολόκληρων περιβαλλόντων. Η πλατφόρμα παρέχει τη γλώσσα μοντελοποίησης, Digital Twins Definition Language (DTDL - ειδικού τύπου JSON), για τον ορισμό των ψηφιακών οντοτήτων που αναπαριστούν τα πραγματικά περιουσιακά στοιχεία, όσον αφορά τις καταστάσεις τους, τα τηλεμετρικά δεδομένα, τις εντολές, τα εξαρτήματα και τις σημασιολογικές σχέσεις.
- Η πλατφόρμα (Hexagon Reality Data Repository) της Hexagon στοχεύει να προσφέρει λύσεις Ψηφιακών Διδύμων για έξυπνες πόλεις, επικεντρωμένη στην παροχή εργαλείων και δεδομένων για τη δημιουργία 3D αντιγράφων αστικών περιβαλλόντων, αξιοποιώντας δεδομένα από λείζερ, αεροφωτογραφίες και δεδομένα χαρτογράφησης. Βασίζεται, ωστόσο, στην ανάπτυξη κυρίως τρισδιάστατων μοντέλων με στόχο τον σχεδιασμό, χωρίς την εισαγωγή των δεδομένων που έχουν αντληθεί από τους εγκατεστημένους αισθητήρες.
- Επόμενη πλατφόρμα είναι η SmartWorldPro της CityZenith, η οποία επιτρέπει τη συγκέντρωση δεδομένων BIM (Building Information Modeling), CAD (Computing Aided Design), GIS (Geographic Information System) εγγράφων και IoT αισθητήρων σε μια πλατφόρμα τριών διαστάσεων. Βασισμένη στη μηχανή παιχνιδιών Unity3D,



επιτρέπεται η απεικόνιση και η ανάλυση όλων των σχετικών συστημάτων και δεδομένων σε ένα ενιαίο πίνακα ελέγχου, όπως την ενέργεια, σχεδίαση, νομικό υπόβαθρο, ασφάλεια και συντήρηση.

- Η πλατφόρμα ArcGIS της ESRI επιτρέπει την ανάπτυξη και ενσωμάτωση των ψηφιακών διδύμων, συνδυάζοντας δεδομένα Reality Capture, GIS και BIM (Building Information Modeling) με ροές δεδομένων IoT σε πραγματικό χρόνο, καθώς και αλγόριθμους AI. Ο χρήστης, μέσω υφιστάμενου ή αυτοδημιούργητου κώδικα μπορεί να χαρτογραφήσει και να διαχειριστεί τις εφαρμογές και τις υπηρεσίες της πλατφόρμας.
- Τέλος, η IES έχει αναπτύξει την πλατφόρμα Intelligent Communities Lifecycle (ICL), βασισμένη σε διασυνδεδεμένα εργαλεία με κοινή βάση δεδομένων, η οποία αναπτύσσοντας αλγόριθμους Τεχνητής Νοημοσύνης, συνδυάζει τρισδιάστατα μοντέλα με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και της διαχείρισης πόρων. Μπορεί επομένως, να εφαρμοστεί από ένα μεμονωμένο κτίριο έως το σύνολο μιας πόλης με σκοπό τη παροχή απαραίτητων πληροφοριών (Durão et al., 2018).

Συνεπώς, οι ποικίλες πλατφόρμες λογισμικού προωθούν τις δυνατότητες του Ψηφιακού Δίδυμου στον τομέα των έξυπνων πόλεων και της βιομηχανίας, προσφέροντας συγχρόνως ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για τη δημιουργία, παρακολούθηση και ανάλυση αστικών περιβαλλόντων μέσω της τεχνολογίας τους.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Ψηφιακά Δίδυμα στην Αστική Διαχείριση

Όπως είναι πλέον κατανοητό, εξαιτίας του εκθετικά αυξανόμενου ρυθμού αστικοποίησης, εγείρονται τεράστιες αστικές προκλήσεις που αφορούν τις υποδομές, τις ανάγκες στέγασης, μεταφοράς, υγειονομικής περίθαλψης, ενέργειας και κλιματικής ανθεκτικότητας. Στόχος της τεχνολογίας των Ψηφιακών Διδύμων αποτελεί η αντιμετώπιση της αβεβαιότητας και των προκλήσεων εντός πολεοδομικού σχεδιασμού, κατασκευών και υπηρεσιών, αξιοποιώντας εργαλεία όπως προσομοιώσεις, παρακολούθηση, διάγνωση, πρόβλεψη και έλεγχο (G. White et al., 2021b).

Στον τομέα της αστικής διαχείρισης, τα ΨΔ αξιοποιούνται για την ανάλυση σύνθετων σεναρίων που αφορούν τη ροή ανθρώπων, ενέργειας, αγαθών και δεδομένων. Εφαρμογές περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση της διάταξης των αστικών περιοχών, την αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης σε ώρες αιχμής, την προσομοίωση φυσικών καταστροφών, καθώς και τον σχεδιασμό αποτελεσματικών σχεδίων εκκένωσης σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης. Απώτερος σκοπός είναι η κατανόηση των αστικών λειτουργικών μοτίβων, η πρόληψη κινδύνων, η συρρίκνωση των εξόδων διαχείρισης και η διασφάλιση της κοινωνικής ευημερίας και προστασίας των πολιτών (El-Agamy et al., 2024). Τα Ψηφιακά Δίδυμα επομένως, μπορούν να παίξουν καθοριστικό ρόλο σε μια πληθώρα τομέων εντός μιας αναδυόμενης έξυπνης πόλης, όπως αναλύεται παρακάτω:

#### 5.1 Ενεργειακή Διαχείριση

Καλύπτοντας μόλις το 2% της επιφάνειας της Γης, οι πόλεις απορροφούν το 78% της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ ευθύνονται για το 60% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Nations, 2020). Το ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί την ενεργειακή ραχοκοκαλιά και έναν από τους σημαντικότερους πόρους για τη ποιοτική λειτουργικότητα μιας πόλης, καθώς μέσω αυτού τροφοδοτούνται κτίρια, υποδομές, υπηρεσίες και μεταφορές με την απαιτούμενη αξιοπιστία και ποιότητα. Τα Ψηφιακά Δίδυμα, παρότι αποτελούν μια νέα και πολύπλοκη μέθοδο μελέτης συστημάτων ισχύος, διευκολύνουν την ευελιξία παροχής υπηρεσιών, ενώ παράλληλα δίνουν τη δυνατότητα στην ενεργειακή

βιομηχανία να μοντελοποιεί φυσικά μηχανικά συστήματα. Τα συστήματα αυτά συμπεριλαμβάνουν σταθμούς αποθήκευσης και παραγωγής ενέργειας, επιφέροντας μείωση του κόστους, βελτίωση της αποδοτικότητας και προληπτική αντιμετώπιση πιθανών τεχνικών ζητημάτων ή κλιματικών κινδύνων (El-Agamy et al., 2024).

Με την ενίσχυση των πρωτοβουλιών για βιώσιμη ενέργεια, οι έξυπνες πόλεις στρέφονται όλο και περισσότερο στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και στη μείωση των εκπομπών άνθρακα. Τα Ψηφιακά Δίδυμα προσφέρουν τη δυνατότητα ακριβούς παρακολούθησης της χρήσης ενέργειας σε κτίρια, φωτισμό δρόμων και πλήθος άλλων αστικών υποδομών, ενώ παράλληλα επιτρέπουν την ανίχνευση σφαλμάτων, πρόβλεψη φορτίου και αξιολόγηση της κατάστασης της υγείας των ηλεκτρικών εργαλείων (Fuller et al., 2020). Μέσω της προσομοίωσης στρατηγικών μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας και της αναγνώρισης σημείων αναποτελεσματικότητας, οι πόλεις μπορούν να επιτύχουν ουσιαστική βελτιστοποίηση κόστους και παράλληλα να αποκομίσουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έξυπνων δικτύων και ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων και συσκευών.

### 5.1.1 Προσομοίωση Έξυπνων Μικροδικτύων Ενέργειας

Ένα Μικροδίκτυο αποτελεί ένα τοπικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα, εξασφαλίζοντας αδιάλειπτη παροχή ρεύματος ακόμη και όταν το κεντρικό δίκτυο αντιμετωπίζει προβλήματα λειτουργίας. Αποτελούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τμήματα δικτύων ζήτησης και επικοινωνιών, ενώ αποτελούν κρίσιμα δομικά στοιχεία για τις έξυπνες πόλεις, καθώς ενισχύουν την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητά τους, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να υιοθετήσουν βιώσιμες πρακτικές ενεργειακής διαχείρισης (Li & Tan, 2023).

Λόγω της πολυπλοκότητας που σχετίζεται με τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη συντήρησή τους, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός αποδοτικού μοντέλου προσομοίωσης, ικανού να διαχειριστεί τις πολύπλοκες και χωροχρονικές παραμέτρους του συστήματος. Οι τεχνολογίες Ψηφιακών Διδύμων προσφέρουν μια πολλά υποσχόμενη λύση, καθώς είναι ικανά να παρέχουν ένα ακριβές ψηφιακό αντίγραφο της φυσικής υποδομής του συστήματος ισχύος (Jafari et al., 2023).

Μέσω της χρήσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, επιτρέπεται στα ΨΔ να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά του Μικροδικτύου και των επιμέρους στοιχείων του, όπως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ή τμήματα δικτύων επικοινωνίας και ζήτησης, διευκολύνοντας πιο ακριβείς προβλέψεις για την απόδοση του συστήματος. Αυτή η τεχνολογία βελτιώνει την κατανόηση της δυναμικής του Μικροδικτύου, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων και την αυξημένη αποδοτικότητα (Kumari et al., 2023).

Το ΨΔ ενός τέτοιου τύπου δικτύου αποτελείται από ένα εικονικό μοντέλο που αναπαριστά φυσικά στοιχεία, όπως γεννήτριες, φορτία και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία συνδέονται με δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η ικανότητα κατανόησης των στοιχείων του Μικροδικτύου και προσφέρεται μια ρεαλιστική αναπαράσταση της λειτουργίας του. Αυτό βοηθά τους χειριστές να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα προτού προκύψουν και να λαμβάνουν προληπτικά μέτρα, ενισχύοντας την αξιοπιστία, τη σταθερότητα και την ευελιξία της εγκατάστασης (Jafari et al., 2023). Παράλληλα, δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της απόδοσης, καθορίζοντας για παράδειγμα την ιδανική ισορροπία ισχύος μεταξύ των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων.

Ακολούθως, τα ΨΔ συμβάλλουν στον εντοπισμό σημείων ενεργειακής απώλειας ή αναποτελεσματικότητας, επιτρέποντας, μέσω προσομοίωσης της συμπεριφοράς του καθολικού συστήματος και των επιμέρους στοιχείων του, την εφαρμογή κατάλληλων παρεμβάσεων για την έγκαιρη αντιμετώπιση του προβλήματος και την αύξηση της συνολικής απόδοσης του δικτύου (Pandiyani et al., 2023).

Στη μελέτη ανάπτυξης ενός ενεργειακού Μικροδικτύου με χρήση ΑΠΕ, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη μοντελοποίηση των πηγών ηλιακής και αιολικής ενέργειας μέσω της ενσωμάτωσης προσομοιώσεων Ψηφιακών Διδύμων, ώστε να επιτευχθεί ακριβής ανάλυση και αναπαράσταση της λειτουργίας αυτών των πόρων στο περιβάλλον μιας έξυπνης πόλης (Hoang et al., 2021). Για την ανάπτυξη του μοντέλου, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η ηλιακή ακτινοβολία, ο αέρας, οι κλιματικές συνθήκες και η γεωγραφική θέση μιας πόλης, ενώ απαραίτητη είναι η συλλογή παλαιότερων ιστορικών δεδομένων καιρού προκειμένου να αποτυπωθεί ορθά η στοχαστική φύση της ηλιακής παραγωγής ενέργειας.

Επιτρέπεται με το τρόπο αυτό η δημιουργία μιας εικονικής αναπαράστασης των φυσικών συστημάτων ηλιακής και αιολικής ενέργειας, ενσωματώνοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, καθώς και ιστορικές πληροφορίες και αλγόριθμους πρόβλεψης συμβάντων, προσομοιάζοντας τη συμπεριφορά των φυσικών παρόχων ενέργειας υπό διαφορετικά

σενάρια διακυμάνσεων. Διαμορφώνεται έτσι ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη, τη διαχείριση και τη βελτίωση των Μικροδικτύων στο πλαίσιο της έξυπνης πόλης.

Σύμφωνα με τους (Li & Tan, 2023), ο ενεργειακός Ψηφιακός Δίδυμος εξοπλισμός που χρησιμοποιείται κατά βάση για συστήματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης τέτοιου είδους συστημάτων, περιλαμβάνουν:

- **Έξυπνους μετρητές:** Αποτελούν προηγμένες ψηφιακές συσκευές που είναι εγκατεστημένες σε διάφορα σημεία του ηλεκτρικού δικτύου ενέργειας της πόλης και συλλέγουν δεδομένα χωρίς καθυστέρηση για την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, το διάστημα διακοπών, την υπερφόρτωση ή μη του συστήματος και πλήθος άλλων σχετικών παραμέτρους. Ταυτόχρονα, παρακολουθούν την ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και υδροηλεκτρικές μονάδες. Τα δεδομένα αυτά τροφοδοτούνται αμφίδρομα στο ΨΔ μοντέλο επιτρέποντας την ανάλυση και προσομοίωση των ροών ενέργειας καθώς και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διαχείρισης αυτής, εφαρμόζοντας στρατηγικές εξισορρόπησης φορτίου και δυναμικής τιμολόγησης.
- **Αισθητήρες καιρού:** Συλλέγουν ακριβείς μετρήσεις μετεωρολογικών δεδομένων, όπως την ηλιακή ακτινοβολία, για ακριβή μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών συστημάτων, την ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, για πρόβλεψη της παραγόμενης ισχύος, καθώς και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, η οποία επηρεάζει την αποδοτικότητα των ηλιακών πάνελ και των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Οι πληροφορίες αυτές είναι ζωτικής σημασίας για τη μοντελοποίηση των ηλιακών πηγών ενέργειας και των ανεμογεννητριών. Με τον τρόπο αυτό οι σχεδιαστές μπορούν να εντοπίσουν τις βέλτιστες θέσεις εγκατάστασης ανεμογεννητριών και ηλιακών συλλεκτών βασισμένοι σε παράγοντες όπως τα μοτίβα του ανέμου, η έκθεση στο ηλιακό φως και ο διαθέσιμος χώρος, υποστηρίζοντας ακριβείς προσομοιώσεις στο περιβάλλον του Ψηφιακού Διδύμου.
- **Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS):** Το EMS αποτελεί τον κεντρικό "εγκέφαλος" της ενεργειακής διαχείρισης του εξοπλισμού των ΨΔ, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα και έλεγχο του δικτύου. Ενσωματώνεται με έξυπνους

μετρητές, αισθητήρες καιρού και άλλες πηγές δεδομένων, προκειμένου να παρακολουθεί και να ελέγχει την παραγωγή, τη διάθεση και τη χρήση ενέργειας. Μέσω δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, το EMS βελτιστοποιεί τις ενεργειακές ροές, υπολογίζοντας τη βέλτιστη κατανομή ενέργειας μεταξύ παραγωγών, καταναλωτών και αποθηκευτικών μέσων. Κατά συνέπεια, μειώνονται οι απώλειες, ενώ παράλληλα εξισορροπεί η προσφορά με τη ζήτηση, αντιδρώντας άμεσα σε αλλαγές κατανάλωσης ή παραγωγής ενέργειας, εξασφαλίζοντας σταθερότητα στο δίκτυο. Τέλος, προσομοιώνει διάφορα σενάρια για τη διαχείριση κρίσεων, όπως διακοπές ρεύματος ή αιχμές ζήτησης, παρέχοντας δεδομένα και προτάσεις για τη λήψη τεκμηριωμένων στρατηγικών αποφάσεων.

- **Εργαλεία ανάλυσης δεδομένων και Μηχανικής Μάθησης:** Προηγμένα εργαλεία επεξεργάζονται τα μεγάλα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες, μετρητές και άλλες πηγές για την ανίχνευση προτύπων. Επιτρέπουν την πρόβλεψη τάσεων στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διαχείρισης μέσω ανάλυσης δεδομένων που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις Ψηφιακών Διδύμων. Μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης βοηθούν το EMS να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις για βελτίωση της απόδοσης και ανίχνευση προβλημάτων.
- **Υποδομή επικοινωνίας:** Η αξιόπιστη υποδομή επικοινωνίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του εξοπλισμού των Ψηφιακών Διδύμων. Η υποδομή αυτή υποστηρίζει τη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας τον συγχρονισμό και τον συντονισμό μεταξύ των συσκευών και των συστημάτων που εμπλέκονται στις προσομοιώσεις. Δίκτυα IoT συνδέουν αισθητήρες και μετρητές μέσω πρωτοκόλλων χαμηλής ισχύος, ασφαλείας και υψηλής απόδοσης, για την προστασία των δεδομένων από απειλές, καθώς και δυνατότητα ελέγχου και ανάλυσης του συστήματος από απομακρυσμένες τοποθεσίες.

Όλα αυτά τα στοιχεία συνεργάζονται αρμονικά για να δημιουργήσουν μια εικονική αναπαράσταση των φυσικών ενεργειακών συστημάτων της έξυπνης πόλης. Η συνεργασία τους αποτελεί ένα ισχυρό οικοσύστημα παρακολούθησης, ανάλυσης και βελτιστοποίησης

των ενεργειακών ροών σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας τη διαχείριση της ενέργειας και τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων με υψηλή αποτελεσματικότητα (Li & Tan, 2023). Με την ενσωμάτωση ΑΠΕ στο συγκεκριμένο εγχείρημα και τη διαχείριση τους από τεχνολογίες ΨΔ, ενισχύεται η ενεργειακή ασφάλεια, ενώ μειώνεται η ευπάθεια στις διακυμάνσεις των τιμών και τις διακοπές εφοδιασμού εξαιτίας των πεπερασμένων ορυκτών καυσίμων, εκσυγχρονίζοντας τις υποδομές της έξυπνης πόλης.

## 5.2 Διαχείριση Αστικών Μεταφορών

Από τη δημιουργία διαδραστικών τρισδιάστατων μοντέλων για τον αστικό σχεδιασμό έως την προσομοίωση πολύπλοκων κυκλοφοριακών σεναρίων, τα Ψηφιακά Δίδυμα και η Τεχνητή Νοημοσύνη καθιερώνουν νέα πρότυπα στις μεταφορές και την αστική διακυβέρνηση, ανοίγοντας ποικίλους δρόμους για καινοτόμες λύσεις. Καθώς η αστικοποίηση και η αύξηση του πληθυσμού στις πόλεις εντείνονται, τα συστήματα μεταφορών βρίσκονται αντιμέτωπα με σοβαρές προκλήσεις, όπως η εκρηκτική αύξηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης και των τροχαίων ατυχημάτων, η επιδείνωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και η αυξημένη εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (Pandiyan et al., 2023).

Το μοντέλο ενός ΨΔ, χρησιμοποιώντας υψηλής απόδοσης διακομιστές νέφους για συγκέντρωση αστικών δεδομένων, είναι ικανό να διαχειρίζεται συστήματα μεταφοράς τα οποία διαμορφώνουν τέσσερα βασικά επίπεδα (Qian et al., 2022). Το επίπεδο αντικειμένου αποτελεί το πρώτο και περιλαμβάνει όλα τα φυσικά στοιχεία του συστήματος μεταφορών καθώς και τους εμπλεκόμενους χρήστες (οδηγοί, επιβάτες, πεζοί). Αυτά ενσωματώνουν υποδομές μεταφορών, όπως οδούς, γέφυρες, σήματα κυκλοφορίας και σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ δεν λείπουν τα οχήματα, εξοπλισμένα με αισθητήρες ταχύτητας, κατάστασης μπαταρίας, κατανάλωσης καυσίμου και δεδομένων πλοήγησης.

Παράλληλα, κάμερες κυκλοφορίας και αισθητήρες περιβάλλοντος ανιχνεύουν συμβάντα και μετρούν το φόρτο κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο. Ακολουθεί το επίπεδο επικοινωνίας, που διαθέτει ενσύρματα και ασύρματα δίκτυα διαμεσολαβητών συλλογής και μετάδοσης, σε κεντρικούς εξυπηρετητές, των δεδομένων από τους αισθητήρες του επιπέδου αντικειμένου. Ταυτόχρονα, πρωτόκολλα ασφαλείας εξασφαλίζουν την ασφάλεια και την ακεραιότητα της

επικοινωνίας, καθώς και την προστασία των ευαίσθητων δεδομένων από κυβερνοεπιθέσεις (Qian et al., 2022).

Εν συνεχεία, διατίθεται το επίπεδο εφαρμογής, που λειτουργεί ως σύνδεσμος μεταξύ του επιπέδου επικοινωνίας και των τελικών εφαρμογών. Εδώ γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων και η εξαγωγή πληροφοριών από τις πύλες του επιπέδου επικοινωνίας, τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση μοντέλων μέσω τεχνολογιών μηχανικής και βαθιάς μάθησης. Παράλληλα, η ύπαρξη αλγορίθμων βελτιστοποίησης προσδιορίζει τις βέλτιστες διαδρομές, ενώ μειώνουν τη συμφόρηση και βελτιώνουν την κατανομή ενεργειακών πόρων, συλλέγοντας τα δεδομένα και τα εκπαιδευτικά μοντέλα για πιθανή μελλοντική χρήση. Τέλος, στο επίπεδο τελικού χρήστη αξιοποιούνται τα επεξεργασμένα δεδομένα για τη βελτίωση της πλοήγησης και της λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς. Περιλαμβάνει την υποστήριξη αυτόνομων οχημάτων, τη συνεργασία με έξυπνες πόλεις και δίκτυα, και την επίτευξη στόχων όπως η μείωση του κόστους μεταφοράς, η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας και η βελτίωση της διαδικασίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Οι τελικοί χρήστες, όπως οδηγοί, πολεοδόμοι ή διαχειριστές κυκλοφορίας, μπορούν να δουν προσομοιώσεις, αναφορές και προβλέψεις μέσω γραφικών διεπαφών και να εφαρμόσουν στρατηγικές διαχείρισης ενεργειακής απόδοσης ή κυκλοφορίας (Qian et al., 2022).

Με την διαρκώς αυξανόμενη αναλογία αυτοκινήτων προς πληθυσμό και τα προβλήματα αστικών μεταφορών να πολλαπλασιάζονται, η ψηφιοποίηση και ο εκσυγχρονισμός των μεταφορών αποτελούν κυρίαρχη προτεραιότητα στις πολυπληθείς μεγαλουπόλεις. Σύμφωνα με αναφορές του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας, ο αριθμός των ετήσιων θανάτων από τροχαία ατυχήματα, παρότι ελάχιστα μειωμένος από προηγούμενες χρονιές βρίσκεται στους 1.19 εκατομμύρια για το 2023, ενώ κατά μέσο όρο στις ΗΠΑ οι άνθρωποι χάνουν 338 ώρες στη κίνηση κάθε έτος (World Health Organization, 2023). Προκειμένου λοιπόν να ελαχιστοποιηθεί σε ανεκτά επίπεδα η κατά τα άλλα αναπόφευκτη κυκλοφοριακή συμφόρηση, απαιτείται υποστήριξη από Τεχνολογικά Ευφυή Συστήματα Μεταφοράς.

Τα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS) αποτελούν προηγμένα συστήματα που αξιοποιούν τις τελευταίες τεχνολογικές καινοτομίες στη μοντελοποίηση και στη ρύθμιση της κυκλοφορίας. Στόχος τους είναι να παρέχουν στους χρήστες περισσότερες πληροφορίες, μεγαλύτερη ασφάλεια και αυξημένη διαδραστικότητα μεταξύ των χρηστών του οδικού δικτύου, συγκριτικά με τα παραδοσιακά συστήματα μεταφορών, ενώ περιλαμβάνουν και ένα



εκτεταμένο εύρος αστικών υπηρεσιών, όπως η διαχείριση της κυκλοφορίας, τα ασθενοφόρα, η πυροσβεστική, η αστυνομία κ.α (Rudskoy et al., 2021).

Ένας βασικός πυλώνας αυτών των συστημάτων είναι τα ΨΔ, τα οποία χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα για να αναλύσουν το δίκτυο μεταφορών και να προτείνουν λύσεις σε προβλήματα, όπως η βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας οχημάτων και πεζών, η βελτίωση των δημόσιων συγκοινωνιών, η κυκλοφοριακή διαχείριση, η ρύθμιση φωτεινών σηματοδοτών και η δικαιολόγηση επενδύσεων σε αστικές υποδομές. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών στρατηγικού σχεδιασμού μεταφορών με τις λύσεις ITS επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση της υπάρχουσας υποδομής μεταφορών και καθορίζει τη βέλτιστη κατεύθυνση για τη μελλοντική ανάπτυξή της (Musa et al., 2023).

Η ανάπτυξη τεχνολογιών για τη διαχείριση των συστημάτων μεταφορών στις πόλεις βρίσκεται σε εξέλιξη, ωστόσο απαιτούνται μοντέλα αναφοράς για τις υπηρεσίες ITS, τα οποία μπορούν να επιταχύνουν την εφαρμογή σχεδίων. Παρά τη σημασία του τομέα, η διαθέσιμη βιβλιογραφία δείχνει ότι το ζήτημα αυτό δεν έχει μελετηθεί επαρκώς, καθώς υπάρχει ελλειπής πληροφορία σχετικά με υπάρχοντα μοντέλα υπηρεσιών ITS και τις σχετικές πρακτικές εφαρμογές τους. Απαιτείται συστηματική και αξιόπιστη συλλογή, οργάνωση και ανάλυση δεδομένων, ώστε να παρέχονται ακριβή και έγκαιρα αποτελέσματα που θα υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την κυκλοφορία. Παράλληλα, οι καινοτόμες αυτές προσεγγίσεις πρέπει να εναρμονίζονται με τα ευέλικτα χαρακτηριστικά των έξυπνων πόλεων, διασφαλίζοντας ότι η τεχνολογία προσαρμόζεται στις ανάγκες του συνεχώς εξελισσόμενου αστικού περιβάλλοντος (Musa et al., 2023).

### 5.2.1 Αστικές Εφαρμογές του Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς

- **Ανίχνευση Περιστατικών Αστικής Μεταφοράς**

Τα ITS, βασισμένα στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων και τη Τεχνητή Νοημοσύνη, μπορούν να λειτουργήσουν ως αποτελεσματικά εργαλεία για την ανίχνευση περιστατικών που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση ανθρώπων και μηχανών. Αναλύοντας τις τροχιές τόσο των δημόσιων, όσο και των ιδιωτικών οχημάτων εντός μιας πόλης, μπορούν να εντοπιστούν κυκλοφοριακά μωτίβα, προβλήματα ροής και κρίσιμα σημεία συμφόρησης (Feng et al., 2023). Με τη χρήση δεδομένων και πληροφοριών τοποθεσίας σε πραγματικό



χρόνο, τα ITS ενημερώνουν τα κέντρα ελέγχου, διευκολύνοντας την αποτελεσματική διαχείριση των καταστάσεων που περιλαμβάνουν ατυχήματα, κυκλοφοριακή συμφόρηση ή ακόμα και απειλές για την ασφάλεια των πολιτών.

Οι πληροφορίες που συλλέγονται από τα ITS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό περιοχών προς βελτίωση, όπως η εισαγωγή νέων υποδομών, προσαρμογή των φωτεινών σηματοδοτών και για την παροχή εναλλακτικών διαδρομών στους χρήστες εντός του οδικού δικτύου, μειώνοντας τον αντίκτυπο και τη σοβαρότητα των περιστατικών. Για την επιβεβαίωση της ικανότητας ανίχνευσης αυτών των συστημάτων, ένα παρόμοιο μοντέλο εφαρμόστηκε στο σύστημα τραμ του Γκέτεμποργκ στη Σουηδία. Το παράδειγμα αυτό κατέδειξε ότι οι συσκευές ανίχνευσης περιστατικών και οι αισθητήρες συνέβαλαν σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην επαναδρομολόγηση και στη βελτίωση της διαχείρισης της κυκλοφορίας, ιδίως σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή σε ύποπτες δραστηριότητες ατόμων (Musa et al., 2023).

#### • Διαχείριση Σημάτων Κυκλοφορίας

Οι περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούνται στα Ευφυή Συστήματα Μεταφορών λειτουργούν ως ανιχνευτές, αντιμετωπίζοντας την πρόκληση της εξισορρόπησης μεταξύ της παροχής κυκλοφορίας και της χωρητικότητας του οδικού δικτύου. Η διαδικασία αυτή είναι δύσκολο να ελεγχθεί χειροκίνητα, αλλά οι επαγωγικοί ανιχνευτές ITS, τοποθετημένοι στην επιφάνεια του δρόμου, καθιστούν εφικτή την ανίχνευση κρίσιμων παραμέτρων, όπως ο όγκος κυκλοφορίας, η ουρά των ακινητοποιημένων οχημάτων και η ταχύτητα.

Με τη χρήση αυτών των δεδομένων, μπορούν να παρέχονται αυτόματα μέτρα αντιμετώπισης μέσω της σύνδεσης των ανιχνευτών με τον κεντρικό διακομιστή του κεντρικού δωματίου ελέγχου. Για την αποτελεσματική λειτουργία αυτών των συστημάτων, είναι απαραίτητο οι συσκευές επικοινωνίας να διαθέτουν πλήρη κάλυψη δικτύου, ευελιξία και ικανότητες επεξεργασίας δεδομένων ακαριαία (Feng et al., 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, οι συσκευές που αξιοποιούν την τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων συμβάλλουν καθοριστικά στη διαχείριση της κυκλοφορίας, καθώς είναι εξοπλισμένες με ισχυρούς επεξεργαστές ώστε να προσφέρουν κατάλληλους και εφικτούς χρόνους δράσης για τα σήματα κυκλοφορίας, ενώ έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να δίνουν προτεραιότητα σε οχήματα που το απαιτούν, όπως ασθενοφόρα ή σωμάτων ασφαλείας. Τέτοιες λύσεις έχουν ήδη τεθεί σε εμπορική εφαρμογή μέσω συστημάτων όπως το

Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS), το Split και το Cycle Time and Offset Optimization Technique (SCOOT) (Musa et al., 2023).

- **Διαχείριση Logistics**

Οι έξυπνες πόλεις θεωρούνται καίριες για τη βελτίωση των ενδοαστικών μεταφορών αγαθών και υπηρεσιών, που αποτελούν πυλώνα της κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης. Η αποτελεσματική διαχείριση των εμπορευματικών μεταφορών και του στόλου αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τις εταιρείες, περιλαμβάνοντας δυνατότητες όπως πρόβλεψη διαδρομών, παρακολούθηση οχημάτων, καταγραφή προελεύσεων και προορισμών, εντοπισμός εναλλακτικών διαδρομών, προγραμματισμός ταξιδιών, καθώς και διαχείριση της κατανάλωσης καυσίμου. Όλες αυτές οι λειτουργίες πραγματοποιούνται μέσω ραδιοφωνικών και δορυφορικών τεχνολογιών, με την ενσωμάτωση Ψηφιακών Διδύμων να ενισχύει ακόμη περισσότερο την ακρίβεια και την αποδοτικότητα τους. Η δυνατότητα ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, σε συνδυασμό με την οπτικοποίηση των επιχειρησιακών δεδομένων, επιτρέπει την πιο γρήγορη και ακριβή λήψη αποφάσεων (Rudskoy et al., 2021).

Λόγω των τεχνολογικών απαιτήσεων αλλά και της εξειδίκευσης που απαιτείται, τέτοιες τεχνολογίες εφαρμόζονται αποτελεσματικά σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές, όπως οι έξυπνες πόλεις, όπου το απαιτητικό περιβάλλον υποστηρίζει την υλοποίησή τους. Έρευνες έχουν δείξει ότι η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών στον τομέα των logistics προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, βοηθώντας τις εταιρείες να μειώσουν το συνολικό λειτουργικό κόστος έως και κατά 9% (Ersoy, 2015). Αυτή η εξοικονόμηση επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της μείωσης των καθυστερήσεων, της αποτελεσματικότερης χρήσης καυσίμων και της βελτιστοποίησης διαδρομών, καθιστώντας την εφαρμογή των ευφών συστημάτων διαχείρισης στόλου ένα ζωτικής σημασίας εργαλείο για τη λειτουργία των σύγχρονων αστικών κέντρων.

### 5.3 Διαχείριση Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης

Οι καταστροφές που προκαλούνται από φυσικούς κινδύνους έχουν προκαλέσει τις τελευταίες δεκαετίες ανυπολόγιστες υλικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές ζημιές και απώλειες σε αστικές υποδομές, κτίρια και ανθρώπινες περιουσίες, με τον αντίκτυπο τους να αναμένεται να κλιμακωθεί περαιτέρω στο μέλλον. Η διαχείριση φυσικών καταστροφών συγκαταλέγεται στις σημαντικότερες προκλήσεις των σύγχρονων πόλεων. Οι αυξανόμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, η πολυπλοκότητα των υποδομών και η αστικοποίηση εντείνουν την ανάγκη για καινοτόμες και αποτελεσματικές λύσεις, καθιστώντας ολοένα και πιο σημαντικό να διασφαλίζεται προστασία των πολιτών και των περιουσιακών τους στοιχείων.

Με τα Ψηφιακά Δίδυμα και τη Τεχνητή Νοημοσύνη να αναδεικνύονται ως μια υποσχόμενη ισχυρή τεχνολογία ενίσχυσης των δυνατοτήτων πρόληψης, αντιμετώπισης και αποκατάστασης πλήθους καταστροφών, η ενσωμάτωσή τους στις στρατηγικές διαχείρισης των τελευταίων, επιφέρει συνεχή βελτίωση των σχεδίων δράσης. Μέσω της αξιοποίησης δεδομένων και της εκτίμησης κινδύνου, παρέχονται πρακτικά παραδείγματα και εφαρμογές σε κρίσιμους τομείς όπως οι πλημμύρες, οι πυρκαγιές, οι σεισμοί, και οι καταιγίδες (Yu & He, 2022).

Αυτοί οι φυσικοί κίνδυνοι εξελίσσονται σε καταστροφές όταν οι άνθρωποι αποτυγχάνουν να εφαρμόσουν τις κατάλληλες ενέργειες πρόληψης και ετοιμότητας για να μετριάσουν τις επιπτώσεις τους. Η σύγχρονη τεχνολογία δεν έχει ανέλθει ακόμα σε επίπεδο που να επιτρέπει την ακριβή πρόβλεψη καταστροφών. Ωστόσο, παρέχει επαρκή εργαλεία για την υλοποίηση ενεργειών που μπορούν να μετριάσουν τις καταστροφικές συνέπειες ενός γεγονότος τόσο πριν όσο και μετά την εκδήλωσή του, μειώνοντας τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και περιουσίες (Dogan et al., 2021).

Ο κύκλος διαχείρισης κινδύνου καταστροφών διαρθρώνεται σε τρία βασικά στάδια:

1. **Πριν από την καταστροφή (Μείωση Κινδύνου):** Περιλαμβάνει δραστηριότητες πρόληψης, όπως αντιπλημμυρικά έργα, ενίσχυση κτιρίων σε σεισμογενείς περιοχές και κανονισμούς που περιορίζουν την ανεξέλεγκτη δόμηση σε επισφαλείς ζώνες. Με χρήση ΨΔ, μοντελοποιούνται και προβλέπονται πιθανά σενάρια, ενώ εκπαιδεύεται ο πληθυσμός με σκοπό τη μείωση των επιπτώσεων πιθανών καταστροφών μέσω δημιουργίας σχεδίων εκκένωσης, η οργάνωσης ασκήσεων ετοιμότητας. Το στάδιο

αυτό εξελίσσεται συνήθως σε ημέρες ή εβδομάδες (Ariyachandra & Wedawatta, 2023b).

2. **Κατά τη διάρκεια της καταστροφής:** Εστιάζει στη συντονισμένη αντιμετώπιση της κρίσης μέσω δράσεων διάσωσης και ανακούφισης, παροχής πρώτων βοηθειών, ταχείας εκκένωσης των πληγέντων περιοχών και διαχείρισης επειγουσών καταστάσεων. Τα συστήματα ITS και τα ΨΔ, μπορούν να προσφέρουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τον εντοπισμό πληγείσων περιοχών και τη διαχείριση πόρων.
3. **Μετά την καταστροφή (Ανάκαμψη):** Περιλαμβάνει διαδικασίες έγκαιρης αποκατάστασης και ανάπτυξης για την επιστροφή σε φυσιολογικές συνθήκες, οι οποίες εξελίσσονται σε μήνες ή χρόνια, όπως ανοικοδόμηση κατεστραμμένων υποδομών, παροχή ψυχολογικής υποστήριξης στα θύματα και οικονομική αποκατάσταση των πληγείσων περιοχών (Ariyachandra & Wedawatta, 2023b).

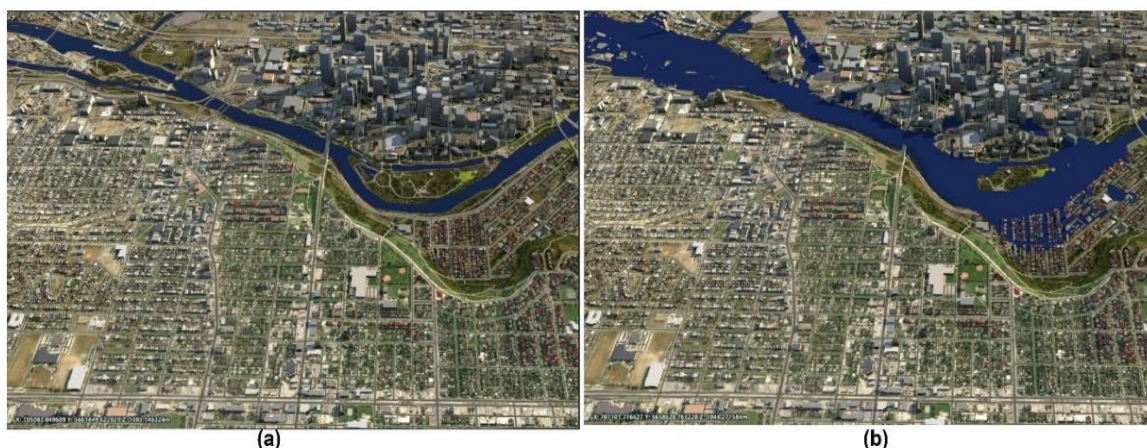
### 5.3.1 Αντιμετώπιση Πλημμύρας

Οι πλημμύρες αποτελούν έναν από τους πιο διαδεδομένους και καταστροφικούς φυσικούς κινδύνους παγκοσμίως, προκαλώντας περισσότερες ζημιές από οποιοδήποτε άλλο ακραίο καιρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με την παγκόσμια έκθεση αξιολόγησης φυσικών καταστροφών του 2020, οι πλημμύρες ήταν ο συχνότερος τύπος φυσικής καταστροφής παγκοσμίως, με 193 καταγεγραμμένα περιστατικά που επηρέασαν 201 χώρες (Loh & Bellam, 2024; Motogaito et al., 2023).

Ιδιαίτερως οι πόλεις που βρίσκονται σε παράκτιες χερσαίες περιοχές χαμηλού υψομέτρου, αντιμετωπίζουν αυξανόμενη ευπάθεια στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, με την κατάσταση να επιδεινώνεται λόγω της πολυπληθούς αστικοποίησης σε αυτές τις ζώνες. Περίπου το 38,4% του πληθυσμού της Ευρώπης διαμένει σε απόσταση μικρότερη των 50 χιλιομέτρων από τη Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία αποτελεί μια από τις πιο πυκνοκατοικημένες περιοχές της Ευρώπης.

Ετησίως, από 0,1 έως 1,3 εκατομμύρια άτομα που κατοικούν στις παράκτιες αυτές περιοχές βρίσκονται σε κίνδυνο από ξαφνικές πλημμύρες ή έντονες βροχοπτώσεις, γεγονός που συνεπάγεται οικονομικές απώλειες ύψους περίπου 1 δισεκατομμυρίου ευρώ σε υποδομές,

υλικές ζημιές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Μεγάλες παράκτιες πλημμύρες έχουν πλήξει την Ιταλία το 2009, την Ελλάδα το 2013, την Ισπανία το 2015/2016 και την Πορτογαλία το 2020 (Ciampa et al., 2021).



Εικόνα 5. Ψηφιακή δίδυμη οπτικοποίηση πόλης. Πανοραμική όψη τμήματος της πόλης πριν από πλημμύρα (α), πανοραμική όψη ίδιου τμήματος της πόλης μετά από πλημμύρα (β) (Gaur et al., 2018)

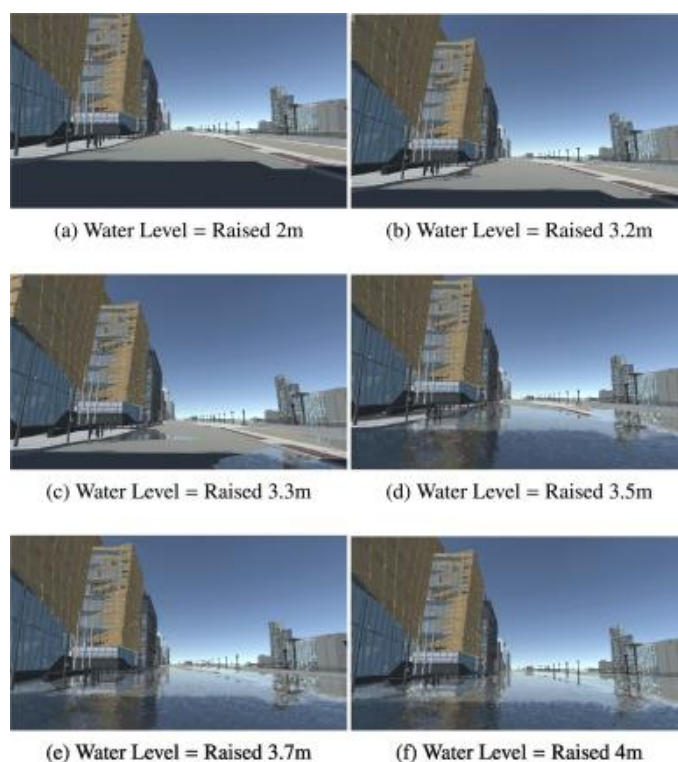
Για την ελαχιστοποίηση των ζημιών που προκαλούνται από ακραία κλιματικά φαινόμενα επομένως, τα οποία λόγω της κλιματικής αλλαγής επιφέρουν καταρρεύσεις φραγμάτων, υπερχειλίσσεις ποταμών και θαλασσών, ή αδυναμία των αδιαπέραστων επιφανειών να απορροφήσουν τη ποσότητα του συσσωρευμένου νερού, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης. Ιδανικά, τέτοια συστήματα θα πρέπει να παρέχουν ακριβείς και επικαιροποιημένες πληροφορίες σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη, ειδοποιώντας τα πριν επέλθουν οι καταστροφές και επιτρέποντας στους αρμόδιους φορείς να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά και έγκαιρα, συμβάλλοντας έτσι στην προστασία των κοινοτήτων.

Η τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων αρχίζει να υιοθετείται από ορισμένες πόλεις, έχοντας ως πρωταρχικό μέλημα τη πρόληψη από εκτεταμένες φυσικές καταστροφές καθώς και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας των υφιστάμενων αστικών υποδομών τους. Οι ακριβείς προσομοιώσεις μιας αστικής πλημμύρας βασίζονται σε λεπτομερείς τρισδιάστατες πληροφορίες κτιρίων και εδάφους, με τις συχνότερα χρησιμοποιούμενες πλατφόρμες, Unity3D και Unreal Engine 5, να επιτρέπουν την ενσωμάτωση ενός τρισδιάστατου αστικού ψηφιακού μοντέλου. Το τελευταίο, περιλαμβάνει ακριβή δεδομένα για το υψόμετρο των δρόμων της πόλης, τα δίκτυα ηλεκτροδότησης και όμβριων υδάτων, τις εγκαταστάσεις



αποχέτευσης και τις υδάτινες γραμμές (Gaur et al., 2018). Αυτό δίνει τη δυνατότητα δυναμικής απεικόνισης της μεταβολής της στάθμης του νερού, υποδεικνύοντας τις περιοχές που είναι πιο πιθανό να πληγούν πρώτες από έντονες βροχοπτώσεις ή την υπερχειλίση ενός ποταμού. Με τον τρόπο αυτό βοηθούνται οι μητροπολιτικές αρχές στο να καθορίσουν τα σημεία τοποθέτησης σάκων άμμου ή κατασκευής αναχωμάτων και τις περιοχές που πρέπει να εκκενωθούν κατά προτεραιότητα.

Επιπλέον, δεδομένα που συλλέγονται από την υποδομή της έξυπνης πόλης, όπως τα επίπεδα των ποταμών και η ποσότητα βροχόπτωσης, μπορούν να ενσωματωθούν στο Ψηφιακό Δίδυμο, δημιουργώντας ένα χρονοδιάγραμμα εκτίμησης για πιθανή επερχόμενη πλημμύρα, με τις πληροφορίες αυτές να επιστρέφονται στην έξυπνη πόλη για την άμεση ενημέρωση των πολιτών. Ιστορικά δεδομένα από την εκάστοτε πόλη μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν για τη διαμόρφωση μακροπρόθεσμων στρατηγικών πρόληψης πλημμυρών, αν εντοπιστεί ότι οι πλημμύρες αποτελούν συχνό ζήτημα σε μια χώρα ή περιοχή. Παραδείγματα τέτοιων στρατηγικών περιλαμβάνουν την κατασκευή δεξαμενών αποθήκευσης νερού ή την εκτροπή ποταμών σε περιπτώσεις εκτάκτου ανάγκης (Mankowski, 2020).



Εικόνα 6. Αστική προσομοίωση πλημμύρας (G. White et al., 2021b)

Στις Εικόνες 5 και 6 παρουσιάζεται μια ψηφιακή προσομοίωση πλημμύρας του ποταμού Λίφι, ο οποίος διασχίζει την καρδιά της Ιρλανδικής πρωτεύουσας, το Δουβλίνο, με σκοπό τον εντοπισμό των περιοχών που είναι πιο πιθανό να πληγούν από την υπερχειλίση του. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει τον ακριβή εντοπισμό πεζόδρομων και δρόμων που ενδέχεται να καταστούν απρόσιτοι για πεζούς και οχήματα σε περίπτωση πλημμύρας, προκαλώντας σημαντικές αλλαγές στα μοτίβα κίνησης της πόλης. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο κυρίως για μονόδρομους ή στενούς δρόμους, όπου υπάρχει κίνδυνος τα οχήματα να παγιδευτούν χωρίς δυνατότητα αλλαγής πορείας (G. White et al., 2021b).

Το μοντέλο αυτό μπορεί να περιλαμβάνει, πέραν από τη βροχόπτωση και τα επίπεδα στάθμης του νερού, ρεύματα, συστήματα αποστράγγισης και αποχέτευσης καθώς και πιθανά φερτά υλικά εντός των κοιτών του ποταμού. Με σκοπό την ακρίβεια της ψηφιακής δίδυμης προσομοίωσης, το μοντέλο επικυρώνεται μέσω δεδομένων και ιστορικών στοιχείων για προηγούμενες πλημμύρες από το Γραφείο Δημοσίων Έργων, επιτρέποντας την αξιολόγηση των βροχοπτώσεων σε μία περιοχή και κατατάσσοντάς τις σε ειδικές κλίμακες ανάλογα τη σοβαρότητα των φαινομένων (G. White et al., 2021b).

Ένα Ψηφιακό Δίδυμο για την αντιμετώπιση πλημμύρων, το οποίο δημιουργείται μέσω της ένταξης, σε αστικό επίπεδο, ενός τρισδιάστατου Μοντέλου Πλέγματος Πραγματικότητας (ΜΠΠ), καθίσταται ικανό να προσομοιώσει, να οπτικοποιήσει και να αναλύσει αποτελεσματικά τα σχετικά δεδομένα. Η δημιουργία ενός ΜΠΠ υψηλής ανάλυσης επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης επικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών από drones και εικόνων σε επίπεδο εδάφους, εμπλουτισμένων όπου απαιτείται με σαρώσεις λέιζερ, δημιουργώντας ακριβή ψηφιακά δεδομένα εδάφους που αποτελούν θεμέλιο για κάθε υδρολογική προσομοίωση (Mankowski, 2020).

Ακολούθως, δημιουργείται ένα μοντέλο ανθεκτικότητας στις πλημμύρες, βασισμένο στη δημιουργία ενός υπολογιστικού πλέγματος για την περιοχή ενδιαφέροντος, εμπλουτισμένο με ακριβείς πληροφορίες από τα λογισμικά προσομοίωσης πλημμύρας. Διηθήσεις και επιφανειακές ή υπόγειες απορροές υδάτων, διαμορφώνουν ένα δυναμικά οπτικορεαλιστικό περιβάλλον για την προβολή των προσομοιώσεων.

Τα ψηφιακά μοντέλα ανθεκτικότητας στις πλημμύρες υποστηρίζουν ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων που σχετίζονται με την πρόληψη, την ανάλυση, και τη διαχείριση αυτών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της έκτασης των πλημμύρων που



προκαλούνται από ποτάμια ή παράκτιες περιοχές, τη δοκιμή της ανεκτικότητας των υποδομών και την εκτίμηση των ισχυουσών στρατηγικών διαχείρισης γης σε τομείς που πλήττονται από υπερχειλίσσεις (Mankowski, 2020).

Μία από τις βασικές εφαρμογές αυτών των μοντέλων είναι η προσομοίωση υποθετικών σεναρίων ("what-if"), που παρουσιάζουν τις επιπτώσεις των πλημμυρών σε κατοικίες, οδικά δίκτυα και υποδομές. Μέσω αυτών των προσομοιώσεων, είναι εφικτός ο προσδιορισμός των κινδύνων πλημμύρας υπό τις τρέχουσες συνθήκες, καθώς και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων μέτρων μετριασμού των επιπτώσεων. Εξετάζονται έτσι η συμπεριφορά του φυσικού διδύμου σε διαφορετικά πιθανά σενάρια και αναπτύσσονται αποτελεσματικότερες στρατηγικές πρόληψης και αντιμετώπισης, όπως η βελτίωση του αποχετευτικού συστήματος, η εγκατάσταση φραγμάτων, ή η αλλαγή της χρήσης γης σε περιοχές υψηλού κινδύνου (Mankowski, 2020).

Η οπτική παρουσίαση αξιοποιήσιμων δεδομένων επομένως, επιτρέπει στους εμπλεκόμενους φορείς να λαμβάνουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις, προτού προχωρήσουν σε δαπανηρές ενέργειες σχεδιασμού ή κατασκευής. Έτσι, τα Ψηφιακά Δίδυμα παρέχουν μια μοναδική ευκαιρία για τις πόλεις να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα των δημοτικών υποδομών και να υιοθετήσουν προληπτικές στρατηγικές για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας σε απρόοπτες φυσικές καταστροφές (Ghaith et al., 2021).

### 5.3.2 Διαχείριση Σεισμικών Δονήσεων

Οι σεισμοί αποτελούν αιφνίδια καταστροφικά φυσικά φαινόμενα, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από την απότομη εκδήλωσή τους, προκαλώντας εκτεταμένες ζημιές και σοβαρές δευτερογενείς επιπτώσεις. Συμβαίνουν ως αποτέλεσμα της εκλυόμενης ενέργειας που παράγεται από τη συμπίεση και την κίνηση των τεκτονικών πλακών στην επιφάνεια της Γης και ανάλογα με τη διάρκεια και το μέγεθος της κίνησης τους μπορούν να προξενήσουν καταρρεύσεις κτιρίων, απώλειες ανθρώπινων ζωών, καταστροφή υποδομών και κοινοτική αναστάτωση (Samasti & Altan, 2024). Η σεισμική δόνηση των 7.0 ρίχτερ στην Αϊτή το 2010, είχε ως συνέπεια περίπου 300.000 νεκρούς και αγνοούμενους, αφήνοντας περισσότερους από 1 εκατομμύριο ανθρώπους χωρίς στέγη με το 80-90% των κατοικιών να κρίνονται ακατάλληλες για χρήση. Παρόμοιου βεληνεκούς ήταν και ο σεισμός 9.2 ρίχτερ εντός του

Ινδικού ωκεανού το 2004, ο οποίος προκάλεσε τσουνάμι ύψους 30 μέτρων, πλήττοντας τα παράκτια της Ινδονησίας, στερώντας τη ζωή σε 228.000 ανθρώπους (Foundation, 2005).

Η ανάλυση και η πρόβλεψη σεισμών για έξυπνες πόλεις είναι ζωτικής σημασίας, καθώς όλες οι κρίσιμες υποδομές, όπως τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, οι πηγές πόσιμου νερού, οι υπηρεσίες υγείας, οι μεταφορές και το ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν να επηρεαστούν, διαταράσσοντας τη κοινωνικοοικονομική ισορροπία της περιοχής. Τα πιο διαδεδομένα και δοκιμασμένα συστήματα διαχείρισης τους αποτελούν τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης σεισμών (EWS) όπως το ShakeAlert, τα οποία βασίζονται κυρίως σε αισθητήρες (σεισμόμετρα, επιταχυνσόμετρα) που τοποθετούνται περιμετρικά της περιοχής ενός επισφαλούς οικισμού, με αποστάσεις περίπου 10 χιλιομέτρων μεταξύ τους, λειτουργώντας μέσω της ανίχνευσης των πρώτων σεισμικών κυμάτων (P-waves) (Samasti & Altan, 2024).

Τα δεδομένα που συλλέγονται μεταφέρονται σε ένα κεντρικό υπολογιστικό σύστημα μέσω γρήγορων δικτύων επικοινωνίας IoT όπου, επεξεργάζοντάς τα μέσω εξειδικευμένων αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης, υπολογίζει την ένταση, τη θέση και τον πιθανό χρόνο άφιξης των σεισμικών κυμάτων σε διάφορες περιοχές. Έτσι, προειδοποιούνται οι κάτοικοι εγκαίρως, μειώνοντας σημαντικά την πιθανότητα απώλειας ζωής και περιουσίας, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να εκκενωθούν μη ασφαλή κτίρια, να παύσει η μεταφορά φυσικού αερίου μέσω αγωγών, να διακοπεί η λειτουργία πυρηνικών εργοστασίων κ.α (Strauss & Allen, 2016).

Η εφαρμογή των ΨΔ στην αντισεισμική μηχανική προσφέρει τη δυνατότητα για πιο αποτελεσματική ανάλυση, παρακολούθηση και βελτίωση των υποδομών, συμβάλλοντας στην καλύτερη προετοιμασία και απόκριση σε σεισμικά φαινόμενα, ενώ βελτιώνονται επαναληπτικά και οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων σε ολόκληρη τη διαδικασία διαχείρισης καταστροφών. Παράλληλα, τα σύγχρονα τεχνολογικά μέσα έχουν αναπτύξει σημαντικές δυνατότητες υποβοήθησης της άκρως απαραίτητης μετασεισμικής επιθεώρησης κτιρίων μέσα από την αυτόματη εικονική ανίχνευση δομικών ανωμαλιών, προκειμένου να αξιολογηθεί το επίπεδο της ζημιάς του δομικού συστήματος (Levine & Spencer, 2022).

Πιο συγκεκριμένα, οι ειδικοί προτείνουν ένα αυτοματοποιημένο πλαίσιο Ψηφιακού Διδύμου για τη μετασεισμική αξιολόγηση κτιρίων, το οποίο συνδυάζει εικόνες από μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) για αναγνώριση δομικών στοιχείων και εκτίμηση ζημιών με τη χρήση ενός Μοντέλου Πληροφοριών Κτιρίου (BIM) ως πλατφόρμα αναφοράς. Οι ερευνητές

έχουν συνδυάσει το BIM με φωτογραφικές έρευνες για την παρακολούθηση της προόδου κατασκευής, δημιουργώντας τρισδιάστατες αναπαραστάσεις από φωτογραφίες ευθυγραμμισμένες με το γεωμετρικό πλαίσιο αναφοράς του BIM, παρέχοντας τη δυνατότητα αξιολόγησης στοιχείων όπως η γεωμετρική συμμόρφωση με το σχέδιο ή η τήρηση του χρονοδιαγράμματος κατασκευής (Spencer et al., 2019).

Με παρόμοιο τρόπο, το BIM μπορεί να αξιοποιηθεί για μετασεισμική επιθεώρηση, λειτουργώντας ως αποθήκη δεδομένων, προκειμένου να παρέχει γεωμετρικό πλαίσιο αναφοράς για εικόνες UAV και να οργανώνει αποτελεσματικά ταξινομώντας δομικά στοιχεία καθώς και επικαλύπτοντας δεδομένα BIM σε φωτογραφίες. Ωστόσο, παρά τις δυνατότητές του, το BIM δεν είναι από μόνο του προγνωστικό. Για να γίνει δυνατή η πρόβλεψη των συνολικών ζημιών και της μελλοντικής απόδοσης του κτιρίου, το BIM και η οπτική ανάλυση πρέπει να συνδυαστούν με ένα αναλυτικό μοντέλο του κτιρίου.

Έτσι, τα δεδομένα που συλλέγονται από τα UAVs ενσωματώνονται σε υπάρχοντα BIM μοντέλα, δημιουργώντας ενημερωμένα ΨΔ που αντικατοπτρίζουν την τρέχουσα κατάσταση των κτιρίων μετά τον σεισμό, με τις επιθεωρήσεις να μπορούν να γίνονται εξ αποστάσεως, μειώνοντας τον κίνδυνο για τους μηχανικούς και τους διασώστες σε περίπτωση που εργάζονται σε επικίνδυνες περιοχές (Levine & Spencer, 2022).

Έχοντας συλλέξει τις εξωτερικές εικόνες κάθε στοιχείου ενός επηρεασμένου κτιρίου και συγκρίνοντάς τις με τα προσεισμικά BIM μοντέλα επιτρέποντας την ανίχνευση μετατοπίσεων, ρωγμών ή καταρρεύσεων, ενεργοποιούνται τεχνικές υπολογιστικής όρασης για τον αυτόματο εντοπισμό ζημιών στην εξωτερική επιφάνεια του κτιρίου. Ειδικοί αλγόριθμοι εφαρμόζουν διαδικασίες επεξεργασίας εικόνας για να ανιχνεύσουν βλάβες όπως ρωγμές στο σκυρόδεμα, εκτεθειμένο οπλισμό και θρυμματισμό υλικών, ενώ σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις περιλαμβάνουν τη χρήση συνελκτικών νευρωνικών δικτύων που έχουν επιτύχει να αναγνωρίζουν αυτόματα τόσο τη φύση της ζημιάς όσο και τον τύπο του δομικού στοιχείου (Zhang & Burton, 2019).

Η ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως τα Ψηφιακά Δίδυμα, τα Μοντέλα Πληροφοριών Κτιρίου (BIM) και τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), στην αντισεισμική μηχανική και τη μετασεισμική αξιολόγηση υποδομών, αναδεικνύει έναν νέο τρόπο αντιμετώπισης των προκλήσεων που σχετίζονται με το φυσικό αυτό φαινόμενο. Η διεπιστημονική συνεργασία και η επένδυση σε τέτοιες καινοτόμες λύσεις αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη μείωση των επιπτώσεων των σεισμών, την ενίσχυση της

ανθεκτικότητας των υποδομών και τη διασφάλιση της ανθρώπινης ζωής σε μια εποχή αυξανόμενων φυσικών καταστροφών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Μελέτες Περιπτώσεων Υφιστάμενων ΨΔ-Έξυπνων Πόλεων

Η ανάπτυξη Έξυπνων Πόλεων αποτελεί ένα από τα πιο μεγαλεπήβολα εγχειρήματα της σύγχρονης αστικής στρατηγικής, με στόχο την αναβάθμιση του βιοτικού επιπέδου, την αύξηση της ανθεκτικότητας και την αποδοτική διαχείριση των αποθεμάτων. Δεδομένου ότι μέχρι το έτος 2050, ο πληθυσμός που κατοικεί στις πόλεις αναμένεται να αυξηθεί στο ποσοστό του 68%, με το 90% της αύξησης αυτής να επικεντρώνεται σε Αφρική, Κίνα και Μέση Ανατολή (Ritchie et al., 2024), εκτείνονται οι ανάγκες για αποτελεσματική αστική διαχείριση και βιώσιμες υποδομές. Η ενσωμάτωση της σύγχρονης τεχνολογίας στα αστικά περιβάλλοντα, όπως οι αισθητήρες, τα Μεγάλα Δεδομένα, η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Ψηφιακά Δίδυμα, έχουν δημιουργήσει τις προϋποθέσεις για τη μετάβαση σε πόλεις που χαρακτηρίζονται από τις έξυπνες λύσεις τους σε τομείς όπως η υγεία, οι μεταφορές, η ενέργεια και η διαχείριση υποδομών.

#### 6.1 Σιγκαπούρη, Ασία

Η “Εικονική Σιγκαπούρη” (Virtual Singapore) είναι ένα πρωτοποριακό τρισδιάστατο έργο Ψηφιακού Διδύμου που αναπτύχθηκε από την κυβέρνηση της Σιγκαπούρης σε συνεργασία με την εταιρεία λογισμικού Dassault Systèmes. Αποτελεί μια από τις πιο προηγμένες εφαρμογές ΨΔ παγκοσμίως και λειτουργεί ως δυναμικό, τρισδιάστατο και διαδραστικό μοντέλο της πόλης, ενσωματώνοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για υποστήριξη λήψης αποφάσεων, προσομοίωση σεναρίων και βελτιστοποίηση αστικών υπηρεσιών. Αποτελεί την πιο έξυπνη πόλη της Ασίας και την πέμπτη παγκοσμίως, ενώ κατέχει το πρώτο Ψηφιακό Δίδυμο σε επίπεδο χώρας με την δημιουργία του να προκύπτει κυρίως για δύο λόγους. Αρχικά, εξαιτίας των ισχυρών βροχοπτώσεων, οι οποίες καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους 2011 προκάλεσαν στο νησί εννιά καταστροφικές πλημμύρες, καθώς και εξαιτίας του πληθυσμού του, ο οποίος ανέρχεται σε πάνω από ένα εκατομμύριο κατοίκους, καθιστώντας την το τρίτο πιο πυκνοκατοικημένο έθνος στον κόσμο (Walker, 2023).

Για τους παραπάνω λόγους, η Αρχή Διαχείρισης Γης της Σιγκαπούρης (SLA), ένας οργανισμός υπαγόμενος στο Υπουργείο Δικαιοσύνης, με βασική του επιδίωξη τη

βελτιστοποίηση των πόρων Γης για την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη της νησιωτικής χώρας, μαζί με το Εθνικό Ίδρυμα Ερευνών (NRF), άρχισε το 2014 ένα εθνικό πρόγραμμα κατασκευής ενός λεπτομερούς τρισδιάστατου χάρτη της χώρας (Walker, 2023). Το πρόγραμμα αυτό, αξίας 73 εκατομμυρίων δολαρίων, εξελίσσεται, σε συνεργασία με το λογισμικό που παρέχεται από την Bentley Systems, στην ανάπτυξη ενός ΨΔ, εντάσσοντας στην χαρτογράφηση το πρώτο αεροσκάφος σάρωσης λέιζερ, από το οποίο συγκέντρωσε 3 εκατομμύρια πανοραμικές φωτογραφίες συνολικής χωρητικότητας 25 Terabyte δεδομένων.

Λίγο αργότερα, το ίδιο σύστημα λέιζερ εντάχθηκε σε οχήματα προκειμένου τα απορροφούμενα δεδομένα να συμπληρώσουν τις αεροφωτογραφίες σε επίπεδο εδάφους (Weger, 2022). Έτσι, καταγράφονται με χαρακτηριστική λεπτομέρεια όλες οι πληροφορίες εδάφους, δρόμων και υποδομών, όπως η υφή των υλικών γεωμετρικών αντικειμένων, βλάστηση, υδάτινα σώματα, υποδομές μεταφορών κ.λπ, ενώ στα κτιριακά μοντέλα κωδικοποιούνται τα συστατικά στοιχεία και η γεωμετρία μιας εγκατάστασης, όπως τοίχοι, δάπεδα και οροφές.



*Εικόνα 7. Ψηφιακή αναπαράσταση υποδομών εικονικής Σιγκαπούρης (Walker, 2023)*

Με τον τρόπο αυτό, οι ερευνητές είναι σε θέση να πραγματοποιούν εικονικά πειράματα μέσω της πλατφόρμας Virtual Singapore, όπως για παράδειγμα να εντοπίσουν σε μια επιλεγμένη περιοχή όλες τις επιφάνειες στέγης κτιρίων συγκεκριμένου ύψους, καθώς και όλες εκείνες με καθορισμένο προσανατολισμό, ώστε να μπορέσει να υπολογιστεί η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας του δέχονται. Αυτό θα επέτρεπε τον υπολογισμό της ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί έπειτα από την εγκατάσταση ηλιακών συλλεκτών στα συγκεκριμένα κτίρια (GOVTEC, 2017).

Ορισμένοι τομείς στους οποίους η Σιγκαπούρη έχει επενδύσει ώστε να τοποθετηθεί στη πρώτη θέση της λίστας των παγκόσμιων έξυπνων πόλεων για το 2019 είναι οι εξής:

## **1. Αστικές Μεταφορές**

Η Σιγκαπούρη διαθέτει ένα από τα πιο εξελιγμένα δίκτυα δημόσιων μεταφορών παγκοσμίως, κυρίως χάρη στην εκτεταμένη αξιοποίηση της τεχνολογίας. Στρατηγικά, η Σιγκαπούρη επιδιώκει να αξιοποιήσει τον περιορισμένο διαθέσιμο χώρο της πόλης-κράτους με τον βέλτιστο τρόπο, εισάγοντας πιο αποδοτικά, αξιόπιστα και ασφαλή οχήματα, καθώς και αναβαθμισμένα συστήματα και μεθόδους μεταφορών. Το δίκτυο δημόσιων συγκοινωνιών της περιλαμβάνει ταξί, λεωφορεία και τρένα, τα οποία συνδυάζονται αρμονικά μέσω προηγμένων συστημάτων έκδοσης εισιτηρίων, όπως η κάρτα EZ-Link, ενώ τα αυτόνομα οχήματα και τα drones φαίνεται να διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο σε αυτά τα έργα (Mehta et al., 2019). Το 2016, εισήχθη ένα πιλοτικό πρόγραμμα για αυτόνομα ταξί, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να τα καλούν μέσω μιας ειδικά σχεδιασμένης εφαρμογής για κινητές συσκευές, καθώς επίσης έχει δοκιμαστεί με επιτυχία η χρήση drones για επιτήρηση ασφαλείας και παρακολούθηση πλήθους.

Παράλληλα, αξιοσημείωτο είναι το σιδηροδρομικό σύστημα Mass Rapid Transit (MRT) της Σιγκαπούρης, με πάνω από 200 χιλιόμετρα διαδρομής και 119 σταθμούς. Εξυπηρετεί καθημερινά πάνω από 3 εκατομμύρια επιβάτες και ξεχωρίζει για την αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του. Ενσωματώνει προηγμένες τεχνολογίες, οι οποίες μέσω της αναλυτικής ψηφιακής δίδυμης αστικής πλατφόρμας, υποστηρίζουν τον αυτόματο έλεγχο τρένων, έξυπνα συστήματα σηματοδότησης και οθόνες πληροφόρησης επιβατών σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες παρέχουν δεδομένα σχετικά με τις αφίξεις και τις αναχωρήσεις τους. Αυτές οι καινοτομίες όχι μόνο διευκολύνουν τον προγραμματισμό των ταξιδιών των επιβατών, αλλά συμβάλλουν και στη μείωση του συνωστισμού στους σταθμούς (Goyal, 2023).

## **2. Ενέργεια και διαχείριση αποβλήτων**

Η Σιγκαπούρη διαθέτει ορισμένα από τα πιο ενεργειακά αποδοτικά κτίρια παγκοσμίως, αξιοποιώντας καινοτόμα δομικά υλικά, συστήματα ενεργειακής απόδοσης και προηγμένες τεχνολογίες συλλογής και αποθήκευσης αυτής, θέτοντας ως στόχο το 80% των κτιρίων της πόλης να είναι “πράσινα” μέχρι το έτος 2030 (Loh & Bellam, 2024). Η υιοθέτηση οικολογικά αειφόρων κτιρίων δεν αφορά μόνο την περιβαλλοντική ευθύνη, αλλά αποτελεί και μια διορατική στρατηγική κίνηση. Τα κτίρια αυτά είναι πιο ενεργειακά αποδοτικά από τα



παραδοσιακά και προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση στα λειτουργικά έξοδα μακροπρόθεσμα. Ένα από τα πιο εντυπωσιακά παραδείγματα ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων στη Σιγκαπούρη αποτελεί το ξενοδοχειακό συγκρότημα Marina Bay Sands, το οποίο εφαρμόζει μια σειρά από τεχνολογίες, όπως η συλλογή όμβριων υδάτων και ενεργειακά αποδοτικά συστήματα φωτισμού, για να μειώσει τις περιβαλλοντικές του επιπτώσεις. Επιπλέον, οι τρεις πύργοι του διαθέτουν ένα σύστημα που ανακτά και ανακυκλώνει τη θερμότητα από τις μονάδες κλιματισμού, αξιοποιώντας την για τη θέρμανση του νερού στις πισίνες του ξενοδοχείου (Goyal, 2023).

Επιπροσθέτως, δεδομένα όπως η επιφάνεια των στεγών, το ύψος των κτιρίων και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι προσβάσιμα στο πρόγραμμα “Εικονική Σιγκαπούρη”, δίνουν τη δυνατότητα στους πολεοδόμους να αξιολογήσουν ποια κτίρια παρουσιάζουν αυξημένες προδιαγραφές για παραγωγή ηλιακής ενέργειας και συνεπώς, είναι καταλληλότερα για την προσαρμογή ηλιακών συλλεκτών. Επιπλέον, με τη χρήση προηγμένων αναλύσεων, οι σχεδιαστές μπορούν να υπολογίσουν την ποσότητα ηλιακής ενέργειας που μπορεί να παραχθεί ημερησίως, καθώς και την αντίστοιχη εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Με τις μεθόδους αυτές, η κατανάλωση ενέργειας έχει μειωθεί κατά 20% (Demirel, 2023).

Το έργο Virtual Yuhua έδειξε ότι η διασταύρωση αυτών των στοιχείων με ιστορικά δεδομένα από γειτονικά κτίρια μπορεί να επικυρώσει τα αποτελέσματα και να προσαρμόσει τις προβλέψεις, λαμβάνοντας υπόψη εποχιακές διακυμάνσεις για ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια. Έως το 2065, η Σιγκαπούρη στοχεύει να έχει το 50% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ενώ στο πεδίο της διαχείρισης υδάτων, η χώρα έχει κατασκευάσει εγκαταστάσεις αφαλάτωσης και ανακύκλωσης νερού, με στόχο να εξασφαλίσει έως το 30% των υδάτινων αναγκών της πόλης.

Όσον αφορά την διαχείριση των αστικών απορριμμάτων, έχει αναπτυχθεί το Εθνικό Πρόγραμμα Ανακύκλωσης, το οποίο προτρέπει τους κατοίκους να συμμετέχουν ενεργά στην ανακύκλωση και κομποστοποίηση των αποβλήτων τους, στοχεύει να επιτύχει ποσοστό ανακύκλωσης 70% έως το 2030 (Shmelev & Shmeleva, 2019).

Η Σιγκαπούρη ακόμα, αποτελεί μια από τις πρώτες πόλεις που υιοθετεί καινοτόμο προσέγγιση στη διαχείριση απορριμμάτων, αποφεύγοντας τους παραδοσιακούς χώρους υγειονομικής ταφής. Αντ' αυτού, έχει δημιουργήσει μια μονάδα ενεργειακής αξιοποίησης αποβλήτων, η οποία μετατρέπει τα απορρίμματα σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μονάδα αποτέφρωσης, ονόματι Tuas South, η μεγαλύτερη του είδους της στον κόσμο, μειώνει τον

όγκο των απορριμμάτων κατά 90% και παράγει ικανοποιητική ενέργεια για να καλύψει τις απαιτήσεις άνω των 60.000 κατοικιών (Goyal, 2023).

### **3. Δημόσια ασφάλεια και υγειονομική περίθαλψη**

Η Σιγκαπούρη είναι παγκοσμίως γνωστή για τα χαμηλά ποσοστά εγκληματικότητας ετησίως, με την αξιοποίηση της τεχνολογίας να αποτελεί βασικό παράγοντα στη διατήρηση της δημόσιας ασφάλειας. Ένα από τα πιο εκτεταμένα συστήματα που χρησιμοποιεί είναι το δίκτυο κλειστού κυκλώματος τηλεόρασης (CCTV), το οποίο περιλαμβάνει περισσότερες από 100.000 κάμερες παρακολούθησης δημόσιων χώρων σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, η Σιγκαπούρη έχει επενδύσει σε συστήματα αναγνώρισης προσώπου και βιομετρικές τεχνολογίες, τα οποία βοηθούν στον εντοπισμό και την παρακολούθηση πιθανών απειλών. Για παράδειγμα, η πόλη-κράτος έχει αναπτύξει ένα σύστημα που εντοπίζει εάν ένα άτομο φοράει μάσκα, διευκολύνοντας έτσι τον έγκαιρο εντοπισμό κινδύνων σε δημόσιους χώρους (Goyal, 2023).

Ακόμη, το ΨΔ διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στον σχεδιασμό ανθεκτικότητας και στη διαχείριση καταστροφών. Παρέχει τη δυνατότητα στις αρχές να προσομοιώνουν και να σχεδιάζουν διαφορετικά σενάρια καταστροφών, όπως σεισμούς, πλημμύρες ή πανδημίες. Μέσα από την κατανόηση της διαδικασίας με την οποία μπορεί να επηρεαστεί η πόλη υπό διάφορες συνθήκες, δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης στρατηγικών ανθεκτικότητας και βελτίωσης των σχεδίων διαχείρισης έκτακτης ανάγκης που στοχεύουν στη ασφάλεια των πολιτών και στη μείωση των επιπτώσεων μελλοντικών καταστροφών (Stone, 2024).

Τέλος, διακρίνεται για ένα από τα πιο εξελιγμένα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης παγκοσμίως, βασιζόμενο στην τεχνολογία και την καινοτομία. Η τηλεϊατρική έχει διευρύνει σημαντικά την πρόσβαση στις ιατρικές υπηρεσίες, επιτρέποντας σε γιατρούς και ασθενείς να επικοινωνούν εξ αποστάσεως. Αυτή η λύση έχει ωφελήσει ιδιαίτερα άτομα που διαμένουν σε απομακρυσμένες περιοχές ή η κατάσταση της υγείας τους δεν τους επιτρέπει να μετακινηθούν. Η Σιγκαπούρη έχει εισαγάγει ένα εθνικό σύστημα ηλεκτρονικού ιατρικού φακέλου, το οποίο παρέχει στους γιατρούς πρόσβαση στο ιατρικό ιστορικό ενός ασθενούς από οποιαδήποτε κλινική ή νοσοκομείο της χώρας, μειώνοντας έτσι τον χρόνο αναμονής, βελτιώνοντας τη φροντίδα των ασθενών και εξοικονομώντας κόστος.

Επόμενος στόχος της SLA αποτελεί η κατασκευή ενός υπόγειου ΨΔ της πόλης, δεδομένου ότι η πλειοψηφία των κοινωφελών κρατικών περιουσιακών στοιχείων είναι θαμμένα στο υπέδαφος προκειμένου να ελευθερωθεί πολύτιμος υπέργειος χώρος για τους πολίτες. Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας της αδιάκοπης επέκτασης της Σιγκαπούρης, τόσο στο έδαφος όσο και στο υπέδαφος, ο διαθέσιμος υπόγειος χώρος έχει ήδη υπερφορτωθεί, ενώ υπάρχει αυξημένος κίνδυνος πρόκλησης ζημιάς κατά τη διάρκεια εργασιών εκσκαφής (Weger, 2022).

Με την αντιμετώπιση ορισμένων αναμενόμενων προκλήσεων, όπως την ανάπτυξη δεξιοτήτων ψηφιακής παιδείας προς αποφυγή του έντονου ψηφιακού χάσματος, καθώς και την ύπαρξη διαφάνειας στη συλλογή και χρήση δεδομένων για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης μεταξύ πολιτών και πλατφόρμας, η “Εικονική Σιγκαπούρη” θα αποτελέσει μια πλατφόρμα με τη δυνατότητα να παρέχει καινοτόμες λύσεις σε παγκόσμιες αστικές προκλήσεις.

Η αξιοποίηση στρατηγικών συνεργασιών και τεχνολογιών αιχμής, όπως η TN, τα ΨΔ και η ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων, μπορεί να αντιμετωπίσει πολύπλοκα ζητήματα που σχετίζονται με την αστική ανάπτυξη, δίνοντάς της τη δυνατότητα να επηρεάσει τη διεθνή συζήτηση για τις βέλτιστες πρακτικές στον αστικό σχεδιασμό (Sabu, 2024; Πανταζή, 2023). Κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν ενισχύει μόνο τη φήμη της ως παγκόσμιος ηγέτης στον τομέα της αστικής καινοτομίας, αλλά παράλληλα προωθεί την παγκόσμια ανάπτυξη πιο ανθεκτικών, βιώσιμων και δίκαιων πόλεων.

## 6.2 Ζυρίχη, Ελβετία

Η Ζυρίχη αναδεικνύεται, σύμφωνα με το Smart City Ranking (2024), ως η πρωταγωνίστρια των έξυπνων πόλεων σε παγκόσμιο επίπεδο για το 2024, λόγω της ολιστικής προσέγγισής της στη βιωσιμότητα, την ψηφιακή καινοτομία και την ενεργό συμμετοχή των πολιτών. Το καντόνι της Ζυρίχης προβλέπει αύξηση του πληθυσμού κατά 280.000 άτομα έως το 2040, με το 80% αυτής της αύξησης να πραγματοποιείται σε αστικές περιοχές, ώστε να διατηρηθεί η περιορισμένη διαθέσιμη γη. Με βάση αυτά τα δεδομένα, ο πληθυσμός της πόλης μπορεί να φτάσει περίπου τους 520.000 κατοίκους, ενώ παράλληλα ο αριθμός των θέσεων εργασίας θα αυξηθεί με ανάλογο τρόπο (Schrotter & Hürzeler, 2020).

Αυτή η αναπτυξιακή δυναμική επιφέρει τόσο ευκαιρίες όσο και προκλήσεις. Από τη μία πλευρά, η αύξηση του πληθυσμού ενισχύει τη σημασία της Ζυρίχης ως κέντρο οικονομικών

και πολιτιστικών καινοτομιών, γεγονός που προάγει την ποικιλομορφία. Από την άλλη, ο ανταγωνισμός για τη χρήση της γης θα ενταθεί, απαιτώντας προσεκτική διαχείριση. Στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης, οι προκλήσεις και οι στρατηγικοί στόχοι της πόλης έχουν καθοριστεί στο πλαίσιο του σχεδίου “Στρατηγικές Ζυρίχη 2035”, το οποίο χαράσσει τις κατευθυντήριες γραμμές για τη διαχείριση της αναπτυξιακής πορείας της πόλης τα επόμενα χρόνια. Για την πόλη της Ζυρίχης, η έννοια της "Εξυπνης Πόλης" επικεντρώνεται στη δικτύωση οργανισμών, υποδομών και ανθρώπων, με στόχο τη δημιουργία οικονομικών, οικολογικών και κοινωνικών οφελών (Schrotter & Hürzeler, 2020). Η χρήση αισθητήρων, δεδομένων και εφαρμογών επιτρέπουν την ανάπτυξη νέων και πιο αποδοτικών λύσεων τόσο για τους χρήστες των αστικών υποδομών όσο και για τους διαχειριστές τους.

Τα Ψηφιακά Δίδυμα και η χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης ανοίγουν νέους ορίζοντες για τον αστικό σχεδιασμό της Ζυρίχης, εστιάζοντας, μέσω χωρικών και ψηφιακών μοντέλων, σε ποικίλες θεματικές πτυχές της αστικής ανάπτυξης. Τα πρώτα πειράματα με χωρικά δεδομένα ξεκίνησαν στο ETH Zurich, ήδη από τη δεκαετία του 1990, ενώ το πλήρες τρισδιάστατο ψηφιακό μοντέλο πόλης ολοκληρώθηκε το 2011. Εν συνεχεία, το μοντέλο εδάφους δημιουργήθηκε από εικόνες LIDAR το 2014 (Shahat et al., 2021), με τις απαραίτητες προσαρμογές σε ευαίσθητες περιοχές να γίνονται χειροκίνητα, όπως στη λίμνη της Ζυρίχης και τον ποταμό Limmat.

Ταυτόχρονα, εισήχθησαν γραμμές διακοπής για γεωμετρικές δρόμων, καλύπτοντας συνολικά περισσότερα από 50.000 κτίρια σε διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας. Το υπολογισμένο πλέγμα βασίζεται σε ανοχές 1 m και 0,1 m, με μέσο σφάλμα ύψους 30–40 cm. Αντίστοιχα, μέσω στερεοσκοπικής αεροφωτογραμμετρίας διαμορφώνονται οι κατόψεις των κτιρίων καθώς και οι λεπτομέρειες των υλικών στις στέγες και τους τοίχους (Shahat et al., 2021).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εντοπίζεται στους τομείς των κατασκευών και της διαχείρισης ακινήτων. Εδώ, οι κατασκευαστικές διαδικασίες και η συντήρηση μοντελοποιούνται ψηφιακά μέσω ΨΔ και τρισδιάστατων δεδομένων, τα οποία αναπαριστούν τη δομή και τη λειτουργία ενός κτιρίου. Αυτά τα ψηφιακά μοντέλα είναι διαδραστικά και μεταδίδουν πληροφορίες όπως δεδομένα ανάλυσης, κατάσταση ή χρήση, καθώς και εντολές ελέγχου (Schrotter & Hürzeler, 2020).



*Εικόνα 8. Αποτύπωση τμήματος της πόλης της Ζυρίχης μέσω του προγράμματος “Zürich virtuell”*

Το ΨΔ μπορεί να αντικατοπτρίζει υπό κατασκευή ή υφιστάμενα κτίρια, επιτρέποντας την παρακολούθηση των δομικών και λειτουργικών τους χαρακτηριστικών με την πάροδο του χρόνου, χωρίς να είναι απαραίτητο το αντίστοιχο του ψηφιακού μοντέλου να υπάρχει στον πραγματικό κόσμο. Με τον τρόπο αυτό επιτρέπονται στους κατασκευαστές της πόλης να πραγματοποιούν δοκιμές, επαναληπτικές αναλύσεις και προσομοιώσεις στον ψηφιακό κόσμο εμπλουτισμένες με δεδομένα από την πραγματικότητα.

Στο μέλλον αναμένεται να αναλυθούν οι επιπτώσεις σχεδιασμού κτιρίων στις ροές ψυχρού αέρα, καθώς τα κτίρια, ανάλογα με τον σχεδιασμό και τη θέση τους, επηρεάζουν τη θερμοκρασία, τον άνεμο και τις ροές ανέμου, υπογραμμίζοντας τη σημασία της κλιματικής προσαρμογής στον αστικό σχεδιασμό (Schrotter & Hürzeler, 2020).

Επιπλέον, τα δεδομένα παρέχουν εξαιρετικές δυνατότητες για αναλύσεις όπως η διάδοση θορύβου, οι σκιές, η ηλιακή ακτινοβολία, οι προσομοιώσεις πλημμύρας κ.α, ενισχύοντας τη διαμόρφωση του δημόσιου χώρου και το καθορισμό στρατηγικής. Το GIS City of Zurich, σε συνεργασία με 25 δημοτικές υπηρεσίες διαχειρίζεται ήδη αυτές τις εξελίξεις. Από το 2009, το GIS έχει υιοθετήσει μια συνολική στρατηγική για τα γεωδεδομένα, ενώ το 2019 η στρατηγική αναθεωρήθηκε για να ανταποκριθεί στις νέες προκλήσεις.

Το φθινόπωρο του 2020, η υπηρεσία Geomatics + Surveying παρουσίασε μια νέα μέθοδο απεικόνισης, προσβάσιμη από όλους τους δημοτικούς υπαλλήλους, μέσω της οποίας είναι δυνατή η ψηφιακή απεικόνιση του χώρου των δημόσιων υποδομών, με σκοπό τη μείωση των επιθεωρήσεων με φυσική παρουσία από τους εργαζόμενους (Sauerbier et al., 2012).



Παράλληλα, στην ίδια υπηρεσία συλλέγονται και υποβάλλονται δεδομένα αγωγών και καλωδίων πλήθους εταιρειών που υπάγονται στο κτηματολόγιο κοινής ωφέλειας της πόλης, έχοντας ήδη ψηφιοποιηθεί στο μεγαλύτερο βαθμό, με τις ενημερώσεις των δεδομένων αυτών να ανανεώνονται εβδομαδιαία προκειμένου να παραμένουν αμετάβλητα και ασφαλή (Schrotter & Hürzeler, 2020).

Από το 2012, η πόλη της Ζυρίχης παρέχει χωρίς κόστος δεδομένα από τη δημόσια διοίκηση σε μορφή αναγνώσιμη από μηχανές και υπό καθεστώς ελεύθερης άδειας χρήσης. Πλατφόρμες όπως το “Zürich virtuell” και το “Zürich 4D”, παρέχουν, ήδη από το 2020, ελεύθερη πρόσβαση στο Ψηφιακό Δίδυμο της πόλης, το οποίο αναπαριστά περισσότερα από 50.000 κτίρια και υποδομές, ενώ δίνει και τη δυνατότητα παραμετροποίησης, όπως αλλαγή της ώρας της ημέρας, εμφάνιση ή απόκριση συγκεκριμένων κτιρίων και χώρων πρασίνου κ.α (Schoof, 2022). Η ελεύθερη πρόσβαση σε διοικητικά δεδομένα διευκολύνει σημαντικά τη χρήση τους, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες αξίας για ιδιώτες και εταιρείες, με την αξιοπιστία των ψηφιακών δεδομένων να αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την ανάπτυξη πλήθους επιχειρηματικών μοντέλων.

Ολοκληρώνοντας, το ΨΔ της πόλης της Ζυρίχης παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για την ανάδειξη του αστικού σχεδιασμού, της οπτικοποίησης και της συμμετοχής των ενδιαφερόμενων φορέων. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο απαιτεί περαιτέρω εξέλιξη. Συγκεκριμένα, είναι αναγκαίο να αυξηθεί το επίπεδο λεπτομέρειας των κτιρίων και άλλων αστικών στοιχείων, να ενσωματωθούν πλήρως οι εφαρμογές GIS και BIM ώστε να αξιοποιηθούν στον μέγιστο βαθμό οι δυνατότητές τους και να μειωθεί ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της συνάθροισης δεδομένων και της επεξεργασίας του τρισδιάστατου μοντέλου.

### 6.3 Ελληνική Επικράτεια

Υλοποιήσεις με κατεύθυνση προς την δημιουργία έξυπνων πόλεων, έχουν πραγματοποιηθεί ήδη από τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα, πιλοτικά ή μη, σε ορισμένες πόλεις της Ελληνικής επικράτειας, με πρωτοβουλίες, κατά βάση, των Υπουργείων Ανάπτυξης, Περιβάλλοντος και Ενέργειας, καθώς και με τη συνδρομή των επιλεγμένων Δήμων. Πόλεις όπως τα Τρίκαλα, το

Ηράκλειο Κρήτης η Λάρισα, καθώς και η Βέροια αναγνωρίζονται διεθνώς ως παραδείγματα «Έξυπνων Πόλεων».

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα Τρίκαλα, όπου ακολουθώντας μια εκσυγχρονιστική πορεία, αποτέλεσαν και συνεχίζουν να αποτελούν ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα ψηφιακού μετασχηματισμού, αντιπροσωπεύοντας το 2004 τη πρώτη Ελληνική ψηφιακή πόλη. Εξελίχθηκε έπειτα σε ασύρματη πόλη το 2005 και στη συνέχεια σε πόλη ευρυζωνικότητας το 2007 (Anthopoulos, 2019). Μέσω της χρήσης ψηφιακών καινοτομιών και λύσεων της Βιομηχανίας 4.0, έχει καταφέρει να εκσυγχρονίσει τις υποδομές της και να παρέχει προηγμένες υπηρεσίες στους κατοίκους και επισκέπτες. Κύριοι στόχοι και πρωτοβουλίες που επιτεύχθηκαν, όπως η ελεγχόμενη στάθμευση, η χρήση αυτόνομων λεωφορείων, το σύστημα έξυπνου φωτισμού, καθώς και η εφαρμογή Trikala Mobile checkAPP, μέσω της οποίας οι πολίτες στέλνουν με μηδενική καθυστέρηση τα αιτήματά τους στον Δήμο ενώ λειτουργεί και ως τουριστικός οδηγός, συνέβαλαν στην υιοθέτηση ψηφιακών πλατφορμών και συστημάτων πληροφορικής, ενισχύοντας την ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα των πολιτών (Anthopoulos & Fitsilis, 2010).

Σύμφωνα με τον (Τσαρχόπουλος, 2013), ο Δήμος Τρικκαίων, ο οποίος αργότερα μετονομάστηκε σε e-trikala επιδίωξε την ανάπτυξη και παροχή ενός ολοκληρωμένου συνόλου υποδομών και εφαρμογών ΤΠΕ, εστιάζοντας σε στρατηγικά σημαντικές ανάγκες της πόλης που στόχευαν στη βελτίωση των διατιθέμενων υπηρεσιών προς τους πολίτες. Βασικοί στόχοι της πρωτοβουλίας ήταν η τόνωση της τοπικής οικονομίας, η εξοικονόμηση ενέργειας και η αντιμετώπιση του κυκλοφοριακού προβλήματος. Ως αποτέλεσμα, τα Τρίκαλα κατόρθωσαν να δημιουργήσουν ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό μοντέλο πόλης, προσφέροντας στους πολίτες ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών υπηρεσιών με γνώμονα τη βελτίωση της καθημερινότητάς τους.

Ορισμένα από τα πολλά παραδείγματα τέτοιων υλοποιήσεων αποτελούν, το πιλοτικό πρόγραμμα CityMobil2, το οποίο χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση, αποτελούσε τη χρήση έξι αυτόνομων λεωφορείων χωρητικότητας 10 θέσεων χωρίς οδηγό, όπου κινούνταν από το 2015 και για περίπου ένα χρόνο σε ειδικά διαμορφωμένες διαδρομές. Ακολουθούσαν προκαθορισμένες λωρίδες και επικοινωνούσαν με το κέντρο ελέγχου μέσω GPS και Wi-Fi, επιτρέποντας την απομακρυσμένη παρέμβαση επαγγελματία οδηγού σε περίπτωση ανάγκης, συμβάλλοντας στη μείωση του αυξημένου κυκλοφοριακού φόρτου και των ρυπογόνων εκπομπών (Papadima et al., 2020).



Παράλληλα, ο Δήμος προχώρησε στην ανάπτυξη ενός έξυπνου συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων, τοποθετώντας αισθητήρες ελέγχου πλήρωσης στους κάδους, με το σύστημα GIS online να ενημερώνει τους οδηγούς απορριμματοφόρων για το ποιοι κάδοι είναι γεμάτοι, επιτρέποντας στοχευμένες διαδρομές συλλογής. Επιπρόσθετα, αισθητήρες κατέγραφαν την παρουσία δύσοσμων ή επικίνδυνων απορριμμάτων, ώστε να απομακρύνονται έγκαιρα.

Τέλος, δημιουργήθηκε ένα αυτοματοποιημένο κέντρο εξυπηρέτησης πολιτών, επιτρέποντας την άμεση έκδοση εγγράφων μέσω ειδικών μηχανημάτων σε μορφή ATM. Οι πολίτες μπορούν να λαμβάνουν και να καταθέτουν έγγραφα ηλεκτρονικά, με τη διαδικασία να ολοκληρώνεται άμεσα μέσω της κάρτας δημότη και του συστήματος e-KEΠ (Coccossis & Tsartas, 2019).

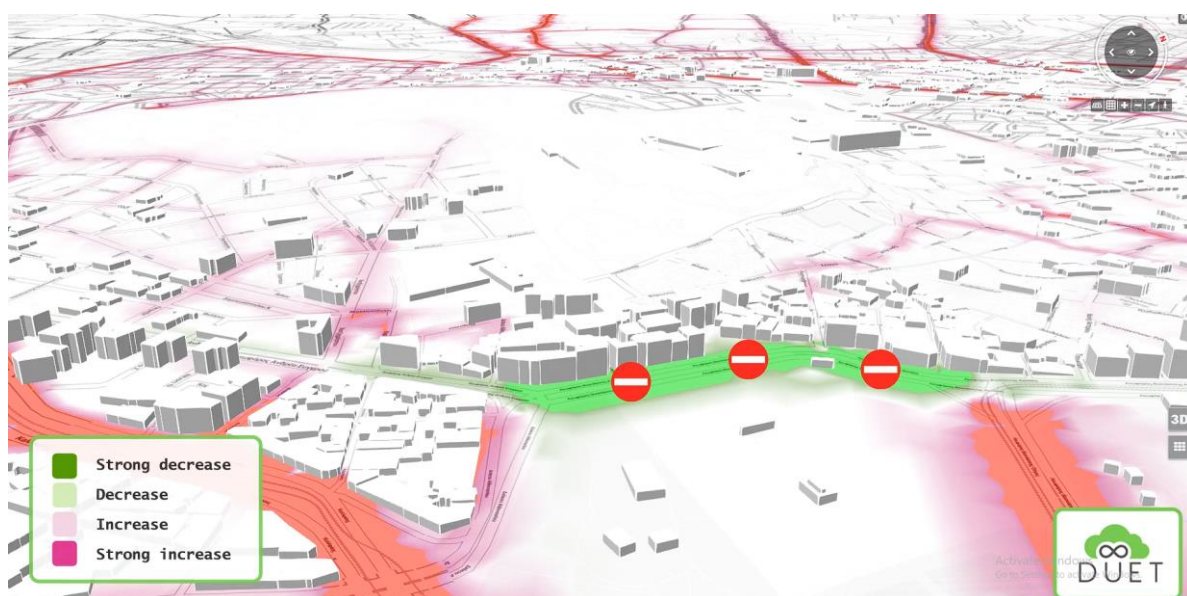
Η πόλη των Τρικάλων, ωστόσο, καθώς και άλλες, όπως το Ηράκλειο και η Θεσσαλονίκη, παρόλο που βρίσκονται σε ένα ικανοποιητικό για τα Ελληνικά δεδομένα επίπεδο ένταξης στην οικογένεια των έξυπνων πόλεων, δεν έχουν ακόμα εφαρμόσει κάποια τεχνολογία Ψηφιακού Διδύμου. Στη διαδικασία αναζήτησης, επομένως, εφαρμογών Ψηφιακής Δίδυμης πόλης εντός των Ελληνικών συνόρων, φαίνεται να υλοποιείται ένα πιλοτικό πρόγραμμα της EU Horizon 2020 στην πρωτεύουσα της χώρας, την Αθήνα, με όνομα Digital Urban European Twins (DUET, 2022).

Αποτελεί ουσιαστικά ένα πλήρες πακέτο δεδομένων, μοντέλων και προσομοιώσεων, ονόματι T-CELL, το οποίο παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στις τοπικές αρχές και στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων των αναδυόμενων έξυπνων πόλεων που δεν διαθέτουν τις απαραίτητες δυνατότητες και υποδομές για την αντιμετώπιση αστικών προκλήσεων μέσω προηγμένων, δεδομενοκεντρικών λύσεων (Raes et al., 2022). Οι πόλεις που συμμετέχουν σε αυτό το πρόγραμμα είναι η Αθήνα, η Πίλσεν στην Τσεχία και η Φλάνδρα στο Βέλγιο.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες των πόλεων και των περιφερειών που συμμετέχουν, τα ΨΔ σενάρια του DUET εστιάζουν σε τρεις βασικούς τομείς: την κυκλοφορία, το περιβάλλον και την ποιότητα ζωής, η οποία αξιολογείται, μεταξύ άλλων, μέσω της ηχορύπανσης. Με το 36% του πληθυσμού της χώρας να ζει στην Αττική (Κουλλόλλι, 2024) και με τις ολοένα μεγαλύτερες εποχικές αυξήσεις τουριστικής κίνησης και επισκεπτών, η Αθήνα χρειάζεται ένα ολοκληρωμένο ΨΔ που θα ενοποιεί και θα καθιστά προσβάσιμα όλα τα δεδομένα της πόλης. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνεται η εμπειρία τόσο των κατοίκων όσο και των επισκεπτών της, ενώ παράλληλα, διευκολύνεται η αντιμετώπιση προβλημάτων όπως η

ατμοσφαιρική ρύπανση και η επιβαρυμένη κυκλοφορία (Raes et al., 2022). Ο τελικός στόχος είναι η εφαρμογή μέτρων που θα συμβάλουν στην περιβαλλοντική προστασία και θα μειώσουν τις επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

Πιο αναλυτικά, το DUET θα δοκιμάσει τρεις διαφορετικούς τύπους μοντέλων κυκλοφορίας, χωριζόμενα σε στατικό, δυναμικό και μοντέλο τοπικής κινητικότητας (Raes et al., 2022). Τα στατικά και δυναμικά μοντέλα εκχώρησης κυκλοφορίας προσφέρουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των κυκλοφοριακών ροών, επιτρέποντας μέσω του ΨΔ την πρόβλεψη των επιπτώσεων από εναλλακτικές διαδρομές ή διαφορετικά μοτίβα ζήτησης, όπως σε περιπτώσεις αλλαγής στη ροή της κυκλοφορίας λόγω διοδίων ή το κλείσιμο λωρίδων λόγω κατασκευαστικών έργων (Εικόνα 9).

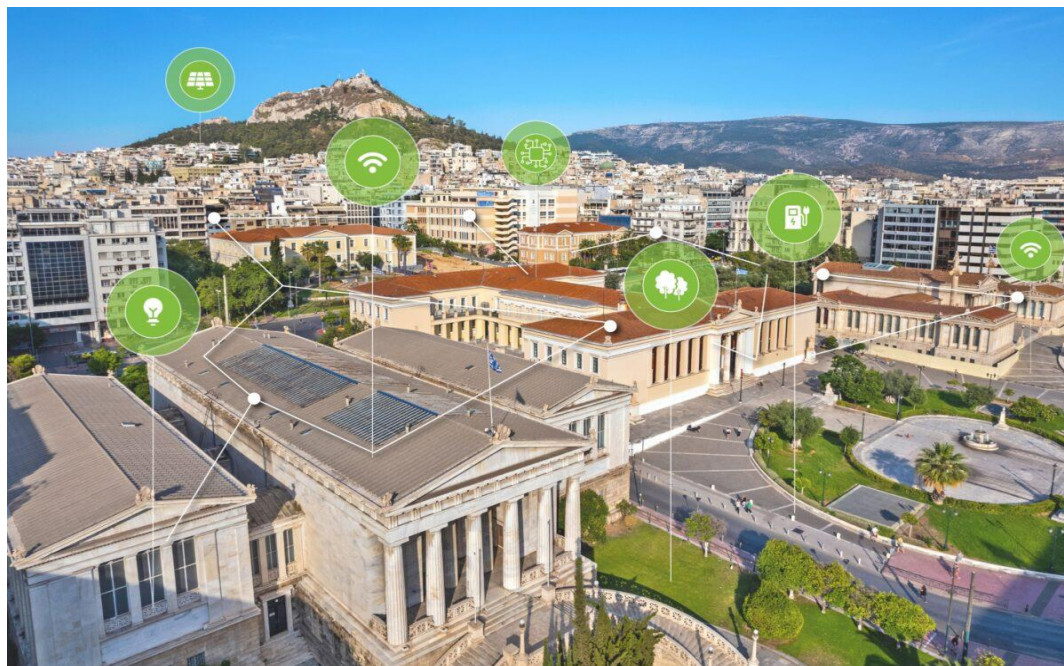


Εικόνα 9. Υποθετικό σενάριο ανάλυσης συνεπειών κατά το κλείσιμο τμήματος του αστικού οδικού δικτύου (DUET, 2022)

Το Cityflows, αντίθετα, αξιοποιεί δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από πολλαπλές πηγές, όπως αισθητήρες ή πινακίδες κυκλοφορίας και WiFi, καταγράφοντας με ακρίβεια τη ροή οχημάτων και πεζών. Αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες για υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης, λιανικό εμπόριο, τιμές ενοικίασης και τη δημόσια υγεία, καθώς συνδέονται με την ατμοσφαιρική και ηχητική ρύπανση.

Ακολούθως, τα μοντέλα ποιότητας αέρα βασίζονται σε μαθηματικές προσομοιώσεις για να αποτυπώσουν τον τρόπο που οι ατμοσφαιρικοί ρύποι διασκορπίζονται και μεταβάλλονται μέσω χημικών αντιδράσεων. Η Αθήνα αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με περίπου 6% των θανάτων στην Ελλάδα να σχετίζονται με αυτήν (Athens Twin,

2022). Οι κινητήρες ντίζελ θεωρούνται η κύρια πηγή ρύπανσης, ενώ το υψηλό ποσοστό καπνιστών επιδεινώνει την κατάσταση. Στο DUET, οι εκπομπές ρύπων υπολογίζονται με βάση την ένταση της κυκλοφορίας, το οδικό δίκτυο, καθώς και περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η ταχύτητα και η πορεία του ανέμου (Raes et al., 2022). Τα αποτελέσματα μετατρέπονται σε οπτικούς χάρτες με τεχνικές θερμικής απεικόνισης ή παρεμβολής.



Εικόνα 10. Ψηφιακή διασύνδεση της πόλη της Αθήνας (Astydama, 2024)

Όσον αφορά τον περιβαλλοντικό θόρυβο, ο οποίος κατά βάση προέρχεται από τη βιομηχανία και διάφορες μορφές σιδηροδρομικής και οδικής κυκλοφορίας, το DUET αξιοποιεί ανοιχτού κώδικα εργαλεία, όπως το Urban Strategy Noise Module και το NoiseModelling, για να δημιουργήσει χάρτες ηχητικής ρύπανσης (Raes et al., 2022). Οι τοπικές αρχές μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτούς τους χάρτες για να αξιολογήσουν την έκθεση των κατοίκων στον θόρυβο, λαμβάνοντας υπόψη σχετικούς περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Αξιοποιώντας λοιπόν μοντέλα κυκλοφορίας, ποιότητας αέρα και θορύβου στο περιβάλλον του Ψηφιακού Διδύμου, οι πιλότοι του DUET θα εξετάσουν διάφορα υποθετικά σενάρια μέσω τρισδιάστατης διεπαφής, όπως για παράδειγμα, ποια θα ήταν η επίδραση στα επίπεδα θορύβου και την ποιότητα του αέρα εάν το όριο ταχύτητας σε έναν συγκεκριμένο δρόμο αυξανόταν ή μειωνόταν, καθώς και αν η μετατροπή ενός δρόμου σε ζώνη χωρίς αυτοκίνητα

μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της ατμοσφαιρικής καθαρότητας και στη καταστολή της ηχορύπανσης.

Ολοκληρώνοντας, η υιοθέτηση ενός τόσο υποσχόμενου πρόγραμματος, όπως το DUET στην Ελλάδα, το οποίο είναι ακόμα σε στάδια δοκιμών, συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Αυτές αφορούν κυρίως την έλλειψη δεδομένων και διαλειτουργικότητας, καθώς πολλές δημοτικές υπηρεσίες δεν διαθέτουν κατάλληλες υποδομές, ανοιχτές βάσεις δεδομένων ή κατάλληλα εξειδικευμένο προσωπικό σε τομείς όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Big Data. Επιπλέον, η περιορισμένη χρηματοδότηση και οι ανεπαρκείς ψηφιακές υποδομές (όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και το Υπολογιστικό Νέφος) καθυστερούν την εφαρμογή τους. Παράλληλα, υπάρχουν νομικά ζητήματα που σχετίζονται με την προστασία προσωπικών δεδομένων ασφαλείας και ιδιωτικότητας. Το DUET, παρ' ότι δεν χρησιμοποιεί βιομετρικά δεδομένα, ενώ ταυτόχρονα διαθέτει πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική ασφαλείας, καλύπτοντας τις κεντρικές πλατφόρμες, τα περιφερειακά δεδομένα και τις ροές επικοινωνίας μεταξύ τους, ενσωματώνει δεδομένα πολιτών για τη βελτίωση της κάλυψης ποιότητας αέρα και κυκλοφορίας. Η τεχνική ασφάλεια από μόνη της δεν επαρκεί για την οικοδόμηση εμπιστοσύνης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, απαιτείται ενίσχυση των ανοιχτών δεδομένων και της διαλειτουργικότητας, συνεργασία με πανεπιστήμια και startups για οικονομικά αποδοτικές λύσεις, καθώς και τήρηση αυστηρών προτύπων απορρήτου και ασφάλειας, προκειμένου τα ΨΔ να κερδίσουν την εμπιστοσύνη των σύγχρονων πόλεων και πολιτών, οι οποίοι είναι ολοένα και πιο ευαισθητοποιημένοι σε θέματα Κυβερνοασφάλειας και δικαιωμάτων δεδομένων (Fuller et al., 2020). Εάν οι πόλεις αναπτύσσουν ΨΔ με επίκεντρο αποκλειστικά τους αρχιτέκτονες και τους πολεοδόμους, κινδυνεύουν να μην προσελκύσουν το ενδιαφέρον των ίδιων των πολιτών, στους οποίους προορίζονται να προσφέρουν οφέλη. Η ευρεία υιοθέτηση των ψηφιακών διδύμων από διαφορετικούς φορείς του αστικού οικοσυστήματος αποτελεί βασικό δείκτη εμπιστοσύνης, εξασφαλίζοντας τη βιωσιμότητα και την αξία τους σε βάθος χρόνου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### Επίλογος

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία επιχειρεί να αναλύσει τη μετάβαση από τις πρώτες βιομηχανικές επαναστάσεις στη σύγχρονη εποχή της Βιομηχανίας 4.0. Μέσα από την ανάλυση των τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, τη Τεχνητή Νοημοσύνη, τα Μεγάλα Δεδομένα, το Υπολογιστικό Νέφος, καθώς και τις αναδυόμενες τεχνολογίες των Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων, διαμορφώθηκε ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο κατανόησης των Ψηφιακών Δίδυμων και των δυνατοτήτων που ανοίγουν τα τελευταία χρόνια στις σύγχρονες Έξυπνες Πόλεις. Η μελέτη των διαστάσεων, χαρακτηριστικών και αρχιτεκτονικής των Έξυπνων Πόλεων, με έμφαση στην έξυπνη οικονομία, διακυβέρνηση, ζωή, κινητικότητα, περιβάλλον και ανθρώπινο δυναμικό, αναδεικνύει την πολυπλοκότητα και ταυτόχρονα τις δυνατότητες που προσφέρουν οι σύγχρονες τεχνολογικές εφαρμογές για τη δημιουργία ασφαλέστερων και πιο ανθεκτικών μητροπολιτικών κοινωνιών.

Η ενσωμάτωση των Ψηφιακών Διδύμων στα πλαίσια των έξυπνων πόλεων αναδεικνύει τις δυνατότητές τους στον ριζικό μετασχηματισμό της αστικής ανάπτυξης, μέσω ερμηνείας της σύνθετης φύσης τους, καλύπτοντας τόσο τα λειτουργικά τους επίπεδα όσο και τις πέντε βασικές διαστάσεις υλοποίησής τους. Οι εφαρμογές τους στον αστικό σχεδιασμό είναι εκτεταμένες και ποικιλόμορφες, παρέχοντας καινοτόμες λύσεις σε τομείς όπως η διαχείριση ενέργειας και μεταφορών, μέσω εργαλείων Μικροδικτύου και Ευφυούς Συστήματος Μεταφοράς, η εποπτεία υποδομών και η διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Πολλές πόλεις αξιοποιούν τα ΨΔ για να βελτιώσουν τη διαδικασία αστικής ανάπτυξης, διακυβέρνησης και λήψης αποφάσεων.

Οι αναλυθείσες μελέτες περιπτώσεων σε Ευρώπη και Ασία, προσφέρουν μια πρακτική εικόνα της εφαρμογής των σύγχρονων τεχνολογιών, αναδεικνύοντας τόσο τις δυνατότητες, όσο και τις προκλήσεις που συνοδεύουν την υιοθέτησή τους. Σε αντιδιαστολή με την Ελληνική επικράτεια, όπου δεν βρίσκεται ακόμα σε στάδιο πλήρους ωριμότητας για την υλοποίηση τόσο εξειδικευμένων αστικών προγραμμάτων, οι πόλεις του εξωτερικού, με την απαραίτητη πάντα οικονομική ενίσχυση, έχουν αναπτύξει συντονισμένα πλάνα και παραδείγματα πρωτοτύπων ΨΔ, που στοχεύουν στην στρατηγική αντιμετώπιση υφιστάμενων αλλά και νέων προκλήσεων.

Βάσει των όσων εξετάστηκαν, παρατηρείται πως η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας φέρνει διαρκώς νέα επιτεύγματα, τα οποία προσφέρουν σημαντικές προοπτικές για τη μακροπρόθεσμη πορεία των έξυπνων πόλεων. Παρόλο που πρόκειται για έναν τομέα που βρίσκεται σε αδιάλειπτη ανάπτυξη, οι πόλεις που συμμετείχαν στην έρευνα κατάφεραν να επιτύχουν τους στόχους τους σε ικανοποιητικό βαθμό, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της τοπικής οικονομίας και στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων.

Η αναθεώρηση των προτύπων αστικής διακυβέρνησης και σχεδιασμού, ιδιαίτερα μετά από κοινωνικές, περιβαλλοντικές, οικονομικές και υγειονομικές κρίσεις, αποτελεί ένα σύγχρονο ζήτημα, στο οποίο οι ψηφιακές λύσεις μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά. Η διαρκής παρακολούθηση καταστάσεων, η πρόληψη προβλημάτων και πρόβλεψη κινδύνων, καθώς και η ενσωμάτωση νέων δεδομένων σε μια πόλη, απαιτούν τη χρήση τυποποιημένων γεωχωρικών πληροφοριών, κάτι που επιτυγχάνεται μέσω των Ψηφιακών Διδύμων. Η συγκεκριμένη εργασία βασίζεται στην πεποίθηση ότι η εφαρμογή των ΨΔ στις αστικές περιοχές δεν αποτελεί ουτοπία, καθώς η ανάγκη για ψηφιακές λύσεις που να εξυπηρετούν τους πολίτες και να ενισχύουν τη βελτίωση της ποιότητας ζωής είναι επιτακτική.

Η μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη, ωστόσο, αντιμετωπίζει σημαντικά εμπόδια που χρήζουν ανάγκες αντιμετώπισης, όπως περισσότερες απτές υλοποιήσεις, καθιέρωση τυποποιημένων πρωτοκόλλων και ανάπτυξη καινοτόμων στρατηγικών για τη διαχείριση δεδομένων και την ενοποίηση συστημάτων.

Καταλήγοντας, για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα των έξυπνων πόλεων στο μέλλον, είναι απαραίτητο να διατηρηθούν αυτούσιες βασικές αρχές, όπως η δημοκρατία, η ελευθερία και ο σεβασμός προς τον άνθρωπο, διασφαλίζοντας ότι η τεχνολογία χρησιμοποιείται αποκλειστικά προς όφελος των πολιτών. Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στη γεφύρωση αυτών των αρχών, καλώντας τους μελετητές, τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και τους επαγγελματίες της πόλης να ενώσουν τις δυνάμεις τους, συμβάλλοντας τόσο στη βελτίωση της ποιότητας ζωής εντός πόλεων, όσο και στην αποδοτικότερη διαχείριση των έξυπνων αστικών περιβαλλόντων. Καθώς η τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων προοδεύει, η συντονισμένη προσπάθεια μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων καθίσταται απαραίτητη, προκειμένου να απελευθερώσουν τις πραγματικές τους δυνατότητες, όχι μόνο ως τεχνολογικά προηγμένα συστήματα, αλλά και ως κοινωνικά, προσαρμοσμένα στις απαιτήσεις του σήμερα.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abomhara, M., & Køien, G. M. (2015). Cyber security and the internet of things: Vulnerabilities, threats, intruders and attacks. *Journal of Cyber Security and Mobility*, 4(1), 65–88. <https://doi.org/10.13052/JCSM2245-1439.414>
- Ahmed, S. (2020). Security and privacy in smart cities: Challenges and opportunities. *International Journal of Engineering Trends and Technology - IJETT*, 68(2), 1–8. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V68I2P201>
- Ahuett-Garza, H., & Kurfess, T. (2018). A brief discussion on the trends of habilitating technologies for Industry 4.0 and Smart manufacturing. *Manufacturing Letters*, 15, 60–63. <https://doi.org/10.1016/J.MFGLET.2018.02.011>
- Aivaliotis, P., Georgoulas, K., Arkouli, Z., & Makris, S. (2019). Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417–422. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2019.03.072>
- Al Nuaimi, E., Al Neyadi, H., Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2015). Applications of big data to smart cities. *Journal of Internet Services and Applications*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/S13174-015-0041-5/FIGURES/3>
- Alguliyev, R., Imamverdiyev, Y., & Sukhostat, L. (2018). Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, 100, 212–223. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2018.04.017>
- Anthopoulos, L. (2019). The smart city of Trikala. *Smart City Emergence: Cases From Around the World*, 149–171. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816169-2.00007-9>
- Anthopoulos, L., & Fitsilis, P. (2010). From digital to ubiquitous cities: Defining a common architecture for urban development. *Proceedings - 2010 6th International Conference on Intelligent Environments, IE 2010*, 301–306. <https://doi.org/10.1109/IE.2010.61>
- Appio, F. P., Lima, M., & Paroutis, S. (2019). Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2018.12.018>
- Ariyachandra, M. R. M. F., & Wedawatta, G. (2023a). Digital Twin Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts. *Sustainability 2023*, Vol. 15, Page 11910, 15(15), 11910. <https://doi.org/10.3390/SU151511910>
- Ariyachandra, M. R. M. F., & Wedawatta, G. (2023b). Digital Twin Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts. *Sustainability 2023*, Vol. 15, Page 11910, 15(15), 11910. <https://doi.org/10.3390/SU151511910>
- Assunção, M. D., Calheiros, R. N., Bianchi, S., Netto, M. A. S., & Buyya, R. (2015). Big Data computing and clouds: Trends and future directions. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 79–80, 3–15. <https://doi.org/10.1016/J.JPDC.2014.08.003>
- Astydamia. (2024, November 28). *Smart cities: Athens embracing urban tech solutions*. ASTYDAMA. <https://tinyurl.com/mrj9vv2v>
- Athens Twin. (2022). *Athens Twin / digital urban european twins*. <https://www.digitalurbantwins.com/athens-twin>
- Attaran, H., Kheibari, N., & Bahrepour, D. (2022). Toward integrated smart city: a new model for implementation and design challenges. *GeoJournal*, 87(4), 511–526. <https://doi.org/10.1007/S10708-021-10560-W/FIGURES/10>
- Avdibasic, E., Toksanovna, A. S., & Durakovic, B. (2022). Cybersecurity challenges in Industry 4.0: A state of the art review. *Defense and Security Studies*, 3, 32–49. <https://doi.org/10.37868/DSS.V3.ID188>



- Badami, V. (2016, September 19). *Smart City Architecture: Building the Future*.  
<https://tinyurl.com/adavfeuc>
- Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. H. N., & Talib, M. F. (2016). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi*, 78(6–13), 137–143.  
<https://doi.org/10.11113/JT.V78.9285>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020a). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020b). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2020.107776>
- Baig, Z. A., Szewczyk, P., Valli, C., Rabadia, P., Hannay, P., Chernyshev, M., Johnstone, M., Kerai, P., Ibrahim, A., Sansurooah, K., Syed, N., & Peacock, M. (2017). Future challenges for smart cities: Cyber-security and digital forensics. *Digital Investigation*, 22, 3–13. <https://doi.org/10.1016/J.DIIN.2017.06.015>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications. *IEEE Access*, 7, 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Bhagavan, K., Saketh, S., Mounika, G., Vishal, M., & Hemanth, M. (2018). IOT Based Intelligent Street Lighting System for Smart City. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7, 345–347. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.32.15709>
- Bhardwaj, V., Anooja, A., Vermani, L. S., Sunita, & Dhaliwal, B. K. (2024). Smart cities and the IoT: an in-depth analysis of global research trends and future directions. *Discover Internet of Things*, 4(1), 1–21. <https://tinyurl.com/2m52v7ka>
- Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. *Sustainable Cities and Society*, 31, 183–212. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2017.02.016>
- Bohli, A., & Bouallegue, R. (2016). Stochastic geometry model to analyze 5G energy efficiency based on a novel dynamic spectrum access scheme. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 27(12), 1715–1728. <https://doi.org/10.1002/ETT.3127>
- Boreham, J. (2023, June 13). *3 Digital Twin Challenges and How They Affect The Industry*.  
<https://tinyurl.com/3sn3ewh5>
- Borges, A. F. S., Laurindo, F. J. B., Spínola, M. M., Gonçalves, R. F., & Mattos, C. A. (2021). The strategic use of artificial intelligence in the digital era: Systematic literature review and future research directions. *International Journal of Information Management*, 57, 102225. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2020.102225>
- Botín-Sanabria, D. M., Mihaita, S., Peimbert-García, R. E., Ramírez-Moreno, M. A., Ramírez-Mendoza, R. A., & Lozoya-Santos, J. de J. (2022). Digital Twin Technology Challenges and Applications: A Comprehensive Review. *Remote Sensing 2022*, Vol. 14, Page 1335, 14(6), 1335. <https://doi.org/10.3390/RS14061335>
- Bottani, E., & Vignali, G. (2019). Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *IJSE Transactions*, 51(3), 284–310. <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244>
- Bouzguenda, I., Alalouch, C., & Fava, N. (2019). Towards smart sustainable cities: A review of the role digital citizen participation could play in advancing social sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 50, 101627. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101627>
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2011). Thriving in the automated economy. *Futurist*, 46(2). <https://tinyurl.com/5x2ukjwm>

- Ceruti, A., Marzocca, P., Liverani, A., & Bil, C. (2019). Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(4), 516–526. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2019.02.001>
- Chalmers, R., & Grangel, R. (2008). Methodology for the implementation of knowledge management systems. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 59(5), 742–755. <https://doi.org/10.1002/ASI.20785>
- Charles Atkins. (2017, December 8). *Human Rights During the Industrial Revolution / Neologikon*. <https://tinyurl.com/yya3dyjj>
- Chataut, R., Phoummalayvane, A., & Akl, R. (2023). Unleashing the Power of IoT: A Comprehensive Review of IoT Applications and Future Prospects in Healthcare, Agriculture, Smart Homes, Smart Cities, and Industry 4.0. *Sensors 2023, Vol. 23, Page 7194*, 23(16), 7194. <https://doi.org/10.3390/S23167194>
- Ciampa, F., Seifollahi-Aghmiuni, S., Kalantari, Z., & Ferreira, C. S. S. (2021). Flood Mitigation in Mediterranean Coastal Regions: Problems, Solutions, and Stakeholder Involvement. *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 10474*, 13(18), 10474. <https://doi.org/10.3390/SU131810474>
- Coccossis, H., & Tsartas, P. (2019). *Βιώσιμη τουριστική ανάπτυξη και περιβάλλον*.
- Culot, G., Fattori, F., Podrecca, M., & Sartor, M. (2019). Addressing Industry 4.0 Cybersecurity Challenges. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3). <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2927559>
- Curry, D. (2017, July 26). *ARM: One trillion IoT devices by 2035, \$5 trillion in market value*. <https://readwrite.com/arm-iot-2035-dl1/>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383–394. <https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2018.08.019>
- Damiani, L., Revetria, R., & Morra, E. (2020). Safety in industry 4.0: The multi-purpose applications of augmented reality in digital factories. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 5(2), 248–253. <https://doi.org/10.25046/AJ050232>
- Dani, A. A. H., Supangkat, S. H., Lubis, F. F., Nugraha, I. G. B. B., Kinanda, R., & Rizkia, I. (2023). Development of a Smart City Platform Based on Digital Twin Technology for Monitoring and Supporting Decision-Making. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 14002*, 15(18), 14002. <https://doi.org/10.3390/SU151814002>
- Danton, T. (2021). The true story behind the IBM Personal Computer. *ITPro*. <https://tinyurl.com/3t727r52>
- Demirel, D. (2023). The Impact of Managing Diversity on Building the Smart City A Comparison of Smart City Strategies: Cases From Europe, America, and Asia. <https://doi.org/10.1177/21582440231184971>, 13(3). <https://doi.org/10.1177/21582440231184971>
- Deng, T., Zhang, K., & Shen, Z. J. (Max). (2021). A systematic review of a digital twin city: A new pattern of urban governance toward smart cities. *Journal of Management Science and Engineering*, 6(2), 125–134. <https://doi.org/10.1016/J.JMSE.2021.03.003>
- Din, I. U., Guizani, M., Rodrigues, J. J. P. C., Hassan, S., & Korotaev, V. V. (2019). Machine learning in the Internet of Things: Designed techniques for smart cities. *Future Generation Computer Systems*, 100, 826–843. <https://doi.org/10.1016/J.FUTURE.2019.04.017>
- Dipak S, G., & P.S, A. (2022). *ICT and Digital Technology based Solutions for Smart City Challenges and Opportunities*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.5860810>

- Dogan, Ö., Sahin, O., & Karaarslan, E. (2021). *Digital Twin Based Disaster Management System Proposal: DT-DMS*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.17245>
- DUET. (2022). *DUET | digital urban european twins*. DUET | Digital Urban European Twins. <https://www.digitalurbantwins.com/>
- Durão, L. F. C. S., Haag, S., Anderl, R., Schützer, K., & Zancul, E. (2018). Digital twin requirements in the context of industry 4.0. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 540, 204–214. <https://tinyurl.com/3tw3xdhs>
- El-Agamy, R. F., Sayed, H. A., AL Akhatatneh, A. M., Aljohani, M., & Elhosseini, M. (2024). Comprehensive analysis of digital twins in smart cities: a 4200-paper bibliometric study. *Artificial Intelligence Review* 2024 57:6, 57(6), 1–54. <https://doi.org/10.1007/S10462-024-10781-8>
- Elahi, H., Wang, G., Peng, T., & Chen, J. (2019). On Transparency and Accountability of Smart Assistants in Smart Cities. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 5344, 9(24), 5344. <https://doi.org/10.3390/APP9245344>
- Elmamy, S. B., Mrabet, H., Gharbi, H., Jemai, A., & Trentesaux, D. (2020). A Survey on the Usage of Blockchain Technology for Cyber-Threats in the Context of Industry 4.0. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 9179, 12(21), 9179. <https://doi.org/10.3390/SU12219179>
- Embarak, O. (2021). Smart City Transition Pillars With Layered Applications Architecture. *Procedia Computer Science*, 191, 57–64. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.07.011>
- Ersoy, P. (2015). *Intelligent Transportation Systems and Their Applications in Road Transportation Industry in Turkey*. <https://tinyurl.com/367n94xt>
- Esmaili Gorjan, H., & Gil Jiménez, V. P. (2024). Improving Indoor WiFi Localization by Using Machine Learning Techniques. *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 6293, 24(19), 6293. <https://doi.org/10.3390/S24196293>
- Evangelou, T., Gkeli, M., & Potsiou, C. (2022). Building Digital Twins for Smart Cities: A Case Study in Greece. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10(4/W2-2022), 61–68. <https://tinyurl.com/36hb3765>
- Featherly, K. (2024, July 15). *ARPANET | Definition, Map, Cold War, First Message, & History | Britannica*. <https://www.britannica.com/topic/ARPANET>
- Feng, H., Lv, H., & Lv, Z. (2023). Resilience towarded Digital Twins to improve the adaptability of transportation systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 173, 103686. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2023.103686>
- Ferguson, S. (2020). *Apollo 13: The first digital twin - Simcenter*. <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/apollo-13-the-first-digital-twin/>
- Floerkemeier, C., & Lampe, M. (2005). RFID middleware design: Addressing application requirements and RFID constraints. *ACM International Conference Proceeding Series*, 121, 219–224. <https://doi.org/10.1145/1107548.1107603>
- Fortino, G., & Savaglio, C. (2023). Integration of Digital Twins & Internet of Things. In *The Digital Twin* (Vol. 1). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21343-4_8)
- Foundation, U. S. N. S. (2005, May 19). *Analysis of the Sumatra-Andaman Earthquake Reveals Longest Fault Rupture Ever | NSF - National Science Foundation*. [https://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=104179](https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=104179)
- Fuller, A. (2020). Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. *IEEE ACCESS*. <https://ieeexplore.ieee.org/ielx7/6287639/8948470/09103025.pdf>
- 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>

- Gaur, A., Gaur, A., & Simonovic, S. P. (2018). Future changes in flood hazards across Canada under a changing climate. *Water (Switzerland)*, 10(10).  
<https://doi.org/10.3390/W10101441>
- Ghaith, M., Yosri, A., & El-Dakhakhni, W. (2021). *Digital Twin: A City-Scale Flood Imitation Framework*. <https://tinyurl.com/mrvzx9st>
- GOVTEC, S. (2017, March 28). *5 things to know about Virtual Singapore*.  
<https://www.tech.gov.sg/media/technews/5-things-to-know-about-virtual-singapore/>
- Goyal, J. (2023, May 10). *Singapore: World's Smartest City - A Model for Urban Transformation*. <https://www.novatr.com/blog/singapore-world-smartest-city>
- Gracias, J. S., Parnell, G. S., Specking, E., Pohl, E. A., & Buchanan, R. (2023). Smart Cities—A Structured Literature Review. In *Smart Cities* (Vol. 6, Issue 4).  
<https://doi.org/10.3390/smartcities6040080>
- Grau, A., Indri, M., Bello, L. L., & Sauter, T. (2017). Industrial robotics in factory automation: From the early stage to the Internet of Things. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 6159–6164.  
<https://doi.org/10.1109/IECON.2017.8217070>
- Groumpos, P. P. (2014). Large Scale Systems and Fuzzy Cognitive Maps: A critical overview of challenges and research opportunities. *Annual Reviews in Control*, 38(1), 93–102. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2014.03.009>
- Halúsková, B. (2023). Digital Twin in Smart City. *Transportation Research Procedia*, 74, 1471–1478. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2023.11.308>
- Hinings, B., Gegenhuber, T., & Greenwood, R. (2018). Digital innovation and transformation: An institutional perspective. *Information and Organization*, 28(1), 52–61. <https://doi.org/10.1016/J.INFOANDORG.2018.02.004>
- Hoang, A. T., Pham, V. V., & Nguyen, X. P. (2021). Integrating renewable sources into energy system for smart city as a sagacious strategy towards clean and sustainable process. *Journal of Cleaner Production*, 305, 127161.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127161>
- Holdowsky, J., Mahto, M., Raynor, M., & Cotteleer, M. (2015). Inside the Internet of Things (IoT). *Deloitte University Press*, 71(2).
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 119–132.  
<https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2019.05.021>
- Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville, H. J. (2018). Deep learning. *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 19(1–2), 305–307.  
[http://imlab.postech.ac.kr/dkim/class/csed514\\_2019s/DeepLearningBook.pdf](http://imlab.postech.ac.kr/dkim/class/csed514_2019s/DeepLearningBook.pdf)
- Interaction Design Foundation. (2024, March 20). *What is The Fourth Industrial Revolution? — updated 2024 | IxDF*. <https://tinyurl.com/2y3u3pdb>
- Ismagilova, E., Hughes, L., Dwivedi, Y. K., & Raman, K. R. (2019). Smart cities: Advances in research—An information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 47, 88–100. <https://doi.org/10.1016/J.IJINFOMGT.2019.01.004>
- Jafari, M., Kavousi-Fard, A., Chen, T., & Karimi, M. (2023). A Review on Digital Twin Technology in Smart Grid, Transportation System and Smart City: Challenges and Future. *IEEE Access*, 11, 17471–17484.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3241588>
- James Wilson, H., & Daugherty, P. R. (2018). Collaborative intelligence: Humans and AI are joining forces. In *Harvard Business Review* (Vol. 2018, Issue July-August).  
<https://tinyurl.com/y37yk3mf>



- Javaid, M., Haleem, A., Pratap Singh, R., Khan, S., & Suman, R. (2021). Blockchain technology applications for Industry 4.0: A literature-based review. *Blockchain: Research and Applications*, 2(4), 100027. <https://doi.org/10.1016/J.BCRA.2021.100027>
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R., & Gonzalez, E. S. (2022). Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, 203–217. <https://doi.org/10.1016/J.SUSOC.2022.01.008>
- João, B., Souza, C., & Serralvo, F. (2020). A systematic review of smart cities and the internet of things as a research topic. *Cadernos EBAPE.BR*, 17, 1–16. <https://doi.org/10.1590/1679-395174442x>
- Joss, S. (2018). Future cities: asserting public governance. *Palgrave Communications* 2018 4:1, 4(1), 1–4. <https://doi.org/10.1057/s41599-018-0087-7>
- Jung, C., Kim, K., Seo, J., Silva, B. N., & Han, K. (2017). Topology Configuration and Multihop Routing Protocol for Bluetooth Low Energy Networks. *IEEE Access*, 5, 9587–9598. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2707556>
- Kaltscheuer, C. (2020, May 5). *Nicolaus August Otto* / Portal Rheinische Geschichte. <https://tinyurl.com/4ekj39sy>
- Kambatla, K., Kollias, G., Kumar, V., & Grama, A. (2014). Trends in big data analytics. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 74(7). <https://doi.org/10.1016/j.jpdc.2014.01.003>
- Kantaros, A., & Ganetsos, T. (2024). Integration of Cyber-Physical Systems, Digital Twins, and 3D Printing in Advanced Manufacturing: A Synergistic Approach. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(1), 1–22. <https://doi.org/10.3844/AJEASSP.2024.1.22>
- Kassim, M., & Bakar, A. S. A. A. (2021). The Design Of Augmented Reality Using Unity 3d Image Marker Detection For Smart Bus Transportation. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 15(17), 33–48. <https://doi.org/10.3991/IJIM.V15I17.22071>
- Khalid Rasheed, M. (2021, April). (PDF) *THE DARK SIDE OF INDUSTRIAL REVOLUTION 4.0- IMPLICATIONS AND SUGGESTIONS*. <https://tinyurl.com/mvth789t>
- Khan, S., Arslan, T., & Ratnarajah, T. (2022). Digital Twin Perspective of Fourth Industrial and Healthcare Revolution. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3156062>
- Kiel, D., Müller, J. M., Arnold, C., & Voigt, K. I. (2017). Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry 4.0. *International Journal of Innovation Management*, 21(8). <https://doi.org/10.1142/S1363919617400151>
- Korczak, J., & Kijewska, K. (2019). Smart Logistics in the development of Smart Cities. *Transportation Research Procedia*, 39, 201–211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.022>
- Krajzewicz, D., Hertkorn, G., Feld, C., & Wagner, P. (2002). SUMO (Simulation of Urban MObility); An open-source traffic simulation. In *4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM2002)*.
- Kumar, T. M. V., & Dahiya, B. (2017). *Smart Economy in Smart Cities* (pp. 3–76). [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1610-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1610-3_1)
- Kumari, N., Sharma, A., Tran, B., Chilamkurti, N., & Alahakoon, D. (2023). A Comprehensive Review of Digital Twin Technology for Grid-Connected Microgrid Systems: State of the Art, Potential and Challenges Faced. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 5525, 16(14), 5525. <https://doi.org/10.3390/EN16145525>

- Lai, Z.-H., Tao, W., Leu, M. C., & Yin, Z. (2020). Smart augmented reality instructional system for mechanical assembly towards worker-centered intelligent manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 55, 69–81.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.02.010>
- Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B., & Uriarte-Gallastegi, N. (2021). Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128944.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128944>
- Lee, A. C. K., Jordan, H. C., & Horsley, J. (2015). Value of urban green spaces in promoting healthy living and wellbeing: Prospects for planning. *Risk Management and Healthcare Policy*, 8, 131–137. <https://doi.org/10.2147/RMHP.S61654>
- Lee, E. (2007). *Computing Foundations and Practice for Cyber Physical Systems: A Preliminary Report*. <https://tinyurl.com/3j4ycend>
- Levine, N. M., & Spencer, B. F. (2022). Post-Earthquake Building Evaluation Using UAVs: A BIM-Based Digital Twin Framework. *Sensors 2022, Vol. 22, Page 873*, 22(3), 873.  
<https://doi.org/10.3390/S22030873>
- Li, B., & Tan, W. (2023). A novel framework for integrating solar renewable source into smart cities through digital twin simulations. *Solar Energy*, 262, 111869.  
<https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2023.111869>
- lipsey, richard g. (2007). Creating the twentieth century: technical innovations of 1867–1914 and their lasting impact – By Vaclav Smil Transforming the twentieth century: technical innovations and their consequences – By Vaclav Smil. *The Economic History Review*, 60(2). [https://doi.org/10.1111/j.1468-0289.2007.00384\\_27.x](https://doi.org/10.1111/j.1468-0289.2007.00384_27.x)
- Liu, Q., & Zhang, R. (2020). Green Energy Development System under the Background of Environmental Sustainability. *Energy Engineering*, 118(1), 173–187.  
<https://doi.org/10.32604/EE.2020.012788>
- Loh, J. R., & Bellam, S. (2024). Towards net zero: Evaluating energy security in Singapore using system dynamics modelling. *Applied Energy*, 358, 122537.  
<https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2023.122537>
- Lueth, K. L. (2018, September 8). *State of the IoT 2018: Number of IoT devices now at 7B – Market accelerating*. <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-update-q1-q2-2018-number-of-iot-devices-now-7b/>
- Mankowski, R. (2020, February 17). *City-scale digital twins for flood resilience | GIM International*. <https://www.gim-international.com/content/article/city-scale-digital-twins-for-flood-resilience>
- MarketsandMarkets. (2023, July). *Digital Twin Market Size, Share, Industry Trends Report 2028*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/digital-twin-market-225269522.html>
- Masik, G., Sagan, I., & Scott, J. W. (2021). Smart City strategies and new urban development policies in the Polish context. *Cities*, 108, 102970.  
<https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2020.102970>
- McKinsey Global Institute. (2018, June 5). *Smart city technology for a more liveable future | McKinsey*. <https://tinyurl.com/yc7jm4hh>
- Mehta, P., Abraham, A., Vyas, P., Usman, M., Agatheswaran, R. S., Shashwat, & Dauwels, J. (2019). *Utilizing virtual Singapore platform to quantify benefits of autonomous vehicles*. <https://dr.ntu.edu.sg/handle/10356/152699>
- Michael Rüßmann, M. L. P. G. M. W. P. E. M. H. J. J. (2015, April 9). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*. <https://tinyurl.com/43fyehtj>

- Mikalef, P., Boura, M., Lekakos, G., & Krogstie, J. (2019). Big data analytics and firm performance: Findings from a mixed-method approach. *Journal of Business Research*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.044>
- Milner, G. (2021). *A South Korean city becomes uses GIS to become a truly smart city*. <https://tinyurl.com/7yxfwtbn>
- Modoni, G. E., Caldarola, E. G., Sacco, M., & Terkaj, W. (2019). Synchronizing physical and digital factory: benefits and technical challenges. *Procedia CIRP*, 79, 472–477. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2019.02.125>
- Mohajan, H. (2021). *Third Industrial Revolution Brings Global Development*. 7, 239–251. <https://tinyurl.com/29vp83ef>
- Mohammed, F., Idries, A., Mohamed, N., Al-Jaroodi, J., & Jawhar, I. (2014). UAVs for smart cities: Opportunities and challenges. *2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2014 - Conference Proceedings*, 267–273. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2014.6842265>
- Mohanty, S. P., Choppali, U., & Kougianos, E. (2016). Everything you wanted to know about smart cities: The Internet of things is the backbone. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 5(3), 60–70. <https://doi.org/10.1109/MCE.2016.2556879>
- Mokyr, J., & Strotz, R. H. (2000). *The Second Industrial Revolution , 1870-1914*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16047909>
- Montes, J. (2020). A Historical View of Smart Cities: Definitions, Features and Tipping Points. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/SSRN.3637617>
- Monzon, A. (2015). Smart cities concept and challenges: Bases for the assessment of smart city projects. *2015 International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*, 1–11.
- Mora, L., Deakin, M., & Reid, A. (2019). Strategic principles for smart city development: A multiple case study analysis of European best practices. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 70–97. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2018.07.035>
- Motogaito, A., Mathew, J., Ozioko, O., Singh, R. K., Zhang, X., Riaz, K., McAfee, M., & Gharbia, S. S. (2023). Management of Climate Resilience: Exploring the Potential of Digital Twin Technology, 3D City Modelling, and Early Warning Systems. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2659, 23(5), 2659. <https://doi.org/10.3390/S23052659>
- Murphy, K. P. (2012). Machine learning: a probabilistic perspective (adaptive computation and machine learning series). In *Mit Press*. ISBN (Vol. 621485037). <https://tinyurl.com/ybt6rz9d>
- Musa, A. A., Malami, S. I., Alanazi, F., Ounaies, W., Alshammari, M., & Haruna, S. I. (2023). Sustainable Traffic Management for Smart Cities Using Internet-of-Things-Oriented Intelligent Transportation Systems (ITS): Challenges and Recommendations. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 9859, 15(13), 9859. <https://doi.org/10.3390/SU15139859>
- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., & Munoz, L. (2021a). Digital Twins from Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. *IEEE Access*, 9, 143222–143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>
- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., & Munoz, L. (2021b). Digital Twins from Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. *IEEE Access*, 9, 143222–143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>
- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., & Munoz, L. (2021c). Digital Twins from Smart Manufacturing to Smart Cities: A Survey. *IEEE Access*, 9, 143222–143249. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120843>



- Napoleone, A., Macchi, M., & Pozzetti, A. (2020). A review on the characteristics of cyber-physical systems for the future smart factories. *Journal of Manufacturing Systems*, 54, 305–335. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.007>
- Nathali, B., Jung, C., Kang, J., Seo, J., Kim, J., Han, K., Khan, M., Jin, S., & Yoon, Y. (2016). *Planning of smart cities Performance improvement using big data analytics approach*. 51–55. <https://doi.org/10.15224/978-1-63248-113-9-11>
- Nations, U. (2020). *Generating power / United Nations*. <https://www.un.org/en/climatechange/climate-solutions/cities-pollution>
- Nikishina, L. B. (2023). Industry 4.0: history of emergence, development, prospects of transformation into Industry 5.0. *E3S Web of Conferences*, 458. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345806023>
- Nilssen, M. (2019). To the smart city and beyond? Developing a typology of smart urban innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 142, 98–104. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2018.07.060>
- Okonta, D. E., & Vukovic, V. (2024). Smart cities software applications for sustainability and resilience. *Heliyon*, 10(12), e32654. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E32654>
- Olsen, C. (2022). An Overview of Key Sustainability Theories, Regulations and S ERP for Business Education, Business Research and Digital Business Practitioners. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 423 LNNS, 584–592. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-93464-4\\_57](https://doi.org/10.1007/978-3-030-93464-4_57)
- Olsen, T. L., & Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing and Service Operations Management*, 22(1). <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0796>
- Orenga-Roglá, S., & Chalmeta, R. (2019). Framework for implementing a big data ecosystem in organizations. *Communications of the ACM*, 62(1), 58–65. <https://doi.org/10.1145/3210752>
- Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019a). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113, 103125. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2019.103125>
- Pacchini, A. P. T., Lucato, W. C., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019b). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113, 103125. <https://doi.org/10.1016/J.COMPIND.2019.103125>
- Pandiyar, P., Saravanan, S., Usha, K., Kannadasan, R., Alsharif, M. H., & Kim, M. K. (2023). Technological advancements toward smart energy management in smart cities. *Energy Reports*, 10, 648–677. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.07.021>
- Papadima, G., Genitsaris, E., Karagiotas, I., Naniopoulos, A., & Nalmpantis, D. (2020). Investigation of acceptance of driverless buses in the city of Trikala and optimization of the service using Conjoint Analysis. *Utilities Policy*, 62, 100994. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2019.100994>
- Pareek, K., Tiwari, P., & Bhatnagar, V. (2021). Fog Computing in Healthcare: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1099, 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1099/1/012025>
- Pinochet, L. H. C., Romani, G. F., de Souza, C. A., & Rodríguez-Abitia, G. (2019). Intention to live in a smart city based on its characteristics in the perception by the young public. *Revista de Gestao*, 26(1), 73–92. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/rege-06-2018-0077/full/html>
- Prabatama, N. A., Nguyen, M. L., Hornyk, P., Mariani, S., & Laheurte, J.-M. (2024). Zigbee-Based Wireless Sensor Network of MEMS Accelerometers for Pavement

- Monitoring. *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 6487, 24(19), 6487.  
<https://doi.org/10.3390/S24196487>
- Qian, C., Liu, X., Ripley, C., Qian, M., Liang, F., & Yu, W. (2022). Digital Twin—Cyber Replica of Physical Things: Architecture, Applications and Future Research Directions. *Future Internet* 2022, Vol. 14, Page 64, 14(2), 64.  
<https://doi.org/10.3390/FI14020064>
- Raes, L., Michiels, P., Adolphi, T., Tampere, C., Dalianis, A., McAleer, S., & Kogut, P. (2022). DUET: A Framework for Building Interoperable and Trusted Digital Twins of Smart Cities. *IEEE Internet Computing*, 26(3), 43–50.  
<https://doi.org/10.1109/MIC.2021.3060962>
- Raja, D. (2019). Virtual Reality □ Opportunities and Challenges. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 7(4).  
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2019.4321>
- Ransbotham, S., Gerbert, P., Reeves, M., Kiron, D., & Spira, M. (2018). Artificial Intelligence in Business Gets Real. *MIT Sloan Management Review*.  
<https://sloanreview.mit.edu/projects/artificial-intelligence-in-business-gets-real/>
- Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., & Bakiras, S. (2021). The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic Literature Review, Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 9, 32030–32052.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>
- Riaz, K., McAfee, M., & Gharbia, S. S. (2023). Management of Climate Resilience: Exploring the Potential of Digital Twin Technology, 3D City Modelling, and Early Warning Systems. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2659, 23(5), 2659.  
<https://doi.org/10.3390/S23052659>
- Ricadela, A. (2023, December 19). *10 Core Components of Industry 4.0 | Oracle South Africa*. <https://www.oracle.com/za/industrial-manufacturing/industry-4-components/>
- Rifkin, J. (2007). *Leading the way to the hydrogen economy and a third industrial revolution*. 56, 6–7. <https://tinyurl.com/fafs4bsk>
- Ritchie, H., Samborska, V., & Roser, M. (2024, February). *Urbanization - Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/urbanization>
- Roberts, B. (2015). The Third Industrial Revolution: Implications for Planning Cities and Regions. *Working Paper Urban Frontiers*, 1.
- Roshan Agarwal. (2021, July 16). *Industrial Revolution 2.0 — Era Of Mass Production | by Society for Industrial Management and Engineering | SPARK by SIME | Medium*.  
<https://tinyurl.com/y6veerva>
- Ross, P., & Maynard, K. (2021). Towards a 4th industrial revolution. *Intelligent Buildings International*, 13(3), 159–161. <https://doi.org/10.1080/17508975.2021.1873625>
- Rudskoy, A., Ilin, I., & Prokhorov, A. (2021). Digital Twins in the Intelligent Transport Systems. *Transportation Research Procedia*, 54, 927–935.  
<https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2021.02.152>
- Sabu, C. (2024, April 19). *Virtual Singapore: A Digital Gateway to Urban Innovation*.  
<https://experionglobal.com/virtual-singapore/>
- Samasti, M., & Altan, C. (2024). *Implementing Smart Disaster Management Systems in Smart Cities*. <https://tinyurl.com/4t6kutaf>
- Sanchez, L., Muñoz, L., Galache, J. A., Sotres, P., Santana, J. R., Gutierrez, V., Ramdhany, R., Gluhak, A., Krco, S., Theodoridis, E., & Pfisterer, D. (2014). SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed. *Computer Networks*, 61, 217–238.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bjp.2013.12.020>

- Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors* 2016, Vol. 16, Page 708, 16(5), 708. <https://doi.org/10.3390/S16050708>
- Saqlain, M., Piao, M., Shim, Y., & Lee, J. Y. (2019). Framework of an IoT-based Industrial Data Management for Smart Manufacturing. *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2019, Vol. 8, Page 25, 8(2), 25. <https://doi.org/10.3390/JSAN8020025>
- Sato Duarte, A. Y., Sanches, R. A., & Dedini, F. G. (2018). Assessment and technological forecasting in the textile industry: From first industrial revolution to the Industry 4.0. *Strategic Design Research Journal*, 11(3). <https://doi.org/10.4013/sdrj.2018.113.03>
- Sauerbier, M., Siegrist, E., Eisenbeiss, H., & Demir, N. (2012). The practical application of UAV-Based photogrammetry under economic aspects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22, 45–50. <https://doi.org/10.5194/ISPRSARCHIVES-XXXVIII-1-C22-45-2011>
- Schoof, J. (2022, June 23). *A Digital Tour of Zurich*. <https://tinyurl.com/pj2pdmpp>
- Schrotter, G., & Hürzeler, C. (2020). The Digital Twin of the City of Zurich for Urban Planning. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 88(1), 99–112. <https://doi.org/10.1007/S41064-020-00092-2/FIGURES/14>
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*, by Klaus Schwab | *World Economic Forum*. <https://tinyurl.com/546h33zt>
- Sezer, O. B., Dogdu, E., & Ozbayoglu, A. M. (2018). Context-Aware Computing, Learning, and Big Data in Internet of Things: A Survey. In *IEEE Internet of Things Journal* (Vol. 5, Issue 1). <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2773600>
- Shafto, M., Conroy, M., Doyle, R., Glaessgen, E., Kemp, C., LeMoigne, J., & Wang, L. (2010). *Modeling, Simulation, Information Technology and Processing Roadmap*. <https://tinyurl.com/mrfd7f3c>
- Shahat, E., Hyun, C. T., & Yeom, C. (2021). City Digital Twin Potentials: A Review and Research Agenda. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 3386, 13(6), 3386. <https://doi.org/10.3390/SU13063386>
- Sharif, R. Al, & Pokharel, S. (2022). Smart City Dimensions and Associated Risks: Review of literature. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 77). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103542>
- Sherman, Josepha. (2003). *The history of the personal computer*. 63.
- Shmelev, S. E., & Shmeleva, I. A. (2019). Multidimensional sustainability benchmarking for smart megacities. *Cities*, 92, 134–163. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2019.03.015>
- Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2015-January*, 697–701. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2014.7058728>
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018a). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38, 697–713. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.01.053>
- Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2018b). Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 38, 697–713. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2018.01.053>
- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021a). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation* 2021, Vol. 4, Page 36, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/ASI4020036>

- Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E. P., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021b). Digital Twin: Origin to Future. *Applied System Innovation* 2021, Vol. 4, Page 36, 4(2), 36. <https://doi.org/10.3390/ASI4020036>
- Singhal, K. (2001). HISTORY OF TECHNOLOGY, MANUFACTURING, AND THE INDUSTRIAL REVOLUTION: AN ALTERNATE PERSPECTIVE ON SCHMENNER'S HYPOTHESES. *Https://Doi.Org/10.1111/j.1937-5956.2001.Tb00070.x*, 10(1), 97–102. <https://tinyurl.com/5e64374p>
- Smart City Ranking, I. (2024). *Smart City Rankings - IMD* . <https://www.imd.org/smart-city-observatory/home/rankings/>
- Smith, B. (2019). The Third Industrial Revolution: Policymaking for the Internet. *Science and Technology Law Review*, 3(0). <https://doi.org/10.7916/stlr.v3i0.3621>
- Spencer, B. F., Hoskere, V., & Narazaki, Y. (2019). Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*, 5(2), 199–222. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2018.11.030>
- Statista. (2016, November). *IoT devices installed base worldwide 2015-2025* | Statista. <https://tinyurl.com/5c3t6ekk>
- Stearns, P. N. (2018). The industrial revolution in world history: Fourth edition. *The Industrial Revolution in World History: Fourth Edition*, 1–318. <https://tinyurl.com/5n75pkm3>
- Stone, A. (2024, January 14). *Virtual Singapore Is More Than Just a 3-D Model, It's an Intelligent Rendering of the City*. <https://tinyurl.com/yu2du4y4>
- Strauss, J. A., & Allen, R. M. (2016). Benefits and costs of earthquake early warning. *Seismological Research Letters*, 87(3), 765–772. <https://doi.org/10.1785/0220150149>
- Swink, M., & Nair, A. (2007). Capturing the competitive advantages of AMT: Design–manufacturing integration as a complementary asset. *Journal of Operations Management*, 25(3), 736–754. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2006.07.001>
- Taalbi, J. (2019). Origins and pathways of innovation in the third industrial revolution. *Industrial and Corporate Change*, 28(5), 1125–1148. <https://doi.org/10.1093/ICC/DTY053>
- 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>
- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- Thames, L., & Schaefer, D. (2016). Software-defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 52, 12–17. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.07.041>
- Tomac, N., Radonja, R., & Bonato, J. (2019). Analysis of Henry Ford's contribution to production and management. *Pomorstvo*, 33(1). <https://doi.org/10.31217/p.33.1.4>
- Uhlemann, T. H. J., Lehmann, C., & Steinhilper, R. (2017). The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 61, 335–340. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2016.11.152>
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.02.034>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524. <https://doi.org/10.1016/J.DSS.2021.113524>
- Velásquez, N., Estevez, E., & Pesado, P. (2018). Cloud Computing, Big Data and the Industry 4.0 Reference Architectures. *Journal of Computer Science and Technology*, 18(03). <https://doi.org/10.24215/16666038.18.e29>



- Vlachogianni, T., & Valavanidis, A. (2013). Energy and Environmental Impact on the Biosphere Energy Flow, Storage and Conversion in Human Civilization. *American Journal of Educational Research*, 1(3). <https://doi.org/10.12691/education-1-3-2>
- Walker, A. (2023, May 4). *Singapore's digital twin – from science fiction to hi-tech reality - Infrastructure Global*. <https://infra.global/singapores-digital-twin-from-science-fiction-to-hi-tech-reality/>
- Wang, H., Li, S., Zhou, Y., Wang, Y., Pan, R., & Pang, S. (2024). Tag-Array-Based UHF Passive RFID Tag Attitude Identification of Tracking Methods. *Sensors* 2024, Vol. 24, Page 6305, 24(19), 6305. <https://doi.org/10.3390/S24196305>
- Wang, M., & Zhou, T. (2023). Does smart city implementation improve the subjective quality of life? Evidence from China. *Technology in Society*, 72, 102161. <https://doi.org/10.1016/J.TECHSOC.2022.102161>
- Warke, V., Kumar, S., Bongale, A., & Kotecha, K. (2021a). Sustainable Development of Smart Manufacturing Driven by the Digital Twin Framework: A Statistical Analysis. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 10139, 13(18), 10139. <https://doi.org/10.3390/SU131810139>
- Warke, V., Kumar, S., Bongale, A., & Kotecha, K. (2021b). Sustainable Development of Smart Manufacturing Driven by the Digital Twin Framework: A Statistical Analysis. *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 10139, 13(18), 10139. <https://doi.org/10.3390/SU131810139>
- Weger, W. van. (2022). *Singapore's journey towards a nationwide digital twin | GIM International*. <https://www.gim-international.com/content/article/singapore-s-journey-towards-a-nationwide-digital-twin>
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021a). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2020.103064>
- White, G., Zink, A., Codecá, L., & Clarke, S. (2021b). A digital twin smart city for citizen feedback. *Cities*, 110, 103064. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2020.103064>
- White, N. (2022, August 30). *Top 8 Digital Twin Benefits*. <https://www.ptc.com/en/blogs/corporate/digital-twin-benefits>
- Williamson, B. (2015). Educating the smart city: Schooling smart citizens through computational urbanism. *Http://Dx.Doi.Org/10.1177/2053951715617783*, 2(2). <https://doi.org/10.1177/2053951715617783>
- World Health Organization. (2023). *Global status report on road safety 2023*. <https://www.who.int/teams/social-determinants-of-health/safety-and-mobility/global-status-report-on-road-safety-2023>
- Xu, M., David, J. M., & Kim, S. H. (2018). The fourth industrial revolution: Opportunities and challenges. *International Journal of Financial Research*, 9(2). <https://doi.org/10.5430/ijfr.v9n2p90>
- Yamamoto, S. (2022). Analysis of Smart City Reference Architecture by ArchiMate. *Procedia Computer Science*, 207, 514–521. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2022.09.106>
- Yang, J., Yu, Y., Ma, T., Zhang, C., & Wang, Q. (2021). Evolution of energy and metal demand driven by industrial revolutions and its trend analysis. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 19(3), 256–264. <https://doi.org/10.1016/J.CJPRES.2021.12.028>
- Yu, D., & He, Z. (2022). Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: advances, challenges, and opportunities. *Natural Hazards* 2021 112:1, 112(1), 1–36. <https://doi.org/10.1007/S11069-021-05190-X>

- Zhang, Y., & Burton, H. V. (2019). Pattern recognition approach to assess the residual structural capacity of damaged tall buildings. *Structural Safety*, 78, 12–22.  
<https://doi.org/10.1016/J.STRUSAFE.2018.12.004>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017a). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017b). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616–630.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>
- Zygiaris, S. (2012). Smart City Reference Model: Assisting Planners to Conceptualize the Building of Smart City Innovation Ecosystems. *Journal of the Knowledge Economy*, 4.  
<https://doi.org/10.1007/s13132-012-0089-4>
- Κουλλόλλι, Δ. (2024, November 2). Πληθυσμός στην Ελλάδα / Greece in Figures. Greece in Figures. <https://greeceinfigures.com/plithismos>
- Λεονταρίδης, Β. (2023). *Digital twins*. <https://doi.org/10.26265/POLYNOE-3979>
- Μπασάς, Β. (2022). Τα Ψηφιακά Δίδυμα στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία έργων. Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο.
- Πανταζή, Ν. (2023). Τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων στις μεταφορές.  
<https://doi.org/10.26265/POLYNOE-4565>
- Τσαρχόπουλος, Π. (2013). *Ευφυείς Πόλεις: Τεχνολογίες, Αρχιτεκτονικές και Διακυβέρνηση του Ψηφιακού Χώρου* [Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνική Σχολή Α.Π.Θ].  
<https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/29854>