



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΔΧΤ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ψηφιακά Αντίγραφα Πόλεων και Έξυπνος Πολεοδομικός
Σχεδιασμός: Καινοτόμες Προσεγγίσεις για την Ανάπτυξη
Έξυπνων Πόλεων**

ΓΑΪΤΑΝΑΚΗ ΡΑΦΑΕΛΑ

Επιβλέπων Καθηγητής Α' : ΜΠΙΣΚΙΝΗΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια Β': ΦΑΒΒΑΤΑ ΜΑΡΙΑ

ΠΑΤΡΑ
ΜΑΪΟΣ, 2026

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2026 Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματα αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και της φοιτήτριας, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.

Στην Μαρκέλλα και στην Αλίκη

Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εξετάζει την αξιοποίηση των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων (City Digital Twins) ως εργαλείων που συμβάλλουν στον εκσυγχρονισμό του πολεοδομικού σχεδιασμού και στη μετάβαση προς πιο έξυπνες και βιώσιμες πόλεις. Τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν σύνθετα ψηφιακά μοντέλα που αναπαριστούν τον αστικό χώρο, ενσωματώνοντας δεδομένα από γεωχωρικά συστήματα, αισθητήρες και άλλες πηγές πληροφορίας, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση και ανάλυση των αστικών λειτουργιών.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο τα City Digital Twins μπορούν να ενταχθούν στον αστικό σχεδιασμό, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και ενισχύοντας τη διαφάνεια στη διαχείριση των πόλεων. Παράλληλα, εξετάζεται η συμβολή τους στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, μέσω της αποτελεσματικότερης διαχείρισης πόρων και της βελτιστοποίησης βασικών αστικών λειτουργιών, όπως η κινητικότητα και η ενεργειακή κατανάλωση.

Για την επίτευξη των στόχων της έρευνας υιοθετείται ποιοτική μεθοδολογική προσέγγιση, η οποία βασίζεται σε βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση διεθνών πρακτικών. Η μελέτη επικεντρώνεται σε επιλεγμένες ευρωπαϊκές πόλεις, όπως η Βαρκελώνη, το Ελσίνκι και το Άμστερνταμ, οι οποίες έχουν αναπτύξει προηγμένες εφαρμογές ψηφιακών διδύμων. Μέσα από τη συγκριτική διερεύνηση αυτών των παραδειγμάτων αναδεικνύονται διαφορετικά μοντέλα υλοποίησης, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία τους.

Στο πλαίσιο της εργασίας εξετάζεται επίσης η δυνατότητα εφαρμογής των ψηφιακών διδύμων σε ελληνικό περιβάλλον, μέσω της μελέτης περίπτωσης της Καλαμάτας. Η ανάλυση βασίζεται σε διαθέσιμα δεδομένα και στρατηγικές κατευθύνσεις της πόλης, με στόχο τη διαμόρφωση προτάσεων που λαμβάνουν υπόψη τις τοπικές ιδιαιτερότητες και τις υφιστάμενες υποδομές.

Τα ευρήματα της έρευνας καταδεικνύουν ότι τα City Digital Twins μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό εργαλείο για την υποστήριξη του σχεδιασμού και της διακυβέρνησης, επιτρέποντας την προσομοίωση σεναρίων, τη βελτίωση της αποδοτικότητας των παρεμβάσεων και την ενίσχυση της διαφάνειας. Ωστόσο,

επισημαίνεται ότι η επιτυχής εφαρμογή τους εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα δεδομένων, την τεχνολογική υποδομή και τη θεσμική ετοιμότητα των φορέων.

Η πρωτοτυπία της εργασίας έγκειται στη σύνδεση της τεχνολογικής διάστασης των ψηφιακών διδύμων με τις ανάγκες του ελληνικού αστικού σχεδιασμού, καθώς και στη διατύπωση προτάσεων που γεφυρώνουν τη θεωρία με την πρακτική εφαρμογή. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία συμβάλλει στη συζήτηση για την ανάπτυξη πιο αποδοτικών, διαφανών και βιώσιμων πόλεων.

Λέξεις- Κλειδιά

Ψηφιακά Δίδυμα, Ψηφιακά Δίδυμα Πόλεων, DTSC, Έξυπνες Πόλεις, Πολεοδομικός Σχεδιασμός, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS), Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), Βιώσιμη Αστική Ανάπτυξη, Αστική Καινοτομία

Abstract

This Master's thesis explores the role of City Digital Twins as emerging tools for supporting contemporary urban planning and advancing smart city development. City Digital Twins are complex digital representations of urban environments that integrate data from multiple sources, including geospatial systems, sensor networks, and other digital infrastructures, enabling continuous monitoring, analysis, and simulation of urban processes.

The main objective of this study is to investigate how City Digital Twins can be effectively incorporated into urban planning practices, contributing to evidence-based decision-making, improved governance transparency, and enhanced quality of life for citizens. Particular emphasis is placed on understanding both the technological foundations and the institutional conditions required for their successful implementation.

The research adopts a qualitative methodological approach, combining a comprehensive literature review with a comparative analysis of selected international case studies. Specifically, the study examines European cities such as Barcelona, Helsinki, and Amsterdam, which have developed advanced digital twin initiatives. Through this comparative perspective, key success factors, implementation strategies, and existing challenges are identified.

In addition, the thesis includes a case study focusing on the city of Kalamata, aiming to assess the potential application of a City Digital Twin within the context of a medium-sized Greek city. The analysis is based on available secondary data, strategic planning documents, and existing digital initiatives, leading to the formulation of context-specific policy recommendations.

The findings of the research indicate that City Digital Twins can significantly enhance urban planning processes by enabling scenario testing, optimizing resource management, and supporting more transparent and data-driven governance. However, their effective deployment depends on several critical factors, including data availability, technological infrastructure, and institutional readiness.

The originality of this thesis lies in its integrative approach, which connects technological analysis with urban governance and policy considerations. By bridging international practices with the Greek urban context, the study provides a comprehensive framework for understanding the potential of City Digital Twins and supports their future application in the development of more sustainable, resilient, and inclusive cities.

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	5
Κατάλογος Εικόνων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
Συντομογραφίες	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας	13
1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα	15
1.3 Μεθοδολογική Προσέγγιση	15
1.4 Δομή και περιεχόμενο της Δ.Ε	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	18
2.1 Έξυπνες πόλεις.....	18
2.1.1. Ορισμοί και χαρακτηριστικά	18
2.1.2 Διαχείριση πόρων και βιωσιμότητα.....	19
2.1.3 Ευρωπαϊκή πολιτική και πρωτοβουλίες.....	20
2.2 Ψηφιακό Δίδυμο	24
2.2.1 Εξέλιξη και ορισμοί της τεχνολογίας.....	24
2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και δομή ενός Ψηφιακού Διδύμου	24
2.2.3 Συσχέτιση με τεχνολογίες IoT, Big Data, AI, GIS, BIM.....	26
2.3 Ψηφιακό Δίδυμο πόλης (City Digital Twin).....	29
2.3.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά πόλεων	29
2.3.2 Εφαρμογές στον αστικό χώρο.....	32
2.3.3 Συλλογή Δεδομένων και σύνθεση δεδομένων για τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων πόλεων	33

2.3.4 Εφαρμογές και διεθνείς περιπτώσεις	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μεθοδολογία	37
3.1 Στόχος της εργασίας.....	37
3.2 Μέθοδοι συλλογής δεδομένων	37
3.3 Επιλογή υπό μελέτης πόλεων (κριτήρια- αιτιολόγηση).....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Ανάλυση Διεθνών Παραδειγμάτων	39
4.2 Βαρκελώνη.....	39
4.2.1 Στρατηγική και έργο CDT	39
4.2.2 Εφαρμογές CDT στη Βαρκελώνη.....	44
4.3 Ελσίνκι.....	45
4.3.1 Helsinki 3d	45
4.3.1.1 Εξέλιξη της τρισδιάστατης αστικής μοντελοποίησης στο Ελσίνκι	45
4.3.1.2 Επιμέρους συνιστώσες του Helsinki 3D.....	47
4.3.1.3 Η πλατφόρμα Helsinki 3D: Δυνατότητες και εφαρμογές.....	50
4.3.2 Εφαρμογές στον πολεοδομικό σχεδιασμό	52
4.4 Άμστερνταμ	56
4.4.1 Amsterdam 3D και Netherlands3D ως εργαλεία πολεοδομικού σχεδιασμού	56
4.4.2 Μοντέλα και διαχείριση δεδομένων	57
4.5 Συγκριτική ανάλυση – Συμπεράσματα	60
4.5.1 Κοινά χαρακτηριστικά και καλές πρακτικές	60
4.5.2 Συμπεράσματα από τη διεθνή εμπειρία	62
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ	62
5.1 Εισαγωγή και βασικά χαρακτηριστικά της πόλης	62

5.2 Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης (τεχνολογική υποδομή, στρατηγικές, έργα).....	64
5.3 Δυνατότητες ανάπτυξης City Digital Twin στην Καλαμάτα.....	68
5.3.1 Τομείς εφαρμογής (κυκλοφορία, ενέργεια, περιβάλλον, τουρισμός).....	68
5.3.2 Πηγές δεδομένων και ψηφιακά εργαλεία	70
5.4 Προτεινόμενο πλαίσιο ανάπτυξης	72
5.4.1 Φάσεις υλοποίησης και εμπλεκόμενοι φορείς	72
5.4.2 Συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού φορέα.....	74
5.4.3 Κοινωνική συμμετοχή και διαφάνεια	76
5.5 SWOT Ανάλυση για την ανάπτυξη City Digital Twin στην Καλαμάτα	79
5.6 Αποτίμηση της προτεινόμενης στρατηγικής.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα	84
6.1 Σύνοψη βασικών ευρημάτων	84
6.2 Ερευνητική συνεισφορά και πρακτική αξία	85
6.3 Προτάσεις πολιτικής για έξυπνες ελληνικές πόλεις	87
6.3.1 Θεσμικό και στρατηγικό μοντέλο (πρότυπο Βαρκελώνης)	87
6.4 Μελλοντικές προοπτικές ,επεκτάσεις και περιορισμοί της έρευνας.....	88
6.4.1 Μελλοντικές προοπτικές και επεκτάσεις.....	88
6.4.2 Περιορισμοί της έρευνας	90
Βιβλιογραφία	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	96

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1 Συνδυασμός Τεχνολογιών σε Ψηφιακά Δίδυμα για Έξυπνες Πόλεις	29
Εικόνα 2 Στόχοι έξυπνης πόλης.....	31
Εικόνα 3 Πληροφορίες κτιρίων στο ψηφιακό δίδυμο.....	51
Εικόνα 4 Πολεοδομικό σχέδιο Munkkiniemi–Haaga (1915)	52
Εικόνα 5 3d απεικόνιση κτιρίων με υφές υλικών	53
Εικόνα 6 Απεικόνιση ηλιακής ακτινοβολίας και ετήσιο διάγραμμα	54
Εικόνα 7 Υπολογισμός οικονομικής αποδοτικότητας φωτοβολταϊκών	54
Εικόνα 8 Εισαγωγή έργου στο CDT για διαβούλευση	55
Εικόνα 9 Netherlands City digital twin.....	57
Εικόνα 10 Amsterdam 3d BAG	58
Εικόνα 11 Πληροφορίες κτιρίων	59
Εικόνα 12 Gis Δήμου Καλαμάτας	65
Εικόνα 13 Απεικόνιση χρήσεων γης.....	66
Εικόνα 14 Kalamata vision map	66
Εικόνα 15 Ηλιακή απόδοση.....	67
Εικόνα 16 Εκπομπή CO2.....	67
Εικόνα 17 SWOT ανάλυση για την ανάπτυξη City Digital Twin στην Καλαμάτα.....	81

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας εφαρμογής City Digital Twin.....	61
Πίνακας 2 Βασικοί τομείς εφαρμογής ενός City Digital Twin στην Καλαμάτα	70
Πίνακας 3 Σύνδεση διεθνών προτύπων City Digital Twins με προτεινόμενες πολιτικές και πιθανές εφαρμογές στον ελληνικό αστικό χώρο.	88

Συντομογραφίες

AI	– Artificial Intelligence (Τεχνητή Νοημοσύνη)
AR	– Augmented Reality (Επαυξημένη Πραγματικότητα)
BIM	– Building Information Modeling (Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κτιρίων)
Big Data	– Μεγάλα Δεδομένα
CAD	– Computer-Aided Design (Σχεδίαση με Υπολογιστή)
DT	– Digital Twin (Ψηφιακό Αντίγραφο)
GIS	– Geographic Information Systems (Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών)
GPS	– Global Positioning System (Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης)
ICT	– Information and Communication Technologies (Τεχνολογίες Πληροφορίας και Επικοινωνιών)
IoT	– Internet of Things (Διαδίκτυο των Πραγμάτων)
LiDAR	– Light Detection and Ranging (Ανίχνευση και Μέτρηση με Φως)
ML	– Machine Learning (Μηχανική Μάθηση)
3D	– Three-Dimensional (Τρισδιάστατος)
VR	– Virtual Reality (Εικονική Πραγματικότητα)
UAV	– Unmanned Aerial Vehicle (Μη Επανδρωμένο Αεροσκάφος)
SDGs	– Sustainable Development Goals (Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης)
Smart City	– Έξυπνη Πόλη
Urban Analytics	– Ανάλυση Αστικών Δεδομένων
Cloud Computing	– Υπολογιστικό Νέφος
Edge Computing	– Υπολογισμός Αιχμής
Blockchain	– Αλυσίδα Μπλοκ
OBJ	– Wavefront Object File (Αρχείο τρισδιάστατης γεωμετρίας)
3MX	– 3D Mesh Format (Μορφή τρισδιάστατου πλέγματος πόλης – Esri)
CityGML	– City Geography Markup Language (Γλώσσα σήμανσης τρισδιάστατων μοντέλων πόλης)
LDT	– Local Digital Twin (Τοπικό Ψηφιακό Αντίγραφο)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της εργασίας

Τα Ψηφιακά Δίδυμα Πόλεων (Urban Digital Twins- UDTs) μετασχηματίζουν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις σχεδιάζονται και διαχειρίζονται. Σε αυτές τις ψηφιακές αναπαραστάσεις του αστικού χώρου, ενσωματώνονται δεδομένα από ποικίλες πηγές, όπως αισθητήρες, δίκτυα IoT, γεωχωρικά συστήματα (GIS) και κοινωνικοοικονομικές βάσεις, επιτρέποντας παράλληλα την προσομοίωση και την αξιολόγηση πολεοδομικών παρεμβάσεων πριν αυτές υλοποιηθούν στο πραγματικό περιβάλλον. Μέσα από τη δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και πρόβλεψης μελλοντικών εξελίξεων, τα Ψηφιακά Δίδυμα παρέχουν στους φορείς δημόσιας διοίκησης τη δυνατότητα λήψης αποφάσεων βασισμένων σε δεδομένα (evidence-based decision making), ενισχύοντας έτσι την αποτελεσματικότητα των στρατηγικών και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. (Euro Cities, 2025)

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των δυνατοτήτων εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων στον σύγχρονο πολεοδομικό σχεδιασμό.

Σκοπός της είναι να διερευνήσει σε βάθος την τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων και τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους ως εργαλείο πολεοδομικού σχεδιασμού στο πλαίσιο ανάπτυξης έξυπνων πόλεων. Η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τον τρόπο με τον οποίο η τεχνολογία αυτή μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, την ενίσχυση της διαφάνειας και στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στη διαχείριση του αστικού χώρου.

Παράλληλα, η εργασία αποσκοπεί στην καταγραφή και ανάλυση διεθνών πρακτικών εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων σε ευρωπαϊκές πόλεις που έχουν αναπτύξει ώριμες στρατηγικές χρήσης τους, με στόχο την αξιολόγηση του βαθμού προσαρμογής αυτών των προσεγγίσεων στα ελληνικά δεδομένα. Η σύγκριση με πόλεις όπως η Βαρκελώνη, το Άμστερνταμ και το Ελσίνκι θα επιτρέψει την κατανόηση των τεχνολογικών, θεσμικών και κοινωνικών παραγόντων που καθορίζουν την επιτυχία των Urban Digital Twins σε διαφορετικά πλαίσια.

Τέλος, μέσω της περίπτωσης μελέτης της Καλαμάτας, επιδιώκεται η διατύπωση ρεαλιστικών προτάσεων για την αξιοποίηση της τεχνολογίας των Ψηφιακών Διδύμων σε τοπικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη την υφιστάμενη κατάσταση, τις προκλήσεις και τις αναπτυξιακές προοπτικές της πόλης. Οι προτάσεις αυτές στοχεύουν να αποτελέσουν πλαίσιο αναφοράς για τη δημιουργία μιας πιο έξυπνης, βιώσιμης και συμμετοχικής αστικής πολιτικής στην Ελλάδα.

Η παρούσα εργασία δεν περιορίζεται στην απλή περιγραφή της τεχνολογίας των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) και των τρόπων εφαρμογής τους σε ευρωπαϊκές πόλεις που λειτουργούν ως διεθνή πρότυπα. Αντιθέτως, επιδιώκει να αναδείξει τη δυναμική των Ψηφιακών Διδύμων ως πρακτικού και στρατηγικού εργαλείου για τον πολεοδομικό σχεδιασμό έξυπνων πόλεων στην Ελλάδα. Μέσα από τη συστηματική ανάλυση παραδειγμάτων και τη σύγκριση διαφορετικών μοντέλων υλοποίησης, επιχειρείται η εξαγωγή συμπερασμάτων που μπορούν να καθοδηγήσουν τη μετάβαση των ελληνικών πόλεων προς ένα πιο ψηφιακό, συμμετοχικό και βιώσιμο μοντέλο αστικής ανάπτυξης.

Η πόλη της Καλαμάτας επιλέγεται ως μελέτη περίπτωσης, λειτουργώντας ως πεδίο εφαρμογής των προτεινόμενων στρατηγικών. Η επιλογή αυτή επιτρέπει τη σύνδεση της θεωρητικής γνώσης με την πρακτική πραγματικότητα μιας ελληνικής πόλης μεσαίου μεγέθους, προσφέροντας τη δυνατότητα να αξιολογηθούν οι τεχνικές, θεσμικές και κοινωνικές προϋποθέσεις που απαιτούνται για την επιτυχή εφαρμογή ενός City Digital Twin.

Τέλος, μέσω της ανάλυσης και της αξιολόγησης των δεδομένων, η εργασία επιδιώκει να διατυπώσει τεκμηριωμένες προτάσεις για την αξιοποίηση των Ψηφιακών Διδύμων από τους φορείς της δημόσιας διοίκησης και την τοπική αυτοδιοίκηση, με βασικό στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, την ενίσχυση της διαφάνειας στη λήψη αποφάσεων και τη δημιουργία ενός πιο βιώσιμου και συμμετοχικού αστικού περιβάλλοντος.

1.2 Ερευνητικά Ερωτήματα

Με σκοπό την επίτευξη των στόχων της, η εργασία καλείται να απαντήσει σε συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία καθοδηγούν τόσο τη θεωρητική διερεύνηση όσο και τη μεθοδολογική προσέγγιση που θα ακολουθηθεί:

- Πώς ορίζεται και πώς λειτουργεί η τεχνολογία των Ψηφιακών Διδύμων (City Digital Twins) στο πλαίσιο του αστικού σχεδιασμού και ποια είναι τα κύρια τεχνικά και θεσμικά χαρακτηριστικά τους;
- Ποιες διεθνείς πρακτικές εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων μπορούν να θεωρηθούν επιτυχημένες και ποιοι παράγοντες συνέβαλαν στην αποτελεσματικότητά τους;
- Σε ποιο βαθμό και με ποιον τρόπο μπορούν οι στρατηγικές αυτές να προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του ελληνικού αστικού περιβάλλοντος;
- Ποιες προϋποθέσεις, τεχνολογικές και διοικητικές, απαιτούνται για την ανάπτυξη ενός City Digital Twin στην Καλαμάτα;
- Πώς μπορεί η εφαρμογή των Ψηφιακών Διδύμων να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, τη διαφάνεια στη διακυβέρνηση και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών;

1.3 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετεί μια **ποιοτική ερευνητική στρατηγική**, με στόχο τη διερεύνηση του ρόλου και των δυνατοτήτων των **Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων (City Digital Twins)** ως εργαλείων υποστήριξης του πολεοδομικού σχεδιασμού. Η ποιοτική μεθοδολογία επιτρέπει την εις βάθος κατανόηση σύνθετων κοινωνικών και τεχνολογικών φαινομένων, εστιάζοντας στις διαδικασίες και στα συμφραζόμενα στα οποία εμφανίζονται. (Creswell, 2014). Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, το φαινόμενο αυτό αφορά τη χρήση και εφαρμογή

των City Digital Twins στο σχεδιασμό και τη διαχείριση σύγχρονων έξυπνων πόλεων.

Αρχικά, πραγματοποιείται **βιβλιογραφική ανασκόπηση** σε βάσεις δεδομένων όπως Google Scholar, ScienceDirect και Emerald Insight εστιάζοντας σε άρθρα και μελέτες των τελευταίων πέντε ετών. Στόχος είναι η καταγραφή των βασικών εννοιών, των τεχνολογικών εξελίξεων και των πρακτικών εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων, καθώς και η ανάλυση του ρόλου τους στον πολεοδομικό σχεδιασμό.

Στη συνέχεια, η έρευνα επικεντρώνεται στην **ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων**, όπως οι πόλεις Βαρκελώνη, Άμστερνταμ και Ελσίνκι, οι οποίες διαθέτουν ώριμες στρατηγικές City Digital Twins και επαρκή τεκμηρίωση. Η συγκριτική μελέτη αυτών των πόλεων επιτρέπει την εξαγωγή **βέλτιστων πρακτικών**, την κατανόηση των παραγόντων επιτυχίας και την αναγνώριση των προκλήσεων που συνοδεύουν την υλοποίηση ψηφιακών διδύμων σε διαφορετικά αστικά περιβάλλοντα.

Τέλος, η εργασία επικεντρώνεται στη **μελέτη περίπτωσης της πόλης της Καλαμάτας**, χρησιμοποιώντας **δευτερογενή δεδομένα** όπως στρατηγικά σχέδια, έργα ψηφιακού μετασχηματισμού και διαθέσιμα δεδομένα. Στόχος είναι η διατύπωση **ρεαλιστικών προτάσεων αξιοποίησης των City Digital Twins**, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές, θεσμικές και κοινωνικές συνθήκες της πόλης. Με τον τρόπο αυτό, η μεθοδολογική προσέγγιση συνδυάζει τη **θεωρητική τεκμηρίωση** με την **πρακτική εφαρμογή**, παρέχοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για την ενσωμάτωση των Ψηφιακών Διδύμων στον ελληνικό πολεοδομικό σχεδιασμό.

1.4 Δομή και περιεχόμενο της Δ.Ε

Στο **πρώτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας και η σημασία του θέματος στο σύγχρονο αστικό σχεδιασμό. Ειδικότερα περιλαμβάνει:

- ✓ Το ερευνητικό πλαίσιο και τη σημασία των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων στον πολεοδομικό σχεδιασμό
- ✓ Το αντικείμενο και τον σκοπό της ΔΕ

- ✓ Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα
- ✓ Τη μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθείται
- ✓ Τη δομή

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται οι βασικές έννοιες και θεωρίες:

- ✓ Έννοια έξυπνων πόλεων (Smart Cities)
- ✓ Ευρωπαϊκή πολιτική και πρωτοβουλίες
- ✓ Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins): ορισμός, τεχνικά χαρακτηριστικά και τεχνολογίες
- ✓ Ψηφιακά Δίδυμα πόλεων (City Digital Twins) και εφαρμογή στον πολεοδομικό σχεδιασμό

Στο **τρίτο** κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και ειδικότερα:

- ✓ Ο στόχος της εργασίας
- ✓ Οι μέθοδοι συλλογής δεδομένων
- ✓ Τα κριτήρια επιλογής των μελετών περίπτωσης
- ✓ Η μελέτη περίπτωσης της Καλαμάτας.
- ✓ Οι περιορισμοί της έρευνας

Στο **τέταρτο** κεφάλαιο παρουσιάζεται η ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων:

- ✓ Παρουσίαση και ανάλυση των περιπτώσεων της Βαρκελώνης, Άμστερνταμ και Ελσίνκι
- ✓ Συγκριτική ανάλυση και συμπεράσματα

Στο **πέμπτο** κεφάλαιο εξετάζεται η περίπτωση της Καλαμάτας :

- ✓ Βασικά χαρακτηριστικά της πόλης
- ✓ Υφιστάμενη κατάσταση ψηφιακών υποδομών
- ✓ Δυνατότητες ανάπτυξης City Digital Twin
 - Τομείς εφαρμογής (κυκλοφορία, ενέργεια, περιβάλλον, τουρισμός)
 - Πηγές δεδομένων και ψηφιακά εργαλεία
- ✓ Προτεινόμενο πλαίσιο ανάπτυξης
 - Φάσεις υλοποίησης και εμπλεκόμενοι φορείς

- Συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού φορέα
- Κοινωνική συμμετοχή και διαφάνεια
- ✓ SWOT Ανάλυση για την ανάπτυξη City Digital Twin στην Καλαμάτα
- ✓ Αποτίμηση της προτεινόμενης στρατηγικής

Στο **έκτο** κεφάλαιο αναλύονται τα συμπεράσματα της έρευνας:

- ✓ Σύνοψη βασικών ευρημάτων
- ✓ Ερευνητική συνεισφορά και πρακτική αξία
- ✓ Προτάσεις πολιτικής για έξυπνες ελληνικές πόλεις
- ✓ Θεσμικό και στρατηγικό μοντέλο (πρότυπο Βαρκελώνης)
- ✓ Μελλοντικές προοπτικές ,επεκτάσεις και περιορισμοί της έρευνας
- ✓ Μελλοντικές προοπτικές και επεκτάσεις
- ✓ Περιορισμοί της έρευνας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ

2.1 Έξυπνες πόλεις

2.1.1. Ορισμοί και χαρακτηριστικά

Μία έξυπνη πόλη ή κοινότητα αποσκοπεί στη συνολική αναβάθμιση της ευημερίας των κατοίκων, των επιχειρήσεων, των επισκεπτών και των φορέων διοίκησης της, αξιοποιώντας ψηφιακές τεχνολογίες και υπηρεσίες που συμβάλλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Η χρήση καινοτόμων ψηφιακών λύσεων επιτρέπει στις πόλεις να λειτουργούν με μεγαλύτερη απόδοση, βιώσιμα και συμμετοχικά, ανταποκρινόμενες στις σύγχρονες κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές προκλήσεις.

Οι έξυπνες υπηρεσίες που αναπτύσσονται στο πλαίσιο αυτό μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότερη διαχείριση κρίσιμων αστικών πόρων, όπως η ενέργεια και το νερό, να συμβάλουν στη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας και στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, καθώς και να προωθήσουν πιο φιλικές προς το περιβάλλον πρακτικές στον φωτισμό και τη θέρμανση των κτιρίων. Παράλληλα,

ενισχύουν τη διαφάνεια και τη λειτουργικότητα της αστικής διακυβέρνησης, διευκολύνουν τη συμμετοχή των πολιτών στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων και στη χάραξη πολιτικών, ενώ συμβάλλουν στη δημιουργία ασφαλέστερων δημόσιων χώρων και στην καλύτερη εξυπηρέτηση ευάλωτων κοινωνικών ομάδων, όπως οι ηλικιωμένοι και τα άτομα με αναπηρία. (European Commission, 2025)

2.1.2 Διαχείριση πόρων και βιωσιμότητα

Η βελτιστοποίηση της κατανομής και της αποδοτικής χρήσης των πόρων στις έξυπνες πόλεις αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιώσιμη και ανθεκτική αστική ανάπτυξη. Μέσω της ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνολογιών και προσεγγίσεων βασισμένων στα δεδομένα, οι πόλεις μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικότερα τους διαθέσιμους πόρους, περιορίζοντας τις απώλειες και μεγιστοποιώντας τη χρησιμότητά τους. Στο πλαίσιο αυτό, διαμορφώνονται ορισμένες κρίσιμες στρατηγικές που συμβάλλουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας των αστικών συστημάτων.

Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η **λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων**, καθώς η συνεχής παρακολούθηση και ανάλυση των προτύπων κατανάλωσης επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αναγκών της πόλης. Η αξιοποίηση αναλυτικών εργαλείων υποστηρίζει την αποτελεσματικότερη κατανομή των πόρων και τη στοχευμένη παρέμβαση σε τομείς με αυξημένες απαιτήσεις. Παράλληλα, η **ολοκληρωμένη διαχείριση των αστικών υποδομών**, όπως τα δίκτυα ενέργειας, ύδρευσης, μεταφορών και απορριμμάτων, διευκολύνει τον συντονισμό μεταξύ διαφορετικών τομέων και ενισχύει τη συνολική αποδοτικότητα .

Σημαντική συμβολή παρουσιάζουν επίσης τα **έξυπνα ενεργειακά δίκτυα**, τα οποία επιτρέπουν την προσαρμογή της διανομής ενέργειας στις πραγματικές ανάγκες ζήτησης. Η εφαρμογή τέτοιων συστημάτων διευκολύνει την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη διαχείριση φορτίου και την εφαρμογή μηχανισμών απόκρισης στη ζήτηση, συμβάλλοντας σε πιο οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική ενεργειακή παραγωγή. Αντίστοιχα, τα **ευφυή συστήματα μεταφορών** ενισχύουν τη χρήση των δημόσιων συγκοινωνιών και μειώνουν την

κυκλοφοριακή συμφόρηση, οδηγώντας σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων και βελτίωση της ποιότητας του αέρα.

Στον τομέα των υδατικών πόρων, η εφαρμογή **έξυπνων συστημάτων διαχείρισης νερού** επιτρέπει την παρακολούθηση της κατανάλωσης, τον εντοπισμό διαρροών και τη βελτιστοποίηση της διανομής, προωθώντας τη μακροχρόνια βιώσιμη χρήση του νερού. Παράλληλα, τα **έξυπνα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων**, μέσω αισθητήρων και αυτοματοποιημένων διαδικασιών, συμβάλλουν στη βελτίωση της συλλογής, της διαλογής και της ανακύκλωσης, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ενισχύοντας την κυκλική οικονομία.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η **ενεργή συμμετοχή των πολιτών**, καθώς η ενημέρωση και η εκπαίδευση σε πρακτικές εξοικονόμησης πόρων ενισχύουν την αποτελεσματικότητα των τεχνολογικών λύσεων. Μέσα από κίνητρα και δράσεις ευαισθητοποίησης, οι έξυπνες πόλεις μπορούν να προωθήσουν υπεύθυνες συμπεριφορές και να διαμορφώσουν ένα βιώσιμο μοντέλο διαχείρισης πόρων. Συνολικά, ο συνδυασμός τεχνολογικών, διοικητικών και κοινωνικών παρεμβάσεων επιτρέπει στις έξυπνες πόλεις να επιτύχουν ισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης πόρων, διασφαλίζοντας την ανθεκτικότητα και την ποιότητα ζωής των κατοίκων τους.

2.1.3 Ευρωπαϊκή πολιτική και πρωτοβουλίες

Η Ευρωπαϊκή Ένωση υποστηρίζει ενεργά τον ψηφιακό μετασχηματισμό των πόλεων και των κοινοτήτων μέσω ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εργαλείων, πρωτοβουλιών και μηχανισμών διακυβέρνησης. Στο πλαίσιο αυτό, έχει αναπτυχθεί η ευρωπαϊκή εργαλειοθήκη για τα τοπικά ψηφιακά δίδυμα, η οποία περιλαμβάνει επαναχρησιμοποιήσιμα εργαλεία, αρχιτεκτονικές αναφορές, ανοικτά πρότυπα και τεχνικές προδιαγραφές. Η εργαλειοθήκη αυτή έχει σχεδιαστεί ώστε να υποστηρίζει τις τοπικές αρχές στη δημιουργία ψηφιακών διδύμων που βασίζονται σε τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και επιτρέπουν την ανάλυση και αξιολόγηση εναλλακτικών αστικών σεναρίων.

Τα τοπικά ψηφιακά δίδυμα αξιοποιούν δεδομένα και αλγορίθμους για την πρόβλεψη των επιπτώσεων που μπορεί να έχουν διάφορες παρεμβάσεις στο αστικό περιβάλλον, όπως αλλαγές στην κυκλοφορία, στη ρύπανση ή στη δημόσια υγεία. Μέσω αυτών των προσομοιώσεων, οι πόλεις μπορούν να υποστηρίξουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, να βελτιώσουν τη διαχείριση κρίσεων και να ενισχύσουν τον μακροπρόθεσμο αστικό σχεδιασμό, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων μεταφορών και προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι τα εργαλεία αυτά είναι ευέλικτα και μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες πόλεων διαφορετικού μεγέθους και επιπέδου ψηφιακής ωριμότητας.

Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει δημιουργήσει μηχανισμούς υποστήριξης για την ενίσχυση της ψηφιακής ετοιμότητας των πόλεων, όπως το γραφείο υποστήριξης για τις ψηφιακές δημόσιες συμβάσεις. Ο μηχανισμός αυτός βοηθά τις τοπικές αρχές να αξιολογήσουν το επίπεδο ψηφιακής τους ωριμότητας, να καταρτίσουν εξατομικευμένα σχέδια ψηφιακού μετασχηματισμού και να αποκτήσουν τις αναγκαίες υπηρεσίες για την ανάπτυξη ψηφιακών πλατφορμών και, δυνητικά, τοπικών ψηφιακών διδύμων.

Ιδιαίτερης σημασίας είναι και η δημιουργία του Ευρωπαϊκού Χώρου Δεδομένων για Έξυπνες και Βιώσιμες Πόλεις και Κοινότητες, ο οποίος στοχεύει στη διαλειτουργική και ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων που σήμερα παραμένουν κατακερματισμένα. Το περιβάλλον αυτό προωθεί τη συνεργασία, την τυποποίηση και την καινοτομία στη διαχείριση δεδομένων, υποστηρίζοντας τον πράσινο και ψηφιακό μετασχηματισμό των πόλεων με βάση αξιόπιστες και κυρίαρχες υποδομές δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο από δημόσιους όσο και από ιδιωτικούς φορείς για την ανάπτυξη έξυπνων και καινοτόμων υπηρεσιών.

Σε θεσμικό επίπεδο, η Κοινοπραξία Ευρωπαϊκής Ψηφιακής Υποδομής (**EDIC**) αποτελεί ένα εργαλείο που διευκολύνει την υλοποίηση πολυκρατικών και μεγάλης κλίμακας έργων ψηφιακών υποδομών. Στο πλαίσιο αυτό, η πρωτοβουλία **LDT CitiVERSE EDIC** στοχεύει στη διασύνδεση υφιστάμενων τοπικών ψηφιακών διδύμων σε ευρωπαϊκό επίπεδο, επιτρέποντας την προσομοίωση και απεικόνιση σύνθετων πολεοδομικών παρεμβάσεων που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική

ρύπανση, τη συμφόρηση, την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη διαχείριση φυσικών πόρων.

Το οικοσύστημα αυτό συμπληρώνεται από το **CitiVERSE**, ένα ψηφιακό περιβάλλον που επιτρέπει στους πολίτες και στους πολεοδόμους να αλληλεπιδρούν με εικονικές αναπαραστάσεις του αστικού χώρου μέσω τεχνολογιών εικονικής και επαυξημένης πραγματικότητας. Οι χρήστες μπορούν να εξετάζουν εναλλακτικά σενάρια αστικών παρεμβάσεων και να αξιολογούν τις επιπτώσεις τους, ενισχύοντας τον συμμετοχικό σχεδιασμό. Η ανάπτυξη του CitiVERSE υποστηρίζεται από μια σειρά συγχρηματοδοτούμενων ευρωπαϊκών έργων που λειτουργούν συμπληρωματικά και διαμορφώνουν ένα συνεκτικό οικοσύστημα ψηφιακών αστικών λύσεων.

Τέλος, πρωτοβουλίες όπως το Δίκτυο Έξυπνων Κοινοτήτων και το κίνημα **Living-in.EU** ενισχύουν τη συνεργασία μεταξύ πόλεων και περιφερειών, προωθώντας λύσεις με επίκεντρο τον πολίτη και τη χρήση ανοικτών και διαλειτουργικών τεχνολογιών. Οι δράσεις αυτές υποστηρίζονται χρηματοδοτικά από το πρόγραμμα **DIGITAL** της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο στοχεύει στην ενίσχυση της ψηφιακής ικανότητας των δημόσιων διοικήσεων, των επιχειρήσεων και των πολιτών, σε συνδυασμό με εθνικές πηγές χρηματοδότησης. (Commission, 2025)

Το κίνημα **Living-in.EU** ξεκίνησε το 2019 με πρωτοβουλία των δικτύων Eurocities, Open & Agile Smart Cities (OASC) και European Network of Living Labs (ENoLL), με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, της Φινλανδικής Προεδρίας του Συμβουλίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης και της Επιτροπής των Περιφερειών. Η δημιουργία του κινήματος αντανακλά την ανάγκη για έναν κοινό ευρωπαϊκό προσανατολισμό στον ψηφιακό μετασχηματισμό των πόλεων και των κοινοτήτων.

Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάστηκε η πολιτική διακήρυξη με τίτλο «**Join, Boost, Sustain – joining forces to boost sustainable digital transformation in Europe’s cities and communities**», κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης «Boost» στο Oulu, υπό τη Φινλανδική Προεδρία. Η διακήρυξη αυτή αποτυπώνει τη λεγόμενη «ευρωπαϊκή προσέγγιση» στον ψηφιακό μετασχηματισμό, η οποία βασίζεται στη συνεργασία

μεταξύ όλων των επιπέδων διακυβέρνησης —εθνικού, περιφερειακού και τοπικού— με στόχο τη διασφάλιση της τεχνολογικής πρωτοπορίας, παράλληλα με τον σεβασμό των ευρωπαϊκών αξιών, της πολιτισμικής πολυμορφίας και των ψηφιακών δικαιωμάτων των πολιτών.

Τον Ιανουάριο του 2020, στο πλαίσιο του Cities Forum στο Πόρτο, περισσότεροι από 60 εκπρόσωποι της Ευρωπαϊκής Ένωσης, εθνικών κυβερνήσεων, περιφερειών και πόλεων υπέγραψαν τη διακήρυξη, εντασσόμενοι επίσημα στο κίνημα. Έκτοτε, το Living-in.EU έχει διευρυνθεί σημαντικά, αριθμώντας πλέον περισσότερους από 120 υπογράφοντες και πάνω από 100 υποστηρικτές, στους οποίους περιλαμβάνονται φορείς της βιομηχανίας, επιστημονικά ιδρύματα, ενώσεις και τοπικές αρχές και εκτός Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Η περαιτέρω ανάπτυξη και θεσμική ενίσχυση του κινήματος υποστηρίζεται από το έργο **Go Li.EU (Governance of the Living-in.EU Community)**, στο οποίο συμμετέχουν τα δίκτυα Eurocities, OASC και ENoLL, σε συνεργασία με τους οργανισμούς ERRIN και CEMR. Στόχος του έργου είναι η εμβάθυνση της συνεργασίας μεταξύ των μελών, η ενίσχυση της λειτουργικότητας της κοινότητας και η αύξηση της προστιθέμενης αξίας για πόλεις, περιφέρειες, δημόσιες αρχές, επιχειρήσεις και πολίτες κατά την επόμενη τετραετία.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη λειτουργία θεματικών ομάδων εργασίας και στην ανταλλαγή γνώσης γύρω από κρίσιμα ζητήματα του αστικού ψηφιακού μετασχηματισμού, όπως τα τοπικά ψηφιακά δίδυμα, οι χώροι δεδομένων και οι αστικές πλατφόρμες δεδομένων. Παράλληλα, προβλέπεται η ανάπτυξη κοινών πόρων, εργαλείων άμεσης εφαρμογής, οδικών χαρτών και κατευθυντήριων οδηγιών, καθώς και η διοργάνωση εκδηλώσεων, συναντήσεων, διαδικτυακών σεμιναρίων και θεματικών φόρουμ. Με τον τρόπο αυτό, το Living-in.EU λειτουργεί ως βασικός κόμβος συνεργασίας και ανταλλαγής εμπειριών για τις πόλεις που επιδιώκουν να προχωρήσουν μεθοδικά και βιώσιμα στον ψηφιακό τους μετασχηματισμό. (<https://eurocities.eu/>, 2025)

2.2 Ψηφιακό Δίδυμο

2.2.1 Εξέλιξη και ορισμοί της τεχνολογίας

Ένα ψηφιακό δίδυμο αποτελεί ένα δυναμικό εικονικό μοντέλο ενός φυσικού αντικειμένου ή συστήματος, το οποίο βασίζεται σε δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο, με σκοπό την αξιόπιστη αναπαράσταση της λειτουργίας, της απόδοσης και της κατάστασής του στον πραγματικό κόσμο. (IBM, 2026)

Παρότι η έννοια του ψηφιακού διδύμου δεν είναι νέα, το ενδιαφέρον για αυτήν έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω των εφαρμογών της στην έξυπνη βιομηχανία. Ένα από τα πρώτα λειτουργικά παραδείγματα ψηφιακού διδύμου εντοπίζεται στην αποστολή Apollo 13 της NASA το 1970, όπου πολλαπλοί προσομοιωτές λειτουργούσαν ως ψηφιακά αντίγραφα του φυσικού συστήματος, προσαρμοζόμενοι δυναμικά σε διαφορετικά σενάρια αστοχίας. Ο όρος «ψηφιακό δίδυμο» εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 2003 στο πλαίσιο της διαχείρισης κύκλου ζωής προϊόντος (PLM) και επανήλθε δυναμικά στη βιβλιογραφία μετά το 2010 μέσω ερευνητικών πρωτοβουλιών της NASA. Αρχικά, οι εφαρμογές του επικεντρώθηκαν στην αεροναυπηγική, ωστόσο από το 2015 και έπειτα επεκτάθηκαν σε άλλους τομείς, με την έξυπνη βιομηχανία να διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση του σύγχρονου ορισμού και της ευρύτερης χρήσης του ψηφιακού διδύμου. (Mylonas, 2026)

2.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά και δομή ενός Ψηφιακού Διδύμου

Ένα **ψηφιακό δίδυμο** είναι μια **εικονική αναπαράσταση** ενός αντικειμένου, προϊόντος, διαδικασίας ή οποιουδήποτε στοιχείου μπορεί να ψηφιοποιηθεί. Για ένα φυσικό αντικείμενο, το ψηφιακό δίδυμο αποτελεί μια **ακριβή ψηφιακή αναπαράσταση** του φυσικού αντιγράφου, περιλαμβάνοντας τις **ιδιότητες, την κατάσταση και τη συμπεριφορά** του πραγματικού αντικειμένου. Μέσω του ψηφιακού διδύμου είναι δυνατή η **προσομοίωση της πραγματικής λειτουργίας** του αντικειμένου στο περιβάλλον όπου αυτό χρησιμοποιείται, παρέχοντας έτσι **συνεχή εικόνα για την κατάσταση των φυσικών πόρων**, όπως μηχανημάτων και εξοπλισμού.

Για τη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου, συλλέγονται δεδομένα από ποικίλες πηγές, όπως τα φυσικά χαρακτηριστικά, οι διαδικασίες κατασκευής και οι λειτουργικές πληροφορίες, καθώς και συμπεράσματα από αναλύσεις δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα ενσωματώνονται σε ένα **εικονικό μοντέλο**, με τη βοήθεια αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης (AI), ώστε να εξάγονται **χρήσιμες πληροφορίες** για τη διαχείριση και βελτιστοποίηση του φυσικού αντικείμενου.

Οι αισθητήρες του **IoT** παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο το φυσικό αντικείμενο και στέλνουν δεδομένα στο ψηφιακό δίδυμο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη **βελτιστοποίηση της απόδοσης** του προϊόντος. Παράλληλα, το ψηφιακό δίδυμο συνοδεύει το φυσικό αντικείμενο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, υποστηρίζοντας την παρακολούθηση και τη συντήρησή του.

Η τεχνολογία των ψηφιακών διδύμων εφαρμόζεται επίσης στην **επαυξημένη πραγματικότητα (AR:Augmented Reality)**, όπου οι ψηφιακές πληροφορίες ενσωματώνονται σε πραγματικό χρόνο στο περιβάλλον του χρήστη. Το ψηφιακό δίδυμο παρακολουθεί τη θέση και την κίνηση του προϊόντος, ενώ εικόνες που συνδυάζονται με δεδομένα αισθητήρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συντήρηση και υπηρεσίες.

Στον τομέα της **ιδιοκτησίας και του blockchain**, τα ψηφιακά δίδυμα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ψηφιακών αντιγράφων φυσικών αγαθών, όπως είδη ένδυσης ή παπούτσια, τα οποία καταγράφονται σε blockchain για να αποδειχθεί η ιδιοκτησία τους. Με αυτόν τον τρόπο, οι σχεδιαστές και οι επιχειρήσεις μπορούν να προβάλλουν τις συλλογές τους στον ψηφιακό χώρο, ενώ οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα ψηφιακά αντίγραφα των προϊόντων.

Ένα παράδειγμα μεγάλης κλίμακας είναι το πρόγραμμα **Destination Earth (DestinE)** της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που στοχεύει στη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου του πλανήτη Γη. Το έργο επιτρέπει την παρακολούθηση και προσομοίωση φυσικών διεργασιών όπως η ατμόσφαιρα, οι ωκεανοί, οι πάγοι και η ξηρά, καθώς και των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, με στόχο την υποστήριξη βιώσιμης ανάπτυξης και την αξιολόγηση περιβαλλοντικών πολιτικών. Μέσω αυτού του ψηφιακού μοντέλου, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής θα μπορούν να προβλέπουν

και να διαχειρίζονται φαινόμενα όπως πλημμύρες, ξηρασίες και πυρκαγιές με προειδοποίηση αρκετών ημερών ή ετών.

(<https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/digital-twin>), 2025)



Διάγραμμα 1 Δομή, Δεδομένα, Δυνατότητες και Εφαρμογές Ψηφιακών Διδύμων

2.2.3 Συσχέτιση με τεχνολογίες IoT, Big Data, AI, GIS, BIM.

Το παράδειγμα των ψηφιακών διδύμων (DT) διευκολύνει την ευφυή μεταμόρφωση διαφόρων πεδίων μέσω της διασύνδεσης του φυσικού και του ψηφιακού κόσμου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών, ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (Big Data), υπολογιστικού νέφους (Cloud Computing), Internet of Things (IoT), μοντελοποίησης, προσομοίωσης, βελτιστοποίησης και τεχνητής νοημοσύνης (AI).

Στο πλαίσιο των ψηφιακών διδύμων (DTs) για έξυπνες πόλεις, τόσο το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) όσο και οι τεχνολογίες καταναμημένων υπολογιστικών συστημάτων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων που προέρχονται από ποικίλα αστικά στοιχεία. Οι συσκευές IoT, όπως αισθητήρες, κάμερες και μετρητές κοινής

ωφέλειας, μπορούν να εγκατασταθούν στρατηγικά σε όλο το αστικό περιβάλλον, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για κρίσιμες παραμέτρους που σχετίζονται με την κυκλοφορία, το περιβάλλον, την ενέργεια και τις υποδομές.

Τα δεδομένα αυτά προσφέρουν μια ολιστική εικόνα της λειτουργικής κατάστασης και των περιβαλλοντικών συνθηκών της πόλης και μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα δίκτυο ψηφιακών διδύμων, επιτρέποντας τη συνεχή παρακολούθηση και ανάλυση των αστικών συστημάτων. Επιπλέον, η **διασφάλιση της ασφάλειας και της ακεραιότητας των δεδομένων** στα ψηφιακά δίδυμα των έξυπνων πόλεων αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση, καθώς συμβάλλει στην προστασία τους από **πιθανές κυβερνοαπειλές και παραβιάσεις ασφάλειας**, ζήτημα το οποίο έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτεταμένης ερευνητικής μελέτης. (Annysha Huzzat, 2025)

Η **Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και η Μηχανική Μάθηση (ML)** αποτελούν βασικά στοιχεία των ψηφιακών διδύμων, επιτρέποντάς τους να επεξεργάζονται μεγάλους όγκους δεδομένων από φυσικά συστήματα και το περιβάλλον τους. Οι τεχνολογίες αυτές ενισχύουν τα ψηφιακά δίδυμα με δυνατότητες προηγμένης ανάλυσης, πρόβλεψης και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η Επεξεργασία Φυσικής Γλώσσας (Natural Language Processing, NLP) συμβάλλει ουσιαστικά στην επεξεργασία και κατανόηση κειμενικών δεδομένων, επιτρέποντας την εξαγωγή νοήματος και την αυτοματοποιημένη ανάλυση πληροφοριών.

Καθώς οι έξυπνες πόλεις καθίστανται ολοένα και πιο σύνθετες, η βελτιστοποίηση των αλγορίθμων ML ως προς την αποδοτικότητα και το υπολογιστικό κόστος είναι απαραίτητη για την υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου. Πρόσφατες μελέτες αναδεικνύουν την ανάγκη συνεχούς βελτίωσης των μοντέλων ML, ώστε να ανταποκρίνονται στην αυξανόμενη πολυπλοκότητα των δεδομένων. Ενδεικτικά, αλγόριθμοι ML και LSTM έχουν αξιοποιηθεί για την πρόβλεψη πληρότητας χώρων και περιβαλλοντικών μεταβολών σε κτιριακά και αστικά συστήματα, υποστηρίζοντας τον αστικό σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων μέσω ψηφιακών διδύμων.

Τα **Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS)** αποτελούν βασικές τεχνολογίες για τη διαχείριση, ανάλυση και απεικόνιση γεωχωρικών δεδομένων

στις έξυπνες πόλεις, ενώ η ενσωμάτωσή τους με τα **Συστήματα Πληροφοριών Κτιρίων (BIM)** ενισχύει σημαντικά τις δυνατότητές τους. Τα BIM προσφέρουν λεπτομερείς ψηφιακές αναπαραστάσεις κτιρίων και δομικών στοιχείων, εμπλουτίζοντας τα GIS με πρόσθετα επίπεδα πληροφορίας για τις αστικές υποδομές.

Ο συνδυασμός BIM και GIS επιτρέπει στους φορείς σχεδιασμού και διαχείρισης πόλεων να αναλύουν χωρικές σχέσεις τόσο σε κλίμακα πόλης όσο και σε επίπεδο μεμονωμένων κτιρίων, υποστηρίζοντας τεκμηριωμένες αποφάσεις σε τομείς όπως οι μεταφορές, τα δίκτυα κοινής ωφέλειας, η χρήση γης, τα δημογραφικά δεδομένα και η συντήρηση κτιρίων. Η σχετική έρευνα επικεντρώνεται στη δημιουργία μοντέλων **ψηφιακών διδύμων πόλης** και στην αντιμετώπιση των τεχνικών προκλήσεων που προκύπτουν από την ολοκλήρωση BIM–GIS.

Η **τεχνολογία blockchain**, ως αποκεντρωμένο και ασφαλές σύστημα καταγραφής, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα ψηφιακά δίδυμα των έξυπνων πόλεων. Συμβάλλει στην ενίσχυση της **ασφάλειας, της διαφάνειας και της εμπιστοσύνης** στη διαχείριση δεδομένων και συναλλαγών, παρέχοντας μη αλλοιώσιμη καταγραφή των ανταλλαγών πληροφορίας. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η ασφαλής κοινοποίηση και επαλήθευση δεδομένων μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, όπως δημόσιες αρχές, επιχειρήσεις και πολίτες.

Η ενσωμάτωση του blockchain με σύγχρονες τεχνολογίες ψηφιακών διδύμων αναμένεται να βελτιώσει την αποδοτικότητα των σχετικών συστημάτων, να περιορίσει φαινόμενα απάτης και να διασφαλίσει την **ακεραιότητα και γνησιότητα των δεδομένων** που ανταλλάσσονται στο οικοσύστημα των έξυπνων πόλεων.

Η ενσωμάτωση βασικών υποστηρικτικών τεχνολογιών, όπως το **Internet of Things (IoT)**, η **Τεχνητή Νοημοσύνη (AI)** και οι **προηγμένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων**, έχει δημιουργήσει το υπόβαθρο για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων ψηφιακών διδύμων σε διάφορους τομείς των έξυπνων πόλεων. Οι τεχνολογίες αυτές παρέχουν την απαραίτητη τεχνική υποδομή για τη δημιουργία **δυναμικών και ενημερωμένων σε πραγματικό χρόνο ψηφιακών αναπαραστάσεων** του

αστικού περιβάλλοντος, υποστηρίζοντας λειτουργίες παρακολούθησης, προσομοίωσης και λήψης αποφάσεων.



Εικόνα 1 Συνδυασμός Τεχνολογιών σε Ψηφιακά Δίδυμα για Έξυπνες Πόλεις

2.3 Ψηφιακό Δίδυμο πόλης (City Digital Twin)

2.3.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά πόλεων

Η Ευρωπαϊκή Ένωση παρουσιάζει υψηλό βαθμό αστικοποίησης, με περίπου το 75% του πληθυσμού να ζει σε μικρές και μεγάλες πόλεις, ποσοστό που αναμένεται να φτάσει το 80% έως το 2050. Οι πόλεις και οι μητροπολιτικές περιοχές, πέρα από το ότι αποτελούν κύριους οικονομικούς κόμβους, είναι επίσης σημαντικές πηγές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και ρύπανσης του αέρα, των υδάτων και του εδάφους. Η αξιοποίηση τεχνολογιών για τη βελτίωση της αστικής διαχείρισης μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη τριών βασικών προτεραιοτήτων της ΕΕ: της Πράσινης Συμφωνίας, της ενίσχυσης της ψηφιακής τεχνολογίας και της προώθησης μιας οικονομίας προς όφελος των πολιτών. (Συνέδριο, 2023)

Ένα Ψηφιακό Δίδυμο Πόλης αποτελεί ένα εικονικό μοντέλο της πόλης, που αναπαριστά τόσο την ιστορική της εξέλιξη όσο και τις τρέχουσες αλλαγές σε

υποδομές, περιβάλλον και κινητικότητα. Μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων, τεχνητής νοημοσύνης και προσομοιώσεων, παρέχει στους πολεοδόμους εργαλεία για βελτιστοποίηση του πολεοδομικού σχεδιασμού και τη δημιουργία πιο βιώσιμων και λειτουργικών πόλεων. (<https://digital-strategy.ec.europa.eu/>, 2025)

Κατά την ανάλυση των βασικών στόχων ενός ψηφιακού διδύμου στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη και οι γενικότεροι στόχοι των ίδιων των έξυπνων πόλεων. Παρότι ο ορισμός της έξυπνης πόλης, όπως και ο ορισμός των ψηφιακών διδύμων, έχει εξελιχθεί με την πάροδο των χρόνων, πολλές πόλεις επιδιώκουν κοινές κατηγορίες στόχων, όπως:

- Βελτίωση της διακυβέρνησης μέσω τεκμηριωμένων αποφάσεων
 - Αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των πολιτών
 - Μείωση των λειτουργικών εξόδων
 - Παροχή διαχείρισης και μετριασμού καταστροφών
 - Υποστήριξη ανάπτυξης και επιχειρηματικότητας
- (Mylonas, 2026)



Εικόνα 2 Στόχοι έξυπνης πόλης

Με βάση αυτά τα κριτήρια, τα ψηφιακά δίδυμα αρχίζουν πλέον να γίνονται πραγματικότητα στις έξυπνες πόλεις, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητα και την βιωσιμότητά τους.

Οι ευρωπαϊκές πόλεις πρωτοπορούν στην ανάπτυξη των **έξυπνων πόλεων** εδώ και περισσότερα από δέκα χρόνια. Αποτελούν χώρους δοκιμών και εφαρμογής **καινοτόμων, βιώσιμων και ολοκληρωμένων λύσεων** με στόχο να γίνουν πιο «πράσινες», αποδοτικές και φιλικές για τους κατοίκους τους. Μέσα από έργα και πρωτοβουλίες σε επίπεδο ΕΕ αλλά και τοπικό, οι δημοτικές αρχές έχουν προωθήσει **ενδοπεριφερειακή και πολυεπίπεδη συνεργασία**, αναπτύσσοντας σταδιακά ένα ευρύτερο όραμα έξυπνης πόλης.

Η **ψηφιακή μεταμόρφωση** – οι αλλαγές που συνδέονται με την εφαρμογή ψηφιακών τεχνολογιών σε όλες τις πτυχές της κοινωνίας – αποτελεί επίσης βασικό

στοιχείο αυτού του οράματος. Οι πόλεις αξιοποιούν ολοένα και περισσότερο τη δύναμη των **δεδομένων και της συμμετοχής των πολιτών**, δημιουργώντας νέες ευκαιρίες αλλά και προκλήσεις, καθώς η ανησυχία για **ιδιωτικότητα, ασφάλεια και λογοδοσία** εντείνεται μεταξύ πολιτών και δημόσιων αρχών.

Ενδεικτικά, ευρωπαϊκά έργα που προωθούν την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων περιλαμβάνουν τα **Living-in.EU, DS4SSCC, USER-CHI, COLLECTORS, ULaaDs, SHOW και ROCK**. (Euro Cities, 2025)

2.3.2 Εφαρμογές στον αστικό χώρο

Τα ψηφιακά δίδυμα (**Digital Twins – DTs**) προσφέρουν εργαλεία για την ψηφιακή αναπαράσταση και διαχείριση των πόλεων, αξιοποιώντας σύγχρονες τεχνολογίες όπως **IoT, Big Data, Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), GIS, BIM και Blockchain**. Μέσω αυτών, δημιουργούνται **ζωντανά, ενημερωμένα σε πραγματικό χρόνο μοντέλα αστικών συστημάτων**, τα οποία υποστηρίζουν την παρακολούθηση, την προσομοίωση και τη λήψη αποφάσεων σε διάφορους τομείς.

1. Διαχείριση Κυκλοφορίας και Μετακινήσεων

- Παρακολούθηση της κίνησης οχημάτων και πεζών σε αστικά δίκτυα.
- Προσαρμογή σηματοδότησης και βελτιστοποίηση δημόσιων συγκοινωνιών.
- Πρόβλεψη συμφόρησης και διαχείριση έκτακτων περιστατικών.

2. Διαχείριση Υποδομών και Κτιρίων

- Παρακολούθηση ενεργειακής κατανάλωσης, θερμοκρασιών και συντήρησης κτιρίων.
- Πρόβλεψη πιθανών βλαβών μέσω αλγορίθμων ML και LSTM.
- Διαχείριση δημοσίων έργων και βελτιστοποίηση πόρων.

3. Περιβαλλοντική Διαχείριση

- Παρακολούθηση ποιότητας αέρα, νερού και εδάφους.
- Πρόβλεψη ακραίων καιρικών φαινομένων και περιβαλλοντικών κινδύνων.
- Υποστήριξη βιώσιμων πολιτικών και περιβαλλοντικών στόχων.

4. Διακυβέρνηση και Συμμετοχή Πολιτών

- Αύξηση διαφάνειας και εμπιστοσύνης μέσω τεχνολογιών blockchain.

- Υποστήριξη ενεργούς συμμετοχής πολιτών σε αστικές αποφάσεις και υπηρεσίες.
- Ανάπτυξη ψηφιακών πλατφορμών και έξυπνων εφαρμογών.

5. Σχεδιασμός και Προσομοίωση

- Ανάλυση χωρικών δεδομένων και αστικών υποδομών μέσω GIS και BIM.
- Δημιουργία σεναρίων για τη βελτιστοποίηση σχεδιασμού υποδομών.
- Ολοκληρωμένη προσομοίωση της λειτουργίας της πόλης για τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων.

Συνολικά, τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν **ολιστική εποπτεία της πόλης**, υποστηρίζοντας την **έξυπνη, βιώσιμη και αποτελεσματική διαχείριση** όλων των αστικών συστημάτων, από τις υποδομές και την κυκλοφορία μέχρι την περιβαλλοντική παρακολούθηση και τη συμμετοχή των πολιτών.

2.3.3 Συλλογή Δεδομένων και σύνθεση δεδομένων για τη δημιουργία ψηφιακών διδύμων πόλεων

Η συλλογή δεδομένων αποτελεί το πρώτο και καθοριστικό στάδιο στη δημιουργία ενός ψηφιακού διδύμου πόλης, καθώς καθορίζει την ακρίβεια, την πληρότητα και τη χρηστικότητα του τελικού ψηφιακού μοντέλου. Τα δεδομένα μπορούν να αποκτηθούν μέσω ποικίλων τεχνολογικών μεθόδων, όπως δορυφορικές εικόνες, drones και συστήματα LiDAR, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποτύπωση της γεωμετρίας του αστικού χώρου. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά ο συνδυασμός των δεδομένων LiDAR με συμπληρωματικές πηγές πληροφορίας, όπως αεροθερμογραφία και δίκτυα αισθητήρων πραγματικού χρόνου, καθώς επιτρέπει την ακριβέστερη αναπαράσταση του εδάφους και των δομημένων στοιχείων της πόλης.

Η ενσωμάτωση πολυφασματικών δεδομένων και τρισδιάστατων μοντέλων κτιρίων ενισχύει περαιτέρω τη δυναμική των ψηφιακών διδύμων, καθιστώντας δυνατή τη συλλογή λεπτομερών και πολυεπίπεδων πληροφοριών. Στο πλαίσιο αυτό, το City Information Modeling (CIM) λειτουργεί ως ενοποιητικό πλαίσιο που συνδυάζει δεδομένα από διαφορετικές πηγές, όπως αρχεία CAD, δεδομένα από το OpenStreetMap, εμπορικά σύνολα δεδομένων και τρισδιάστατα μοντέλα. Η

διαδικασία αυτή υποστηρίζεται από τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης, μηχανικής μάθησης, GIS, BIM και Internet of Things, επιτρέποντας την ανάλυση και αξιοποίηση δεδομένων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο.

Η δυναμική τρισδιάστατη μοντελοποίηση του αστικού χώρου ενισχύεται επιπλέον από τη χρήση αισθητήρων IoT και δεδομένων από UAVs, σε συνδυασμό με δορυφορικές εικόνες και ανοικτά δεδομένα, τα οποία διευκολύνουν την ευρεία πρόσβαση και επαναχρησιμοποίηση της πληροφορίας μέσω γεωχωρικών συστημάτων. Ωστόσο, η αξιοποίηση ανοικτών πηγών δεδομένων, όπως το OpenStreetMap, συνοδεύεται από προκλήσεις που σχετίζονται με την ποιότητα των δεδομένων, ιδίως ως προς την πληρότητα, τη συνέπεια και την ακρίβεια των χαρακτηριστικών των κτιρίων, δεδομένου ότι η ποιότητα της πληροφορίας μπορεί να διαφοροποιείται σημαντικά ανά περιοχή.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, η τυποποίηση των γεωχωρικών δεδομένων μέσω προτύπων όπως το CityGML και η χρήση ελεύθερου και ανοικτού λογισμικού γεωχωρικών εφαρμογών συμβάλλουν στη βελτίωση της διαχείρισης, της οπτικοποίησης και της διαλειτουργικότητας των δεδομένων. Παράλληλα, η ενοποίηση ετερογενών συνόλων δεδομένων αντιμετωπίζει προκλήσεις που αφορούν την απώλεια σημασιολογικής πληροφορίας και την ανάγκη ύπαρξης συνεπών αναγνωριστικών μεταξύ διαφορετικών βάσεων δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, προσεγγίσεις βασισμένες σε οντολογίες και σημασιολογικά γραφήματα συμβάλλουν στον περιορισμό της σημασιολογικής απώλειας κατά τη μετατροπή των δεδομένων σε ενιαία μοντέλα.

Τα σύγχρονα σύνολα δεδομένων CityGML 3.0 μπορούν να λειτουργήσουν ως διαλειτουργικά σημασιολογικά γραφήματα, διευκολύνοντας την ενοποίηση ετερογενών χωροχρονικών δεδομένων και την παρακολούθηση των μεταβολών της πόλης σε διαφορετικά χρονικά στιγμιότυπα. Μέσω αυτών των τεχνικών, το ψηφιακό δίδυμο αποκτά τη δυνατότητα να εξελίσσεται δυναμικά, υποστηρίζοντας την ανάλυση αλλαγών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στον πολεοδομικό σχεδιασμό. (Imane Jeddoub)

2.3.4 Εφαρμογές και διεθνείς περιπτώσεις

Η διεθνής βιβλιογραφία καταδεικνύει μια ραγδαία αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος γύρω από την ανάπτυξη και αξιοποίηση ψηφιακών διδύμων για την αντιμετώπιση σύνθετων αστικών ζητημάτων, με σχεδόν 180 μελέτες να εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές της λειτουργίας και διαχείρισης των πόλεων. Οι εφαρμογές αυτές καλύπτουν ευρύ φάσμα θεματικών πεδίων, από τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη βιωσιμότητα έως την κινητικότητα, την ενέργεια και τη διαχείριση υποδομών. Ενδεικτικά, τα ψηφιακά δίδυμα αξιοποιούνται για τη διερεύνηση συμμετοχικών διαδικασιών στη διαχείριση αστικών χώρων πρασίνου, την ποσοτική και ποιοτική αξιολόγηση του αστικού πρασίνου, την πρόβλεψη μεταβολών στην ποιότητα του αέρα, καθώς και την εκτίμηση μικροκλιματικών συνθηκών, όπως η θερμική άνεση σε επίπεδο πεζού και το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, τη μείωση των εκπομπών άνθρακα και τη διαχείριση της ενεργειακής κατανάλωσης σε αστική κλίμακα.

Σημαντικές εφαρμογές εντοπίζονται επίσης στη διαχείριση και συντήρηση του δομημένου περιβάλλοντος και των υποδομών, όπως οδικά δίκτυα, συστήματα μεταφορών, δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης. Τα ψηφιακά δίδυμα υποστηρίζουν την παρακολούθηση της κατάστασης των υποδομών, την επιθεώρηση ελαττωμάτων, την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των πόλεων σε εξωτερικές διαταραχές και την εκ των προτέρων εκτίμηση των επιπτώσεων μεγάλων έργων πριν από την υλοποίησή τους. Στον τομέα της κινητικότητας, αξιοποιούνται για τη δημιουργία και επικύρωση κυκλοφοριακών μοντέλων, τη βελτιστοποίηση της αστικής εφοδιαστικής και τη μείωση της συμφόρησης και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των μετακινήσεων. Παράλληλα, η βιβλιογραφία αναδεικνύει τον ρόλο των ψηφιακών διδύμων στη διαχείριση γεωχωρικών δεδομένων της δημόσιας διοίκησης, στη λειτουργία κέντρων αστικών επιχειρήσεων και στη μετάβαση από δισδιάστατα σε τρισδιάστατα μοντέλα αποτίμησης ακίνητης περιουσίας.

Παρά τον μεγάλο αριθμό θεωρητικών και εφαρμοσμένων μελετών, ο αριθμός ολοκληρωμένων περιπτώσεων όπου αναπτύσσεται μια πλήρης πλατφόρμα ψηφιακού διδύμου με τη χρήση προηγμένων τεχνολογιών παραμένει σχετικά

περιορισμένος. Οι υφιστάμενες διεθνείς περιπτώσεις μελετών αναδεικνύουν ωστόσο τη δυναμική των ψηφιακών διδύμων ως εργαλείων λήψης αποφάσεων. Ενδεικτικά, έχουν αναπτυχθεί τρισδιάστατα ψηφιακά δίδυμα για την αντιμετώπιση ελλείψεων αστικού πρασίνου σε επίπεδο πεζού, αξιοποιώντας εργαλεία παραμετρικού σχεδιασμού και ενεργειακής προσομοίωσης. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη διαλειτουργικών μοντέλων βασισμένων σε CityGML για την ολοκληρωμένη αποτύπωση του αστικού περιβάλλοντος, τη χρήση ψηφιακών διδύμων για κυκλοφοριακές αναλύσεις και προσομοιώσεις, καθώς και τη διαχείριση και συντήρηση νέων χώρων πρασίνου μέσω συνδυασμού GIS, μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων και κινητών συστημάτων σάρωσης.

Σε στρατηγικό επίπεδο, ψηφιακά δίδυμα έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων αστικής ανάπτυξης με μακροχρόνιο ορίζοντα, υποστηρίζοντας τη λήψη αποφάσεων από τις δημοτικές αρχές. Παράλληλα, εφαρμογές που συνδυάζουν δεδομένα πραγματικού χρόνου με τρισδιάστατα μοντέλα έχουν αξιοποιηθεί για τον σχεδιασμό υποδομών, τη διαχείριση αστικών υπηρεσιών και την ενίσχυση της συμμετοχής των πολιτών μέσω διαδραστικών πλατφορμών και εικονικής πραγματικότητας. Τέλος, νεότερες ερευνητικές προσεγγίσεις ενσωματώνουν κοινωνικές και ανθρώπινες παραμέτρους στα ψηφιακά δίδυμα, επιδιώκοντας τη βελτίωση της διαχείρισης και της λειτουργικής αποδοτικότητας των αστικών συστημάτων.

Συνολικά, η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι, παρότι οι εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων είναι πολυάριθμες και θεματικά εκτεταμένες, οι ολοκληρωμένες πλατφόρμες ψηφιακών διδύμων πόλης εξακολουθούν να βρίσκονται σε στάδιο εξέλιξης. Ωστόσο, τα υφιστάμενα παραδείγματα καταδεικνύουν το σημαντικό δυναμικό των ψηφιακών διδύμων ως εργαλείων κατανόησης, προσομοίωσης και υποστήριξης του σύγχρονου πολεοδομικού σχεδιασμού και της βιώσιμης αστικής διαχείρισης. (Imane Jeddoub))

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Μεθοδολογία

3.1 Στόχος της εργασίας

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση του ρόλου των ψηφιακών διδύμων πόλης ως εργαλείων υποστήριξης του σύγχρονου πολεοδομικού σχεδιασμού και της αστικής διακυβέρνησης. Η εργασία εστιάζει στην κατανόηση των τρόπων με τους οποίους τα ψηφιακά δίδυμα ενσωματώνουν δεδομένα, τεχνολογίες και συμμετοχικές διαδικασίες, καθώς και στη διερεύνηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών τους σε διαφορετικά αστικά πλαίσια. Μέσα από τη μελέτη διεθνών περιπτώσεων, επιδιώκεται η ανάδειξη κοινών χαρακτηριστικών, καλών πρακτικών και διαφοροποιήσεων, με τελικό στόχο τη διατύπωση συμπερασμάτων χρήσιμων για τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη μελλοντική εφαρμογή αντίστοιχων εργαλείων σε άλλες πόλεις.

3.2 Μέθοδοι συλλογής δεδομένων

Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται σε ποιοτική ερευνητική προσέγγιση, η οποία συνδυάζει βιβλιογραφική ανασκόπηση και ανάλυση δευτερογενών δεδομένων. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη επισκόπηση της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας σχετικά με τα ψηφιακά δίδυμα πόλης, τις εφαρμογές τους στον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη διαχείριση αστικών δεδομένων. Η βιβλιογραφική έρευνα περιλάμβανε επιστημονικά άρθρα, πρακτικά συνεδρίων και τεχνικές αναφορές, με στόχο την καταγραφή των κυριότερων θεωρητικών προσεγγίσεων και τεχνολογικών εξελίξεων. Βιβλιογραφικά δεδομένα αντλήθηκαν από βάσεις δεδομένων όπως Google Scholar, ScienceDirect και Emerald Insight εστιάζοντας σε άρθρα και μελέτες των τελευταίων πέντε ετών. Στόχος είναι η καταγραφή των βασικών εννοιών, των τεχνολογικών εξελίξεων και των πρακτικών εφαρμογής των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων, καθώς και η ανάλυση του ρόλου τους στον πολεοδομικό σχεδιασμό. Επίσης θα αντληθούν δεδομένα από ιστοσελίδες και εκδόσεις διεθνών οργανισμών που ασχολούνται με City Digital Twins, έξυπνες πόλεις και πολεοδομικό σχεδιασμό.

Παράλληλα, συλλέχθηκαν δεδομένα από επίσημες ψηφιακές πλατφόρμες πόλεων, διαδικτυακά geoportals και ανοικτές βάσεις δεδομένων, καθώς και από τεκμηριωμένες παρουσιάσεις έργων ψηφιακών διδύμων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε πληροφορίες που αφορούν την αρχιτεκτονική των συστημάτων, τα χρησιμοποιούμενα πρότυπα και μοντέλα δεδομένων, καθώς και τις λειτουργίες που σχετίζονται με τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη συμμετοχικότητα. Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε συγκριτικά, ώστε να εντοπιστούν ομοιότητες και διαφορές στις προσεγγίσεις των υπό μελέτη πόλεων.

3.3 Επιλογή υπό μελέτης πόλεων (κριτήρια- αιτιολόγηση)

Η επιλογή των υπό μελέτη πόλεων δεν βασίστηκε αποκλειστικά στο επίπεδο τεχνολογικής ωριμότητας των ψηφιακών διδύμων που έχουν αναπτύξει, αλλά και στον βαθμό ομοιότητας που παρουσιάζουν με την πόλη της Καλαμάτας ως προς τη χωρική δομή, τις πολεοδομικές προκλήσεις και τις αναπτυξιακές ανάγκες. Στόχος της επιλογής ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων και πρακτικών που μπορούν να προσαρμοστούν ρεαλιστικά στο τοπικό πλαίσιο μιας μεσαίου μεγέθους ελληνικής πόλης.

Κοινό χαρακτηριστικό της Καλαμάτας με τις πόλεις της Βαρκελώνης, του Ελσίνκι και του Άμστερνταμ αποτελεί η έντονη σχέση του αστικού ιστού με το φυσικό περιβάλλον, είτε αυτό αφορά το παράκτιο μέτωπο, είτε τη γειτνίαση με φυσικούς και πράσινους χώρους. Η Βαρκελώνη και το Άμστερνταμ, όπως και η Καλαμάτα, αντιμετωπίζουν ζητήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση του δημόσιου χώρου, την κλιματική προσαρμογή και την ισορροπία μεταξύ τουριστικών και μόνιμων χρήσεων. Το Ελσίνκι, αντίστοιχα, παρουσιάζει κοινά χαρακτηριστικά ως προς την ανάγκη ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών παραμέτρων και μικροκλιματικών αναλύσεων στον πολεοδομικό σχεδιασμό, στοιχεία ιδιαίτερα κρίσιμα και για την Καλαμάτα.

Επιπλέον, και στις τρεις διεθνείς περιπτώσεις παρατηρείται έμφαση στη διαχείριση αστικών μεταβολών σε επίπεδο γειτονιάς, γεγονός που συνάδει με την κλίμακα στην οποία αναπτύσσονται οι περισσότερες πολεοδομικές παρεμβάσεις στην Καλαμάτα. Η χρήση ψηφιακών διδύμων για την αξιολόγηση σεναρίων

αστικής ανάπτυξης, την ανάλυση επιπτώσεων νέων παρεμβάσεων και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής παρουσιάζει άμεση συνάφεια με τις ανάγκες μιας πόλης που βρίσκεται σε φάση ανασυγκρότησης και μετασχηματισμού.

Ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο αποτέλεσε και η έμφαση που δίνουν οι επιλεγμένες πόλεις στα ανοικτά δεδομένα και στη συμμετοχικότητα. Η Βαρκελώνη, το Ελσίνκι και το Άμστερνταμ έχουν αναπτύξει πλατφόρμες που ενισχύουν τη διαφάνεια και τη συμμετοχή των πολιτών στον αστικό σχεδιασμό, στοιχείο που κρίνεται καθοριστικό για την προσαρμογή αντίστοιχων πρακτικών στην Καλαμάτα, όπου η ενεργή συμμετοχή της τοπικής κοινωνίας αποτελεί βασικό παράγοντα επιτυχίας μελλοντικών παρεμβάσεων.

Τέλος, η επιλογή των συγκεκριμένων πόλεων αιτιολογείται από το γεγονός ότι αντιπροσωπεύουν διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές προσεγγίσεις στην ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων: στρατηγική και κοινωνικά προσανατολισμένη (Βαρκελώνη), τεχνικά ώριμη και αναλυτική (Ελσίνκι), και δεδομενοκεντρική με έμφαση στη διαλειτουργικότητα (Άμστερνταμ). Ο συνδυασμός αυτών των προσεγγίσεων προσφέρει ένα πλούσιο πλαίσιο αναφοράς, από το οποίο μπορούν να αντληθούν πρακτικές κατάλληλες για την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου ψηφιακού διδύμου στην Καλαμάτα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Ανάλυση Διεθνών Παραδειγμάτων

4.2 Βαρκελώνη

4.2.1 Στρατηγική και έργο CDT

Η Βαρκελώνη είναι ο **δεύτερη μεγαλύτερη πόλη της Ισπανίας**, με πληθυσμό περίπου 1,6 εκατομμύρια κατοίκους εντός των ορίων της πόλης. Πρόκειται για τη **έκτη μεγαλύτερη αστική περιοχή** στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το 2008, η Βαρκελώνη κατατάχθηκε ως η **τέταρτη πιο ισχυρή οικονομικά πόλη** της ΕΕ με βάση το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) και η 35η στον κόσμο, με ΑΕΠ ύψους περίπου **177 δισεκατομμυρίων ευρώ**. (Smartcities, 2025)

Σύμφωνα με την κατάταξη του **Globalization and World Cities Research Network**, η πόλη κατατάσσεται στην κατηγορία Beta City, γεγονός που αντανακλά

τον σημαντικό αλλά όχι κυρίαρχο ρόλο της στο παγκόσμιο οικονομικό σύστημα. Παράλληλα, η Βαρκελώνη συγκαταλέγεται μεταξύ των πόλεων που αξιολογούνται συστηματικά στο πλαίσιο του Smart City Index, γεγονός που αναδεικνύει τη διαχρονική της ενασχόληση με πολιτικές ψηφιακής και αστικής καινοτομίας.

Στο πλαίσιο ερευνητικής συνεργασίας μεταξύ της πόλης της Βαρκελώνης και του Barcelona Supercomputing Center, αναπτύχθηκε το vCity, ένα ψηφιακό δίδυμο πόλης που αποσκοπεί στη μεταφορά της έννοιας της «πόλης της εγγύτητας» σε ένα ψηφιακό περιβάλλον. Το vCity αποτελεί μέχρι σήμερα το μοναδικό ολοκληρωμένο παράδειγμα αστικού ψηφιακού διδύμου στην Ισπανία και λειτουργεί ως ανθρωποκεντρική πλατφόρμα που ενσωματώνει πολλαπλές διαστάσεις του αστικού συστήματος.

Η πλατφόρμα vCity χαρακτηρίζεται από ανοικτή αρχιτεκτονική και αρθρωτή δομή, επιτρέποντας την εύκολη πρόσβαση και χρήση από διαφορετικούς τύπους χρηστών. Παράλληλα, προσφέρει εργαλεία παρακολούθησης και αξιολόγησης δεικτών που ενισχύουν τη συνεργασία μεταξύ πολεοδόμων, φορέων χάραξης πολιτικής, δημόσιων οργανισμών, ιδιωτικών επιχειρήσεων, ακαδημαϊκής κοινότητας και κοινωνικών φορέων. Με τον τρόπο αυτό, το ψηφιακό δίδυμο της Βαρκελώνης δεν λειτουργεί μόνο ως εργαλείο ανάλυσης, αλλά και ως πλατφόρμα διακυβέρνησης και συντονισμού αστικών πολιτικών.

Η στρατηγική δομή του ψηφιακού διδύμου οργανώνεται γύρω από τέσσερις βασικούς άξονες, με κεντρικότερο το μοντέλο της «πόλης των 15 λεπτών», το οποίο επιδιώκει την εξασφάλιση πρόσβασης των κατοίκων σε βασικές υπηρεσίες σε απόσταση πεζής μετακίνησης. Συμπληρωματικά, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μετάβαση προς την κυκλική οικονομία, στην ενίσχυση της αστικής ανθεκτικότητας και στην προώθηση πιο βιώσιμων μορφών μετακίνησης. Το ψηφιακό δίδυμο λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης αυτών των στρατηγικών, επιτρέποντας την παρακολούθηση της προόδου και την αξιολόγηση της συμβολής επιμέρους παρεμβάσεων στους συνολικούς στόχους βιώσιμης αστικής ανάπτυξης.

Η επιλογή της Βαρκελώνης ως περίπτωσης μελέτης κρίνεται, συνεπώς, ιδιαίτερα τεκμηριωμένη, καθώς συνδυάζει υψηλό επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού, θεσμική υποστήριξη και την ανάπτυξη ενός ώριμου ψηφιακού

διδύμου που συνδέεται άμεσα με τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τις κοινωνικές ανάγκες. Το παράδειγμα αυτό προσφέρει πολύτιμα συμπεράσματα για τη διερεύνηση της δυνατότητας προσαρμογής αντίστοιχων στρατηγικών σε πόλεις μικρότερης κλίμακας και διαφορετικού θεσμικού πλαισίου, όπως οι ελληνικές πόλεις.

Όταν η έννοια της «έξυπνης πόλης» βρισκόταν ακόμη σε αρχικό στάδιο, η Βαρκελώνη είχε ήδη ξεκινήσει την **υλοποίηση ευφών τεχνολογιών** σε διάφορα αστικά συστήματα, όπως τα **δημόσια μέσα μεταφοράς, τους χώρους στάθμευσης, τον φωτισμό δρόμων και τη διαχείριση απορριμμάτων**. Η Βαρκελώνη έχει υιοθετήσει **ψηφιακά δίδυμα** με στόχο τη **βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας, τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη συνολική αναβάθμιση της ποιότητας ζωής** στην πόλη.

Η Βαρκελώνη αποτελεί διεθνές σημείο αναφοράς για τη στρατηγική αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών στον αστικό σχεδιασμό, αντιμετωπίζοντας το ψηφιακό δίδυμο όχι ως μεμονωμένο τεχνικό έργο αλλά ως βασικό εργαλείο άσκησης αστικής πολιτικής. Η στρατηγική της πόλης εστιάζει στη σύνδεση δεδομένων, πολεοδομικού σχεδιασμού και κοινωνικών στόχων, με έμφαση στη βιωσιμότητα, την ανθεκτικότητα και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Στο πλαίσιο αυτό, το City Digital Twin της Βαρκελώνης εντάσσεται σε μια ευρύτερη προσέγγιση «data-driven city», όπου τα ψηφιακά εργαλεία υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων σε στρατηγικό και επιχειρησιακό επίπεδο.

Η στρατηγική της Βαρκελώνης βασίζεται στη συστηματική συλλογή και ενοποίηση αστικών δεδομένων από πολλαπλές πηγές, όπως γεωχωρικά συστήματα, αισθητήρες, διοικητικά μητρώα και ψηφιακές πλατφόρμες. Το ψηφιακό δίδυμο λειτουργεί ως ενιαίο πλαίσιο στο οποίο συνδυάζονται τρισδιάστατα μοντέλα της πόλης, πληροφορίες χρήσεων γης, δεδομένα κινητικότητας και περιβαλλοντικοί δείκτες. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ανάλυση της πόλης ως σύνθετου συστήματος και τη διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ χωρικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων.

Η αξιοποίηση **Γεωχωρικών Ψηφιακών Διδύμων (Geospatial Digital Twins – GDT)** επέτρεψε στη Βαρκελώνη να ενισχύσει την αστική κινητικότητα και τη

συνολική βιωσιμότητα, μέσω πιο έξυπνων και εξελιγμένων μηχανισμών υποστήριξης αποφάσεων. Η πόλη ανέπτυξε ένα σύστημα έξυπνης κινητικότητας, το οποίο εντάσσεται στη στρατηγική της «15-λεπτης πόλης» και βασίζεται στη χρήση ψηφιακών διδύμων για τη βελτιστοποίηση των μεταφορικών δικτύων και τη βελτίωση της προσβασιμότητας (Ferrer-Ortiz et al., 2022).

Η γεωχωρική προσέγγιση των ψηφιακών διδύμων στη Βαρκελώνη στηρίζεται στη συλλογή δεδομένων πραγματικού χρόνου που αφορούν την κυκλοφορία, τη στάθμευση και τις δημόσιες μεταφορές, μέσω ενός εκτεταμένου δικτύου αισθητήρων, καμερών και συσκευών IoT εγκατεστημένων στις μεταφορικές υποδομές της πόλης. Το ψηφιακό δίδυμο ενημερώνεται συνεχώς με τα δεδομένα αυτά, παρέχοντας στις δημοτικές αρχές τη δυνατότητα παρακολούθησης και ανάλυσης της λειτουργίας του μεταφορικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Μέσω προηγμένων αναλυτικών εργαλείων και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης, καθίσταται δυνατή η αναγνώριση προτύπων κυκλοφορίας, σημείων συμφόρησης και μελλοντικών προκλήσεων κινητικότητας (Faliagka et al., 2024).

Η εφαρμογή του γεωχωρικού ψηφιακού διδύμου επέτρεψε επίσης την ολοκληρωμένη ανάλυση δεδομένων, την αξιολόγηση της κατανομής των πόρων και την κατανόηση της προσβασιμότητας σε αστικές υπηρεσίες. Μέσω μοντέλων προσομοίωσης και σεναρίων, η πολυπλοκότητα του αστικού συστήματος απλοποιείται, διευκολύνοντας την οπτικοποίηση πολλαπλών μεταβλητών και την υποστήριξη της λειτουργίας της πόλης (Ferrer-Ortiz et al., 2022).

Τα οφέλη από τη χρήση των γεωχωρικών ψηφιακών διδύμων στον τομέα των μεταφορών είναι πολλαπλά. Οι αρμόδιες αρχές μπορούν να βελτιώνουν ενεργά τη ροή της κυκλοφορίας, να μειώνουν τη συμφόρηση και να ενισχύουν τη χρήση των δημόσιων μεταφορών. Η παρακολούθηση της κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει τον εντοπισμό σημείων συμφόρησης και τη δυναμική προσαρμογή της σηματοδότησης, ενώ η ενσωμάτωση δεδομένων στάθμευσης συμβάλλει στη μείωση του χρόνου αναζήτησης θέσεων και στη βελτίωση της αστικής προσβασιμότητας. Παράλληλα, η ανάλυση δεδομένων δημόσιων συγκοινωνιών επιτρέπει τη βελτιστοποίηση δρομολογίων και χρονοδιαγραμμάτων, καθιστώντας

τα μέσα μαζικής μεταφοράς πιο αξιόπιστα και ελκυστικά για τους πολίτες (Faliagka et al., 2024).

Τέλος, το ψηφιακό δίδυμο λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης στρατηγικού σχεδιασμού, επιτρέποντας στους πολεοδόμους και στους φορείς λήψης αποφάσεων να προσομοιώνουν και να αξιολογούν εναλλακτικά σενάρια κινητικότητας, υποδομών και πολιτικών παρεμβάσεων πριν από την εφαρμογή τους στον φυσικό χώρο.

Το έργο City Digital Twin της Βαρκελώνης αναπτύσσεται κυρίως ως εργαλείο προσομοίωσης και αξιολόγησης σεναρίων σε μητροπολιτική κλίμακα. Μέσω του ψηφιακού διδύμου, η πόλη μπορεί να εξετάσει εναλλακτικές στρατηγικές χωρικής ανάπτυξης, πολιτικές κινητικότητας και παρεμβάσεις βιώσιμης αστικής αναβάθμισης πριν από την υλοποίησή τους στον φυσικό χώρο. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση του ψηφιακού διδύμου για τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων, όπως η ποιότητα αέρα, το μικροκλίμα και η ενεργειακή συμπεριφορά του αστικού ιστού.

Σε αντίθεση με άλλες πόλεις που δίνουν προτεραιότητα στη λεπτομερή ανάλυση σε επίπεδο κτιρίου, η Βαρκελώνη αξιοποιεί το ψηφιακό δίδυμο κυρίως ως εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού και αστικής διακυβέρνησης. Το City Digital Twin υποστηρίζει τη χάραξη δημόσιων πολιτικών, επιτρέποντας τη σύνδεση του πολεοδομικού σχεδιασμού με κοινωνικούς στόχους, όπως η μείωση των ανισοτήτων, η ενίσχυση του δημόσιου χώρου και η προώθηση βιώσιμων μορφών κινητικότητας. Παράλληλα, η πόλη προωθεί τη διαφάνεια και τη συμμετοχή των πολιτών, αξιοποιώντας οπτικοποιήσεις και ψηφιακά εργαλεία που καθιστούν τα σχέδια και τα σενάρια κατανοητά σε ευρύτερο κοινό. (Diaz-Sarachaga, 2024)

Συνολικά, η εμπειρία της Βαρκελώνης δείχνει ότι το City Digital Twin αποτελεί πρωτίστως ένα **στρατηγικό εργαλείο αστικού μετασχηματισμού**, το οποίο ενισχύει τον ρόλο των δεδομένων στον πολεοδομικό σχεδιασμό και στη διαμόρφωση βιώσιμων και ανθεκτικών πόλεων. Η έμφαση στη διακυβέρνηση, στη στρατηγική κλίμακα και στη σύνδεση με κοινωνικές πολιτικές διαφοροποιεί το μοντέλο της Βαρκελώνης από πιο τεχνικά προσανατολισμένες προσεγγίσεις και το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο ως παράδειγμα καλής πρακτικής σε διεθνές επίπεδο.

4.2.2 Εφαρμογές CDT στη Βαρκελώνη

Η Βαρκελώνη αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα ευρωπαϊκής πόλης που επενδύει συστηματικά στην αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών για τον αστικό και πολεοδομικό σχεδιασμό. Στο πλαίσιο της στρατηγικής της για τις έξυπνες πόλεις, έχουν αναπτυχθεί πλατφόρμες Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων (City Digital Twins), οι οποίες λειτουργούν ως δυναμικά ψηφιακά μοντέλα του αστικού χώρου και υποστηρίζουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Η προσέγγιση της Βαρκελώνης στα Ψηφιακά Δίδυμα υπερβαίνει τη στατική τρισδιάστατη απεικόνιση της πόλης και επικεντρώνεται στη συνδυαστική αξιοποίηση δεδομένων από διαφορετικούς τομείς, όπως η κινητικότητα, το περιβάλλον και οι αστικές υποδομές. Μέσω της ενσωμάτωσης χωρικών δεδομένων, ιστορικών πληροφοριών και δυναμικών ροών δεδομένων, τα ψηφιακά δίδυμα επιτρέπουν την ανάλυση της λειτουργίας της πόλης και την προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων πολεοδομικού σχεδιασμού.

Κεντρικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία διαδραματίζουν ερευνητικές πλατφόρμες που αναπτύσσονται σε συνεργασία με ακαδημαϊκά ιδρύματα και δημοτικούς φορείς, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την πλατφόρμα vCity, η οποία αναπτύσσεται από το Barcelona Supercomputing Center. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα εστιάζει σε μια ανθρωποκεντρική προσέγγιση των ψηφιακών διδύμων, δίνοντας έμφαση στην ανάλυση της πρόσβασης των πολιτών σε υπηρεσίες και στην αξιολόγηση χωρικών ανισοτήτων μέσω σεναρίων προσομοίωσης.

Μία από τις πιο χαρακτηριστικές εφαρμογές των ψηφιακών διδύμων στη Βαρκελώνη αφορά τη διερεύνηση του μοντέλου της «15-λεπτης πόλης», όπου μέσω του ψηφιακού μοντέλου αξιολογείται η δυνατότητα κάλυψης βασικών καθημερινών αναγκών σε μικρή χρονική απόσταση από την κατοικία. Τέτοιου είδους εφαρμογές αναδεικνύουν τη χρησιμότητα των ψηφιακών διδύμων ως εργαλείων στρατηγικού σχεδιασμού και όχι απλώς ως συστημάτων οπτικοποίησης δεδομένων.

Παρά τη σημαντική τεχνολογική πρόοδο, οι περισσότερες πλατφόρμες ψηφιακών διδύμων της Βαρκελώνης **λειτουργούν κυρίως σε ερευνητικό ή**

πυλοτικό επίπεδο και δεν είναι πλήρως ανοικτές στο ευρύ κοινό. Ωστόσο, η τεκμηρίωση των εφαρμογών τους μέσω επιστημονικών δημοσιεύσεων και τεχνικών αναφορών επιτρέπει την αποτίμηση των δυνατοτήτων και των περιορισμών τους, παρέχοντας πολύτιμα συμπεράσματα για άλλες πόλεις που επιδιώκουν να αναπτύξουν αντίστοιχες υποδομές.

Συνολικά, οι πλατφόρμες Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων της Βαρκελώνης αποτελούν ώριμα παραδείγματα αξιοποίησης δεδομενο-κεντρικών τεχνολογιών στον πολεοδομικό σχεδιασμό. Η εμπειρία της πόλης αναδεικνύει τη σημασία της θεσμικής υποστήριξης, της συνεργασίας μεταξύ δημόσιων φορέων και ερευνητικών ιδρυμάτων, καθώς και της προσαρμογής των ψηφιακών εργαλείων στις ιδιαίτερες ανάγκες του αστικού περιβάλλοντος.

Στη Βαρκελώνη, τα Ψηφιακά Δίδυμα αξιοποιούνται ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής έξυπνης πόλης για την **παρακολούθηση και βελτιστοποίηση βασικών αστικών λειτουργιών**, όπως οι μεταφορές, η διαχείριση απορριμμάτων και η κατανάλωση ενέργειας. Μέσω της ανάπτυξης ενός ψηφιακού μοντέλου της πόλης και της χρήσης προσομοιώσεων διαφορετικών σεναρίων, καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων.

Η προσέγγιση αυτή έχει συμβάλει στη **βελτίωση της ποιότητας ζωής των κατοίκων** και στην ενίσχυση της **περιβαλλοντικής βιωσιμότητας**, επιτρέποντας τη λήψη πιο τεκμηριωμένων και αποδοτικών αποφάσεων στον αστικό σχεδιασμό. Το παράδειγμα της Βαρκελώνης αναδεικνύει τις δυνατότητες των Ψηφιακών Διδύμων ως εργαλείων που μπορούν να αυξήσουν την αποδοτικότητα και τη λειτουργικότητα των αστικών υποδομών, ενισχύοντας παράλληλα τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των πόλεων.

4.3 Ελσίνκι

4.3.1 Helsinki 3d

4.3.1.1 Εξέλιξη της τρισδιάστατης αστικής μοντελοποίησης στο Ελσίνκι

Πρώιμη περίοδος (δεκαετία 1980)

Η εισαγωγή της τρισδιάστατης αναπαράστασης στον αστικό σχεδιασμό του Ελσίνκι ξεκίνησε κατά τη δεκαετία του 1980, σε μια εποχή όπου τα ψηφιακά εργαλεία βρίσκονταν ακόμη σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης. Η ανάγκη για οπτικοποίηση πολεοδομικών παρεμβάσεων προέκυψε μέσα από έναν διαγωνισμό ιδεών που αφορούσε την αναμόρφωση της κεντρικής ζώνης Kamppi–Töölönlahti. Στο πλαίσιο αυτό, επιλεγμένα εμβληματικά κτίρια της πόλης αποτέλεσαν τα πρώτα αντικείμενα τρισδιάστατης ψηφιακής αποτύπωσης, λειτουργώντας κυρίως ως εργαλεία υποστήριξης του σχεδιαστικού διαλόγου.

Εδραίωση των ψηφιακών μοντέλων (δεκαετία 1990)

Κατά τη δεκαετία του 1990, η χρήση τρισδιάστατων μοντέλων εντάχθηκε πιο συστηματικά στις διαδικασίες πολεοδομικού σχεδιασμού. Το 1999 αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο εικονικό μοντέλο της περιοχής Töölönlahti, με στόχο τον συντονισμό και τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών προτάσεων. Η παρουσίασή του στο ευρύ κοινό, μέσω διαδραστικής εικονικής περιήγησης σε έκθεση αστικού σχεδιασμού, σηματοδότησε μια από τις πρώτες προσπάθειες συμμετοχικού σχεδιασμού με ψηφιακά μέσα.

Τεχνολογικοί περιορισμοί και προκλήσεις (δεκαετία 2000)

Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η παραγωγή και διαχείριση τρισδιάστατων αστικών μοντέλων παρέμενε μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία. Η έλλειψη αυτοματοποιημένων ροών εργασίας, σε συνδυασμό με την ανάγκη χειροκίνητης μοντελοποίησης και την περιορισμένη υπολογιστική ισχύ, καθιστούσε τα έργα υψηλού κόστους και μεγάλης χρονικής διάρκειας. Τα τεχνικά αυτά εμπόδια περιόριζαν τη χρήση των 3D μοντέλων κυρίως σε μεγάλης κλίμακας και στρατηγικής σημασίας έργα.

Τεχνολογική ωρίμανση (δεκαετία 2010)

Η επόμενη δεκαετία χαρακτηρίστηκε από σημαντική τεχνολογική πρόοδο στον τομέα της αστικής ψηφιακής αναπαράστασης. Η ενσωμάτωση σύγχρονων μεθόδων αποτύπωσης, όπως η τρισδιάστατη σάρωση με λέιζερ και η αξιοποίηση νεφών σημείων (point clouds), επέτρεψε την ταχύτερη και ακριβέστερη δημιουργία μοντέλων. Παράλληλα, η ανάπτυξη διεθνών προτύπων και σχημάτων δεδομένων,

όπως το CityGML, συνέβαλε στη διαλειτουργικότητα των συστημάτων και στη μακροχρόνια αξιοποίηση των ψηφιακών πόρων.

Σύγχρονες προσεγγίσεις και ψηφιακό δίδυμο

Σήμερα, η τρισδιάστατη αναπαράσταση του Ελσίνκι εντάσσεται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο ψηφιακού μετασχηματισμού της πόλης. Τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη και οι μηχανές πραγματικού χρόνου αξιοποιούνται για την ανάλυση, την προσομοίωση και την οπτικοποίηση αστικών φαινομένων. Το ψηφιακό μοντέλο της πόλης λειτουργεί πλέον ως «ψηφιακό δίδυμο», ένα δυναμικό σύστημα που εξελίσσεται διαρκώς, αντανακλώντας τις αλλαγές και τις ανάγκες της πραγματικής αστικής δομής. (Helsinki Finland, 2025)

4.3.1.2 Επιμέρους συνιστώσες του Helsinki 3D

Το Helsinki 3D δεν αποτελεί ένα ενιαίο και ομοιογενές μοντέλο, αλλά ένα σύνολο διακριτών ψηφιακών αναπαραστάσεων και θεματικών εφαρμογών, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες ανάλυσης, σχεδιασμού και οπτικοποίησης του αστικού χώρου.

1. Τρισδιάστατο πλέγμα (3D Mesh)

Το τρισδιάστατο πλέγμα συνιστά μια φωτορεαλιστική αναπαράσταση της πόλης, η οποία βασίζεται στη σύνθεση γεωμετρίας και υφών που προκύπτουν από αεροφωτογραφίες και νέφη σημείων. Το 3D mesh αποδίδει με υψηλή λεπτομέρεια την εξωτερική μορφή του δομημένου και φυσικού περιβάλλοντος, ωστόσο δεν περιλαμβάνει αναλυτική σημασιολογική πληροφορία για τα επιμέρους αντικείμενα. Χρησιμοποιείται κυρίως για οπτικοποίηση, επικοινωνία σχεδιαστικών προτάσεων και εμπύθιση του χρήστη στον αστικό χώρο.

2. Αστικό μοντέλο δεδομένων (Urban Data Model)

Το αστικό μοντέλο δεδομένων αποτελεί τη δομημένη, σημασιολογική αναπαράσταση της πόλης και περιλαμβάνει τρισδιάστατα αντικείμενα, όπως κτίρια, οδικό δίκτυο και υποδομές, συνδεδεμένα με θεματικά και περιγραφικά δεδομένα. Σε αντίθεση με το 3D mesh, το Urban Data Model επιτρέπει την πραγματοποίηση χωρικών και αναλυτικών διεργασιών, καθώς υποστηρίζει επίπεδα λεπτομέρειας και πρότυπα διαλειτουργικότητας, όπως το CityGML. Αποτελεί τη

βάση για αναλύσεις που σχετίζονται με τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη διαχείριση της πόλης.

Σύμφωνα με συνέντευξη στελέχους που κατείχε ηγετική θέση στον τομέα του πολεοδομικού σχεδιασμού, ο οργανισμός buildingSMART Finland έχει αναπτύξει και συγκεντρώνει ένα ψηφιακό εγχειρίδιο αστικού σχεδιασμού, το οποίο παρέχει γενικές κατευθύνσεις σχετικά με τις πρακτικές και τα πρότυπα τρισδιάστατης μοντελοποίησης πόλεων. Το εγχειρίδιο αυτό περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, αναφορές στο πρότυπο CityGML, το οποίο αποτελεί ανοικτό μοντέλο δεδομένων και βασίζεται σε μορφή XML για την αποθήκευση και την ανταλλαγή εικονικών τρισδιάστατων μοντέλων πόλης.

Αρκετές φινλανδικές πόλεις, όπως το Espoo, το Turku και το Kuopio, έχουν ήδη ενσωματώσει το CityGML στις διαδικασίες τους, αξιοποιώντας γεωγραφικά πληροφοριακά συστήματα, όπως το Tekla CityGML, τα οποία υποστηρίζουν την παραγωγή περιεχομένου και τη διαχείριση αστικών δεδομένων βασισμένων στο συγκεκριμένο πρότυπο.

Η πόλη του Ελσίνκι ξεκίνησε πειραματικές εφαρμογές νέων ψηφιακών μεθόδων μοντελοποίησης το 2015, υιοθετώντας το CityGML στο πλαίσιο της τρισδιάστατης αστικής αναπαράστασης. Από την εμπειρία αυτή διαπιστώθηκε ότι, σε σύγκριση με τα στατικά μοντέλα τύπου CAD, το CityGML προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα, αναβαθμίζοντας τον τρόπο με τον οποίο υποστηρίζονται ο αστικός σχεδιασμός και η χωρική ανάλυση. Έκτοτε, το πρότυπο έχει εφαρμοστεί σε πληθώρα πολεοδομικών έργων στο Ελσίνκι.

Η έννοια του ψηφιακού διδύμου βασίζεται στη διαχρονική αξιοποίηση του μοντέλου, καθώς επιτρέπει τη συνεχή εμπλουτισμένη χρήση του μέσα από τη συσσώρευση και τη διασύνδεση δεδομένων. Η συνδυαστική αξιοποίηση διαφορετικών συνόλων πληροφορίας ενισχύει σημαντικά την προστιθέμενη αξία του ψηφιακού μοντέλου, καθιστώντας το δυναμικό εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Το CityGML διευκολύνει τον εμπλουτισμό των ψηφιακών μοντέλων πόλης, καθώς υποστηρίζει την ενσωμάτωση εξωτερικών δεδομένων στα υφιστάμενα αστικά μοντέλα. Η δυνατότητα αυτή βελτιώνει τόσο το πληροφοριακό περιεχόμενο όσο και την οπτική αναπαράσταση των σχεδίων. Επιπλέον, το γεγονός ότι

πρόκειται για ανοικτό και δωρεάν πρότυπο καθιστά την υιοθέτησή του οικονομικά προσιτή για διαφορετικούς φορείς αστικής ανάπτυξης. Παράλληλα, η ανεξαρτησία του από συγκεκριμένους προμηθευτές, σε συνδυασμό με την πολιτική ανοικτών δεδομένων του Ελσίνκι, ενισχύει τη συνεργασία με πανεπιστημιακά ιδρύματα και άλλες πόλεις, τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του CityGML στον αστικό σχεδιασμό του Ελσίνκι αποτελεί η περιοχή Kalasatama, η οποία αναπτύσσεται ως ζώνη έξυπνης πόλης. Στο πλαίσιο της πρωτοβουλίας δημιουργίας ψηφιακού διδύμου για την περιοχή, κατά την περίοδο 2018–2019, αναπτύχθηκαν σημασιολογικά μοντέλα υψηλής ποιότητας και φωτορεαλιστικά μοντέλα τύπου reality mesh. Τα μοντέλα αυτά λειτούργησαν ως βασική υποδομή για υφιστάμενα και μελλοντικά πειραματικά έργα ψηφιακού αστικού χαρακτήρα.

Για την υποστήριξη της πλατφόρμας του ψηφιακού διδύμου αναπτύχθηκε η εφαρμογή Open Cities Planner, η οποία στόχευε στη διασύνδεση δεδομένων και στη δημιουργία οπτικών σεναρίων χρήσης, τα οποία μπορούσαν να αξιολογηθούν στο εικονικό περιβάλλον της Kalasatama πριν από την υλοποίησή τους. Παράλληλα, η πλατφόρμα συνέβαλε στην ενίσχυση της συμμετοχής των πολιτών και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κατοίκων της περιοχής. Ενδεικτικά, μέσω ενός εργαλείου συμμετοχικού GIS, διερευνήθηκαν οι προτιμήσεις των κατοίκων σχετικά με σημεία ενδιαφέροντος που θα πρότειναν σε επισκέπτες της περιοχής.

Τα σημασιολογικά και φωτορεαλιστικά μοντέλα της Kalasatama αξιοποιήθηκαν επίσης για περιβαλλοντικές προσομοιώσεις, όπως η ανάλυση ροής ανέμου και η μελέτη της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι προσομοιώσεις αυτές επέτρεψαν την εξέταση της σκίασης, της συμπεριφοράς των αερορευμάτων και της επίδρασης της ηλιακής ενέργειας στο δομημένο περιβάλλον της περιοχής. (Hämäläinen, 2021)

3. Άτλας Ενέργειας και Κλίματος (Energy and Climate Atlas)

Ο Άτλας Ενέργειας και Κλίματος είναι μια θεματική εφαρμογή που αξιοποιεί το τρισδιάστατο μοντέλο της πόλης για την ανάλυση ενεργειακών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικές με την κατανάλωση ενέργειας, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, το δυναμικό ηλιακής

ενέργειας και τη θερμική συμπεριφορά των κτιρίων. Η ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων στο Helsinki 3D επιτρέπει την υποστήριξη πολιτικών βιωσιμότητας και στρατηγικών για την κλιματική προσαρμογή.

4. Ιστορικό πολεοδομικό σχέδιο Munkkiniemi–Haaga (1915)

Το ιστορικό σχέδιο Munkkiniemi–Haaga του 1915 εντάσσεται στο Helsinki 3D ως ψηφιακή αναπαράσταση πολεοδομικού χαρακτήρα. Το σχέδιο αυτό αποτυπώνει μια πρώιμη και ιδιαίτερα σημαντική πρόταση αστικής ανάπτυξης και λειτουργεί ως εργαλείο για τη μελέτη της ιστορικής εξέλιξης της πόλης. Η τρισδιάστατη ανασύσταση του σχεδίου επιτρέπει τη σύγκριση μεταξύ ιστορικών οραμάτων και της σύγχρονης αστικής πραγματικότητας.

5. Ψηφιακά δίδυμα Kalasatama (Kalasatama Digital Twins)

Τα ψηφιακά δίδυμα της περιοχής Kalasatama αποτελούν ένα προηγμένο παράδειγμα εφαρμογής του Helsinki 3D σε επίπεδο γειτονιάς. Συνδυάζουν τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής λεπτομέρειας με δυναμικά δεδομένα, όπως κυκλοφορία, ενέργεια και ανθρώπινη δραστηριότητα. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται για προσομοιώσεις σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο και υποστηρίζουν τον πειραματισμό με νέες μορφές αστικού σχεδιασμού και έξυπνων πόλεων.

4.3.1.3 Η πλατφόρμα Helsinki 3D: Δυνατότητες και εφαρμογές

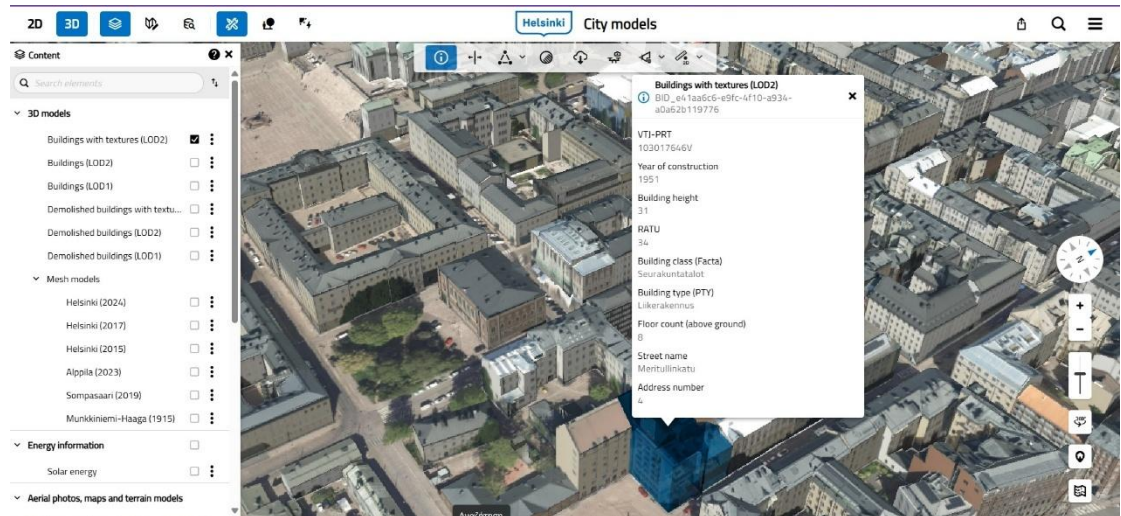
Η πλατφόρμα **Helsinki 3D** (Helsinki 3d , n.d.) αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ψηφιακής απεικόνισης και ανάλυσης της πόλης, που παρέχει τρισδιάστατα μοντέλα υψηλής ακρίβειας και δυνατότητα διαδραστικής χρήσης μέσω φυλλομετρητή. Η πλατφόρμα συνδυάζει γεωμετρικά δεδομένα, σημασιολογικές πληροφορίες και θεματικά σύνολα, δημιουργώντας ένα δυναμικό ψηφιακό δίδυμο της πόλης του Ελσίνκι.

Δομή και βασικά επίπεδα

Η πλατφόρμα περιλαμβάνει δύο βασικά επίπεδα μοντελοποίησης:

1. **Τρισδιάστατο πλέγμα (3D mesh):** Παρέχει φωτορεαλιστική απεικόνιση των κτιρίων, των δρόμων και άλλων αστικών στοιχείων. Το mesh παράγεται από εναέριες φωτογραφίες και point clouds και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για

οπτικοποίηση, μέτρηση όγκων και αποστάσεων, καθώς και ενσωμάτωση σε εφαρμογές VR/AR ή εργαλεία τρισδιάστατης σχεδίασης.

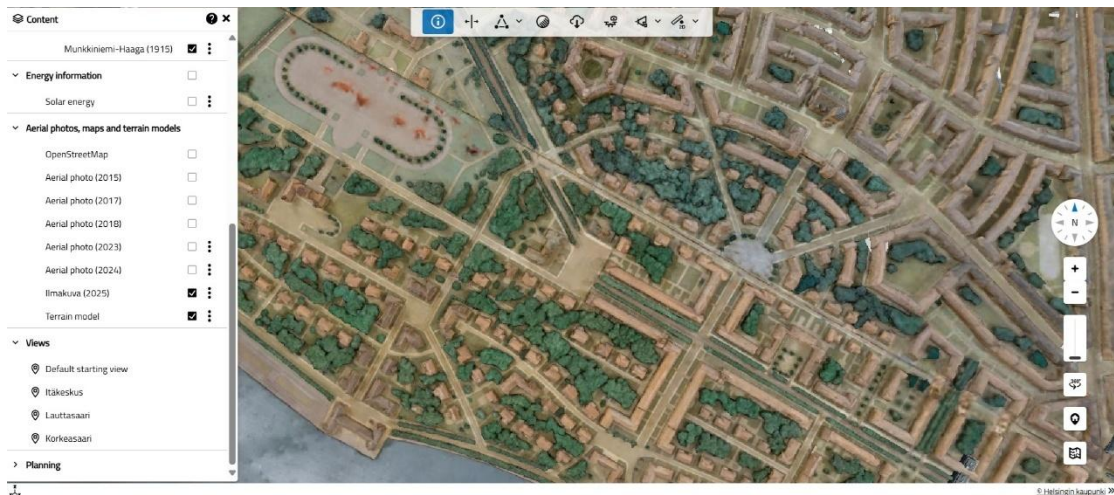


Εικόνα 3 Πληροφορίες κτιρίων στο ψηφιακό δίδυμο

2. Αστικό μοντέλο δεδομένων (Urban Data Model): Συνδέει τη γεωμετρία με σημασιολογικά και περιγραφικά δεδομένα, όπως χρήση γης, αριθμό ορόφων, έτος κατασκευής ή περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά. Το μοντέλο είναι συμβατό με το πρότυπο **CityGML**, το οποίο είναι ανοικτό, δωρεάν και ανεξάρτητο από προμηθευτές, επιτρέποντας την ενσωμάτωση εξωτερικών δεδομένων και τη χρήση σε GIS εφαρμογές.

Θεματικά και εξειδικευμένα δεδομένα

Η πλατφόρμα υποστηρίζει και θεματικά στρώματα, όπως ο **Άτλας Ενέργειας και Κλίματος**, που περιλαμβάνει δεδομένα για ενεργειακή κατανάλωση, ηλιακή ακτινοβολία και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά κτιρίων. Επίσης, παρέχει ιστορικά και ειδικά μοντέλα, όπως το πολεοδομικό σχέδιο **Munkkiniemi–Haaga (1915)** και την περιοχή **Kalasatama**, όπου το ψηφιακό δίδυμο συνδυάζει σημασιολογικά μοντέλα και reality mesh για πειραματισμό, προσομοιώσεις ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας και συμμετοχή πολιτών μέσω διαδραστικών εργαλείων.



Εικόνα 4 Πολεοδομικό σχέδιο Munkkiniemi–Haaga (1915)

Δυνατότητες διαδραστικής χρήσης

Η πλατφόρμα επιτρέπει:

- Περιήγηση σε τρισδιάστατο περιβάλλον με προβολή όψεων κτιρίων ή χωρίς υφές.
- Αναζήτηση κτιρίων και στοιχείων βάσει διεύθυνσης ή χαρακτηριστικών.
- Λήψη δεδομένων σε μορφές **OBJ**, **3MX** ή **CityGML** για επεξεργασία σε λογισμικά CAD ή GIS.
- Ανάλυση και οπτικοποίηση δεδομένων για συμμετοχικές διαδικασίες και εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Η ανοιχτή φύση των δεδομένων σε συνδυασμό με την πολιτική ανοικτών δεδομένων του Ελσίνκι επιτρέπει την ευρεία διάθεση του περιεχομένου, ενισχύοντας τη συνεργασία με πανεπιστήμια, άλλες πόλεις και φορείς αστικής ανάπτυξης. Η πλατφόρμα αποτελεί επομένως ένα ολοκληρωμένο εργαλείο που υποστηρίζει **σχεδιασμό, ανάλυση, συμμετοχή και πειραματισμό** στην ψηφιακή πόλη, καθιστώντας το Helsinki 3D σημείο αναφοράς για τις σύγχρονες πρακτικές αστικού ψηφιακού σχεδιασμού.

4.3.2 Εφαρμογές στον πολεοδομικό σχεδιασμό

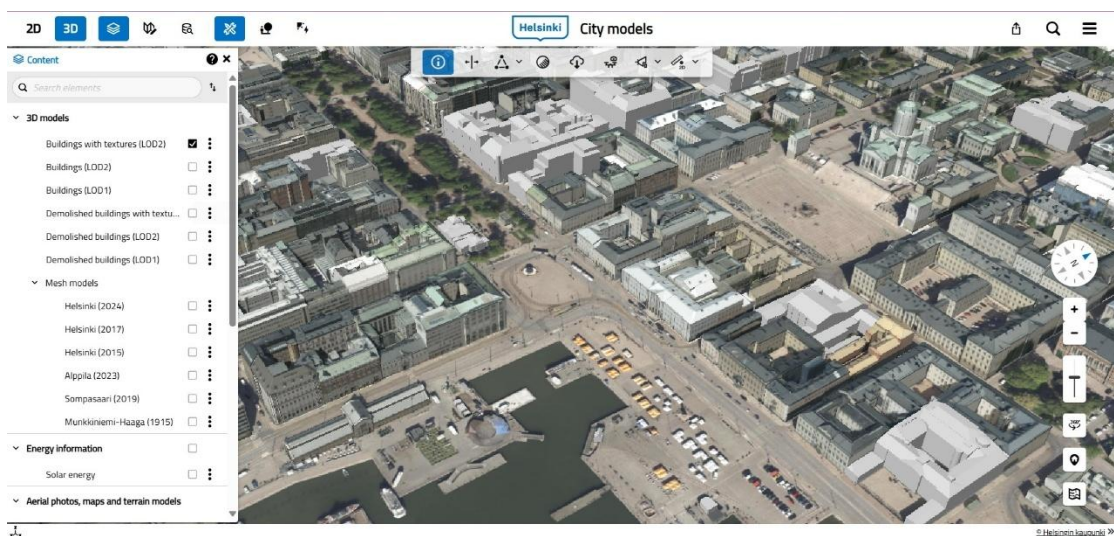
Η πλατφόρμα **Helsinki 3D** (<https://kartta.hel.fi/3d/>) παρέχει στους πολεοδόμους και τους σχεδιαστές ένα πλήρες σύνολο εργαλείων που υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων και την αξιολόγηση πολεοδομικών σχεδίων σε τρισδιάστατο

περιβάλλον. Η πλατφόρμα συνδυάζει φωτορεαλιστικά τρισδιάστατα πλέγματα (3D mesh) με αστικά δεδομένα και σημασιολογικά μοντέλα, παρέχοντας εργαλεία οπτικοποίησης, ανάλυσης και συμμετοχικής διαχείρισης της πόλης.

Κύρια εργαλεία της πλατφόρμας για πολεοδομικό σχεδιασμό

1. Περιήγηση και προβολή 3D μοντέλων:

Οι χρήστες μπορούν να περιηγηθούν στον τρισδιάστατο αστικό χώρο, να περιστρέψουν την κάμερα, να αλλάξουν οπτική γωνία και να εμφανίσουν ή να αποκρύψουν υφές και φωτορεαλιστικές όψεις. Αυτό επιτρέπει την άμεση αξιολόγηση της οπτικής ενσωμάτωσης νέων κτιρίων και υποδομών στο υφιστάμενο περιβάλλον.



Εικόνα 5 3d απεικόνιση κτιρίων με υφές υλικών

2. Εργαλεία μέτρησης και ανάλυσης:

Η πλατφόρμα παρέχει δυνατότητες μέτρησης αποστάσεων, ύψους κτιρίων, όγκου και επιφανειών. Επιπλέον, μπορούν να γίνουν προσομοιώσεις σκίασης και ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και ανάλυση ροής ανέμου, ώστε να αξιολογηθεί η επίδραση νέων έργων στο μικροκλίμα της πόλης.



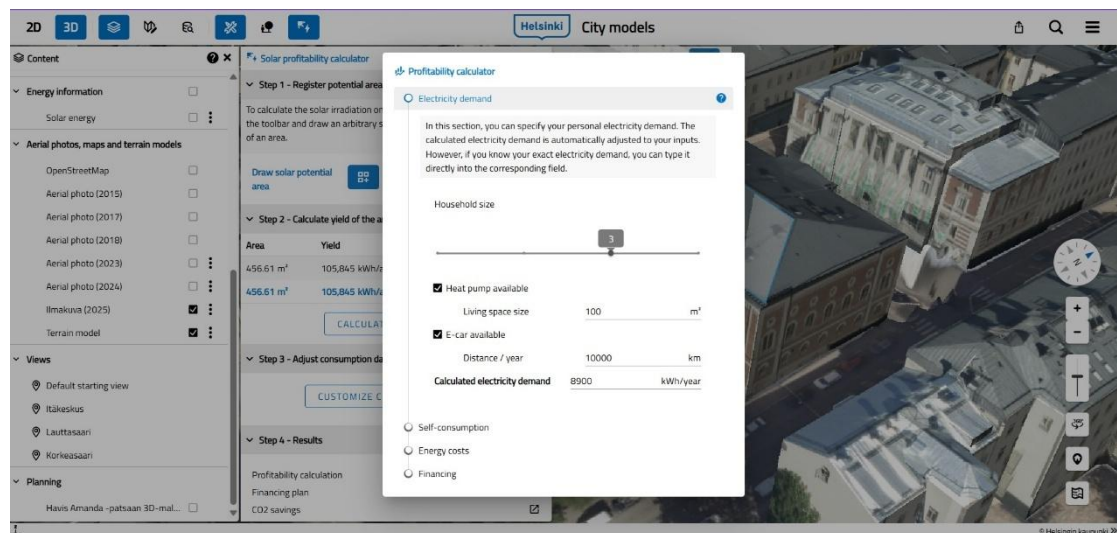
Εικόνα 6 Απεικόνιση ηλιακής ακτινοβολίας και ετήσιο διάγραμμα

3. Αναζήτηση και φίλτρα δεδομένων:

Τα κτίρια και τα αστικά αντικείμενα μπορούν να αναζητηθούν με βάση χαρακτηριστικά όπως διεύθυνση, αριθμός ορόφων ή χρήση γης. Οι πολυεσδομοί μπορούν να εφαρμόσουν φίλτρα για να συγκρίνουν διαφορετικές περιοχές ή να εστιάσουν σε συγκεκριμένα στοιχεία.

4. Διαχείριση θεματικών στρωμάτων:

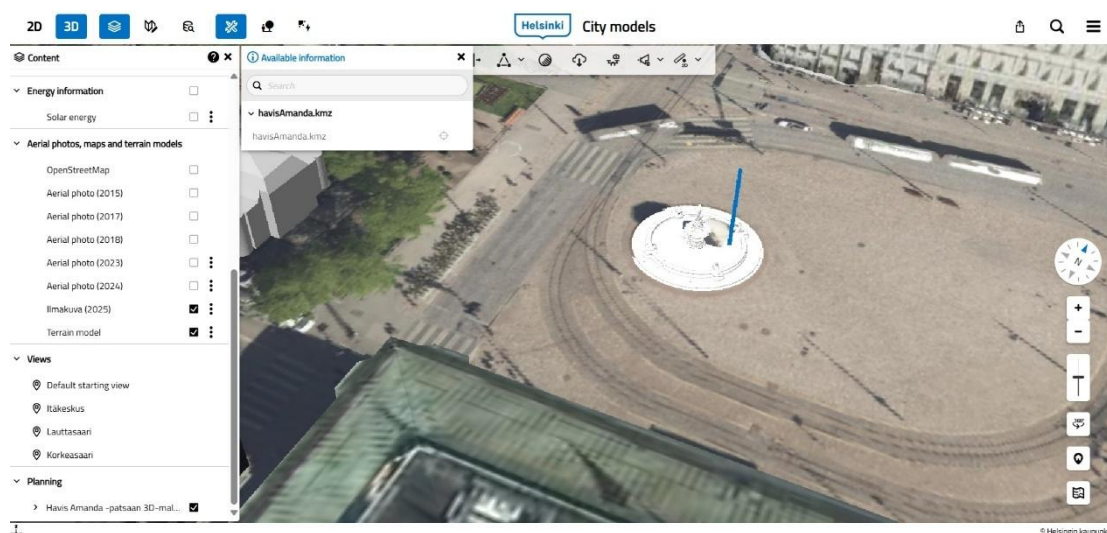
Μέσω της πλατφόρμας, μπορούν να ενεργοποιηθούν στρώματα όπως το **Energy and Climate Atlas**, που παρέχει δεδομένα ενεργειακής κατανάλωσης και ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε κτίριο. Αυτό επιτρέπει την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών παραμέτρων στην αξιολόγηση πολυεσδομικών σχεδίων.



Εικόνα 7 Υπολογισμός οικονομικής αποδοτικότητας φωτοβολταϊκών

5. Συμμετοχικά εργαλεία και πειραματισμός:

Η πλατφόρμα επιτρέπει τη χρήση εφαρμογών όπως το **Open Cities Planner**, όπου οι πολίτες μπορούν να εκφράσουν προτιμήσεις, να σχολιάσουν ή να αξιολογήσουν σημεία ενδιαφέροντος στην πόλη. Παράλληλα, οι σχεδιαστές μπορούν να δημιουργήσουν εναλλακτικά σενάρια ανάπτυξης και να δοκιμάσουν διαφορετικές επιλογές σχεδίου πριν την υλοποίησή τους.



Εικόνα 8 Εισαγωγή έργου στο CDT για διαβούλευση

6. Λήψη και επεξεργασία δεδομένων:

Η Helsinki 3D επιτρέπει την εξαγωγή των δεδομένων σε μορφές **CityGML**, **OBJ** ή **3MX**, ώστε να χρησιμοποιηθούν σε GIS ή CAD εφαρμογές για πιο αναλυτικές μελέτες, προσομοιώσεις ή επεξεργασία μοντέλων.

Συνολικά, τα εργαλεία της πλατφόρμας επιτρέπουν στα πλαίσια του πολεοδομικού σχεδιασμού να συνδυάζουν **οπτικοποίηση, ανάλυση, περιβαλλοντική αξιολόγηση και συμμετοχικό σχεδιασμό**, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη ψηφιακή βάση για τον σχεδιασμό της πόλης. Η χρήση τους αυξάνει την ακρίβεια, τη διαφάνεια και τη συμμετοχικότητα στις πολεοδομικές διαδικασίες.

4.4 Άμστερνταμ

4.4.1 Amsterdam 3D και Netherlands3D ως εργαλεία πολεοδομικού

σχεδιασμού

Η Ολλανδία αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας όπου τα ψηφιακά δίδυμα αξιοποιούνται συστηματικά για τον πολεοδομικό και χωρικό σχεδιασμό, τόσο σε αστική όσο και σε εθνική κλίμακα. Στο πλαίσιο αυτό, το Amsterdam 3D και το Netherlands3D λειτουργούν συμπληρωματικά, υποστηρίζοντας διαφορετικά επίπεδα λήψης αποφάσεων στον σχεδιασμό του αστικού χώρου.

Το Amsterdam 3D αποτελεί το ψηφιακό δίδυμο της πόλης του Άμστερνταμ και χρησιμοποιείται άμεσα ως εργαλείο πολεοδομικού σχεδιασμού. Μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης των κτιρίων και του αστικού ιστού, οι πολεοδόμοι μπορούν να αξιολογήσουν προτάσεις νέας δόμησης, να εξετάσουν τον όγκο και το ύψος των κτιρίων και να μελετήσουν τις επιπτώσεις των παρεμβάσεων στο αστικό τοπίο. Η πλατφόρμα υποστηρίζει αναλύσεις σκίασης, ηλιακής ακτινοβολίας και πυκνότητας δόμησης, οι οποίες είναι κρίσιμες για τη βιωσιμότητα και την ποιότητα ζωής στην πόλη. Παράλληλα, η χρήση ανοικτών προτύπων (CityGML, CityJSON) επιτρέπει τη σύνδεση του 3D μοντέλου με πολεοδομικά δεδομένα και GIS εφαρμογές.

Το Netherlands3D, από την άλλη πλευρά, λειτουργεί ως εθνική πλατφόρμα υποδομής που υποστηρίζει την ανάπτυξη και ενοποίηση ψηφιακών διδύμων, όπως το Amsterdam 3D. Αν και δεν αποτελεί από μόνο του πολεοδομικό σχέδιο, παρέχει το τεχνολογικό πλαίσιο για τη συνδυασμένη ανάλυση γεωχωρικών δεδομένων, τη διαχείριση διαφορετικών επιπέδων πληροφορίας και την υποστήριξη σύνθετων χωρικών σεναρίων. Μέσω της ενσωμάτωσης εθνικών γεωχωρικών δεδομένων και τρισδιάστατων μοντέλων, το Netherlands3D διευκολύνει τον στρατηγικό σχεδιασμό, επιτρέποντας τη σύγκριση περιοχών, την αξιολόγηση χωρικών πολιτικών και τον συντονισμό παρεμβάσεων σε ευρύτερη κλίμακα.

Η συνδυαστική χρήση των δύο πλατφορμών αναδεικνύει τον ρόλο των ψηφιακών διδύμων ως εργαλείων υποστήριξης του πολεοδομικού σχεδιασμού. Το Amsterdam 3D προσφέρει λεπτομερή ανάλυση σε επίπεδο πόλης και γειτονιάς, ενώ

το Netherlands3D παρέχει το πλαίσιο για τη διασύνδεση και την κλιμάκωση αυτών των αναλύσεων σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Με αυτόν τον τρόπο, τα ψηφιακά δίδυμα συμβάλλουν στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, στη βιώσιμη ανάπτυξη και στη διαφάνεια των πολεοδομικών διαδικασιών. ((Amsterdam Netherlands, 2026)_(3D Bag Netherlands, n.d.)_(Twin4Resilience, 2026)



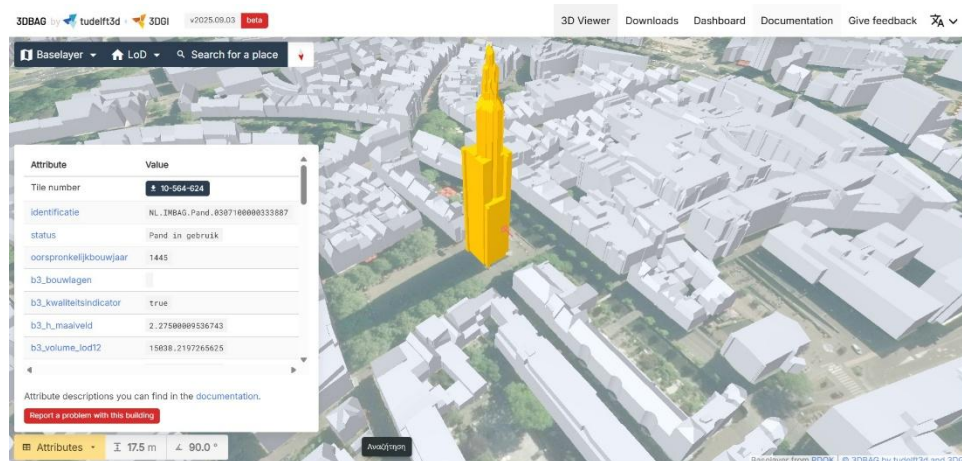
Εικόνα 9 Netherlands City digital twin

4.4.2 Μοντέλα και διαχείριση δεδομένων

Το Άμστερνταμ αποτελεί ένα από τα πλέον χαρακτηριστικά παραδείγματα ευρωπαϊκής πόλης που έχει ενσωματώσει συστηματικά τα ψηφιακά μοντέλα και τη διαχείριση δεδομένων στον πολεοδομικό σχεδιασμό και στη συνολική στρατηγική έξυπνης πόλης. Στο πλαίσιο του Amsterdam Smart City, η ψηφιακή υποδομή δεν αντιμετωπίζεται ως υποστηρικτικό τεχνολογικό εργαλείο, αλλά ως βασικός μηχανισμός κατανόησης, ανάλυσης και διαμόρφωσης του αστικού χώρου. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στη συνδυαστική αξιοποίηση τρισδιάστατων αστικών μοντέλων, γεωχωρικών συστημάτων και ανοικτών δεδομένων, τα οποία επιτρέπουν τη μετάβαση από τον παραδοσιακό, στατικό σχεδιασμό σε μια δυναμική και δεδομενο-κεντρική διαδικασία.

Κεντρικό ρόλο στο ψηφιακό οικοσύστημα του Άμστερνταμ διαδραματίζουν τα τρισδιάστατα αστικά μοντέλα που βασίζονται στο 3D BAG, την εθνική τρισδιάστατη βάση δεδομένων κτιρίων της Ολλανδίας. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται στο Amsterdam 3D, το οποίο λειτουργεί ως ψηφιακό δίδυμο της

πόλης και παρέχει συνεπή και επικαιροποιημένη απεικόνιση του δομημένου περιβάλλοντος. Μέσω της χρήσης αυτών των μοντέλων, οι πολεοδόμοι μπορούν να αναλύσουν τον όγκο, το ύψος και την πυκνότητα της δόμησης, καθώς και να αξιολογήσουν τις επιπτώσεις νέων παρεμβάσεων στο αστικό τοπίο. Η υιοθέτηση ανοικτών προτύπων, όπως το CityGML και το CityJSON, επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα των δεδομένων και τη σύνδεσή τους με εργαλεία χωρικής ανάλυσης.



Εικόνα 10 Amsterdam 3d BAG

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών αποτελούν τον βασικό κορμό ενοποίησης των δεδομένων στο Άμστερνταμ, καθώς επιτρέπουν τη συσχέτιση της τρισδιάστατης γεωμετρίας με θεματικές πληροφορίες, όπως χρήσεις γης, διοικητικά όρια, πολεοδομικοί κανονισμοί και περιβαλλοντικοί δείκτες. Παράλληλα, τα μοντέλα BIM χρησιμοποιούνται σε επίπεδο κτιρίου και τεχνικών έργων, προσφέροντας υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας σχετικά με τη δομή και τη λειτουργία των κατασκευών. Η σταδιακή σύγκλιση BIM και GIS στο πλαίσιο του Amsterdam Smart City επιτρέπει την πολυκλιμακωτή ανάλυση του αστικού χώρου, γεφυρώνοντας το χάσμα μεταξύ αρχιτεκτονικού και πολεοδομικού σχεδιασμού.

Η διαχείριση των δεδομένων βασίζεται σε πολιτικές ανοικτών δεδομένων και σε πρακτικές που προωθούν τη διαφάνεια, τη διαλειτουργικότητα και την επαναχρησιμοποίηση της πληροφορίας. Τα αστικά δεδομένα προέρχονται από ετερογενείς πηγές, όπως εθνικά και δημοτικά μητρώα, γεωχωρικά σύνολα δεδομένων, αισθητήρες IoT και ψηφιακές πλατφόρμες συμμετοχής πολιτών. Η

σημασιολογική οργάνωση αυτών των δεδομένων, δηλαδή η σύνδεση της γεωμετρικής πληροφορίας με λειτουργικά και περιγραφικά χαρακτηριστικά, επιτρέπει την πραγματοποίηση σύνθετων αναλύσεων, όπως έλεγχος πολεοδομικών περιορισμών, εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων ανάπτυξης. (Gemeente Amsterdam, Φεβρουάριος)

Στο πλαίσιο αυτό, το Amsterdam Smart City αξιοποιεί τα ψηφιακά μοντέλα και τη διαχείριση δεδομένων ως εργαλεία υποστήριξης της λήψης αποφάσεων, ενισχύοντας την ποιότητα του πολεοδομικού σχεδιασμού και τη βιώσιμη ανάπτυξη της πόλης. Η δυνατότητα οπτικοποίησης και ανάλυσης του αστικού χώρου σε τρισδιάστατο περιβάλλον διευκολύνει την κατανόηση σύνθετων χωρικών ζητημάτων, τόσο από τους ειδικούς όσο και από τους πολίτες, συμβάλλοντας στη διαφάνεια και στη συμμετοχική διακυβέρνηση. Συνολικά, το Άμστερνταμ αναδεικνύεται σε πρότυπο πόλης όπου τα ψηφιακά μοντέλα και η συστηματική διαχείριση δεδομένων δεν αποτελούν αυτοσκοπό, αλλά ουσιαστικό μέσο για τον σύγχρονο και τεκμηριωμένο πολεοδομικό σχεδιασμό.

(GeoBIM Benchmark, 2026)



Εικόνα 11 Πληροφορίες κτιρίων

4.5 Συγκριτική ανάλυση – Συμπεράσματα

4.5.1 Κοινά χαρακτηριστικά και καλές πρακτικές

Η συγκριτική ανάλυση των περιπτώσεων της Βαρκελώνης, του Ελσίνκι και του Άμστερνταμ αναδεικνύει έναν κοινό πυρήνα αρχών και πρακτικών που χαρακτηρίζουν τη σύγχρονη αξιοποίηση ψηφιακών διδύμων στον πολεοδομικό σχεδιασμό. Και στις τρεις πόλεις, η ανάπτυξη ψηφιακών μοντέλων δεν αντιμετωπίζεται ως απομονωμένη τεχνολογική καινοτομία, αλλά ως αναπόσπαστο μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής έξυπνης πόλης, συνδεδεμένης με τη βιωσιμότητα, τη διαφάνεια και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Ένα βασικό κοινό χαρακτηριστικό αποτελεί η συστηματική χρήση τρισδιάστατων αστικών μοντέλων ως εργαλείων ανάλυσης και προσομοίωσης. Τα μοντέλα αυτά συνδυάζουν γεωμετρική ακρίβεια με σημασιολογική πληροφορία, επιτρέποντας την αξιολόγηση παραμέτρων όπως η πυκνότητα δόμησης, η σκίαση, η ηλιακή ακτινοβολία και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις νέων παρεμβάσεων. Παράλληλα, και στις τρεις περιπτώσεις υιοθετούνται ανοικτά πρότυπα και πολιτικές ανοικτών δεδομένων, γεγονός που ενισχύει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων και διευκολύνει τη συνεργασία μεταξύ δημοσίων φορέων, ερευνητικών ιδρυμάτων και ιδιωτικού τομέα.

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η ενσωμάτωση των ψηφιακών διδύμων στις υφιστάμενες διαδικασίες πολεοδομικού σχεδιασμού. Στο Ελσίνκι και στο Άμστερνταμ, τα ψηφιακά μοντέλα χρησιμοποιούνται άμεσα για τον έλεγχο και την αξιολόγηση σχεδιαστικών προτάσεων, ενώ στη Βαρκελώνη λειτουργούν ως υποστηρικτικά εργαλεία στρατηγικού σχεδιασμού και ανάλυσης σεναρίων μεγάλης κλίμακας. Κοινή πρακτική αποτελεί, τέλος, η χρήση των ψηφιακών εργαλείων για την ενίσχυση της συμμετοχής των πολιτών, μέσω οπτικοποιήσεων και διαδραστικών εφαρμογών που καθιστούν τον σχεδιασμό πιο κατανοητό και διαφανή.

Κριτήριο	Βαρκελώνη	Ελσίνκι	Άμστερνταμ
Επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας	Υψηλό, με έμφαση σε θεσμικές εφαρμογές	Υψηλό, με ισχυρή τεχνική υποδομή	Υψηλό, με έντονη συμμετοχική διάσταση
Μορφή City Digital Twin	Θεσμική πλατφόρμα υποστήριξης αποφάσεων	Ανοιχτό 3D αστικό μοντέλο (3D Mesh)	Δεδομενο-κεντρικές πλατφόρμες και dashboards
Προσβασιμότητα πλατφόρμας	Περιορισμένη (κυρίως σε δημοτικές/ερευνητικές χρήσεις)	Υψηλή (δημόσια προσβάσιμη μέσω web)	Υψηλή (ανοιχτά δεδομένα και εργαλεία)
Χρήση 3D γεωμετρίας	Υποστηρικτική, κυρίως για ανάλυση σεναρίων	Κεντρική, πλήρης τρισδιάστατη απεικόνιση πόλης	Δευτερεύουσα, έμφαση στη δεδομενική ανάλυση
Κύριοι τομείς εφαρμογής	Κινητικότητα, διαχείριση πόρων, πολεοδομικός σχεδιασμός	Μορφολογία πόλης, ενέργεια, περιβάλλον	Βιωσιμότητα, κινητικότητα, αστική διακυβέρνηση
Ρόλος GIS & IoT	Συνδυασμός για προσομοιώσεις και αξιολόγηση πολιτικών	GIS ως βάση, περιορισμένο IoT στο δημόσιο interface	Εκτεταμένη χρήση δεδομένων πραγματικού χρόνου
Συμμετοχή πολιτών	Έμμεση	Κυρίως μέσω δημόσιας οπτικοποίησης	Άμεση, μέσω ανοικτών πλατφορμών και δεδομένων
Δυνατότητα προσομοίωσης σεναρίων	Υψηλή, σε θεσμικό επίπεδο	Μέτρια, κυρίως εννοιολογική	Υψηλή, μέσω δεδομενικών μοντέλων
Κύρια πλεονεκτήματα	Στρατηγικός σχεδιασμός και θεσμική ενσωμάτωση	Διαφάνεια και δημόσια κατανόηση του αστικού χώρου	Συμμετοχικότητα και ανοικτή καινοτομία
Κύριοι περιορισμοί	Περιορισμένη δημόσια πρόσβαση	Περιορισμένες θεματικές αναλύσεις σε 3D	Πολυπλοκότητα συντονισμού δεδομένων
Συνάφεια με ελληνικές πόλεις	Υψηλή σε επίπεδο διοίκησης	Υψηλή για 3D μοντελοποίηση & GIS	Υψηλή για συμμετοχικές πρακτικές

Πίνακας 1 Συγκριτικός πίνακας εφαρμογής City Digital Twin

4.5.2 Συμπεράσματα από τη διεθνή εμπειρία

Συμπεράσματα από τη διεθνή εμπειρία

Η διεθνής εμπειρία από τη Βαρκελώνη, το Ελσίνκι και το Άμστερνταμ δείχνει ότι τα ψηφιακά δίδυμα μπορούν να λειτουργήσουν ως καταλύτες μετασχηματισμού του πολεοδομικού σχεδιασμού, υπό την προϋπόθεση ότι εντάσσονται σε σαφές θεσμικό και στρατηγικό πλαίσιο. Η τεχνολογία από μόνη της δεν αρκεί· απαιτείται συνδυασμός αξιόπιστων δεδομένων, οργανωτικών δομών και πολιτικής βούλησης ώστε τα ψηφιακά εργαλεία να αξιοποιηθούν ουσιαστικά.

Ένα σημαντικό συμπέρασμα αφορά τη σημασία της κλιμακωτής προσέγγισης. Οι τρεις πόλεις δείχνουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα πρέπει να μπορούν να λειτουργούν τόσο σε επίπεδο κτιρίου και γειτονιάς όσο και σε ευρύτερη αστική ή μητροπολιτική κλίμακα. Παράλληλα, η υιοθέτηση ανοικτών προτύπων και η διαχείριση δεδομένων με έμφαση στη διαλειτουργικότητα αναδεικνύονται ως κρίσιμοι παράγοντες βιωσιμότητας των συστημάτων στο χρόνο.

Τέλος, η διεθνής εμπειρία υπογραμμίζει τον μεταβαλλόμενο ρόλο του πολεοδόμου, ο οποίος καλείται πλέον να συνδυάζει χωρική γνώση με ψηφιακές δεξιότητες και ανάλυση δεδομένων. Τα ψηφιακά δίδυμα δεν αντικαθιστούν τον σχεδιασμό, αλλά τον εμπλουτίζουν, προσφέροντας νέα εργαλεία κατανόησης της πολυπλοκότητας της πόλης. Η αξιοποίηση των καλών πρακτικών από τις παραπάνω πόλεις μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο οδηγό για την ανάπτυξη αντίστοιχων εφαρμογών σε άλλα αστικά περιβάλλοντα, προσαρμοσμένων στις τοπικές ανάγκες και ιδιαιτερότητες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΟΛΗ ΤΗΣ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ

5.1 Εισαγωγή και βασικά χαρακτηριστικά της πόλης

Η Καλαμάτα αποτελεί μία μεσαίου μεγέθους ελληνική πόλη με ιδιαίτερη πολεοδομική, γεωγραφική και αναπτυξιακή φυσιογνωμία, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη περίπτωση μελέτης για την εφαρμογή εργαλείων ψηφιακού διδύμου σε τοπικό επίπεδο. Η πόλη βρίσκεται στη νότια Πελοπόννησο και αναπτύσσεται σε

άμεση σχέση με το παράκτιο μέτωπο του Μεσσηνιακού κόλπου, ενώ ταυτόχρονα περιβάλλεται από ορεινούς όγκους, δημιουργώντας ένα σύνθετο φυσικό και αστικό περιβάλλον.

Η πολεοδομική εξέλιξη της Καλαμάτας χαρακτηρίζεται από έντονες φάσεις αστικής ανάπτυξης και ανασυγκρότησης, ιδιαίτερα μετά τον σεισμό του 1986, γεγονός που επηρέασε τη δομή του αστικού ιστού, τις χρήσεις γης και τη μορφή των γειτονιών. Σήμερα, η πόλη παρουσιάζει ένα μωσαϊκό περιοχών με διαφορετικά χαρακτηριστικά, που περιλαμβάνουν το ιστορικό κέντρο, εκτεταμένες περιοχές κατοικίας, ζώνες τουριστικών δραστηριοτήτων και υποδομές μεταφορών. Η ύπαρξη ενός ενεργού παραλιακού μετώπου, σε συνδυασμό με τη συγκέντρωση εμπορικών και πολιτιστικών λειτουργιών, ενισχύει τη σημασία της Καλαμάτας ως τοπικού και περιφερειακού πόλου ανάπτυξης.

Σε κοινωνικοοικονομικό επίπεδο, η Καλαμάτα εμφανίζει δυναμική ανάπτυξη στους τομείς του τουρισμού, του πολιτισμού και των υπηρεσιών, ενώ ταυτόχρονα αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με την εποχικότητα, την αυξημένη πίεση στις υποδομές και τη διαχείριση του δημόσιου χώρου. Παράλληλα, η πόλη καλείται να αντιμετωπίσει σύγχρονες περιβαλλοντικές προκλήσεις, όπως η προσαρμογή στην κλιματική αλλαγή, η διαχείριση του μικροκλίματος σε πυκνοδομημένες περιοχές και η προστασία του παράκτιου οικοσυστήματος.

Η Καλαμάτα αποτελεί πρόσφορη περίπτωση για τη διαμόρφωση προτάσεων εφαρμογής ψηφιακού διδύμου, καθώς συνδυάζει ένα διαχειρίσιμο μέγεθος, κατάλληλο για πιλοτικές παρεμβάσεις, με πολεοδομική πολυπλοκότητα που καθιστά αναγκαία τη χρήση σύγχρονων εργαλείων ανάλυσης και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων. Η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών και δεδομένων μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση του πολεοδομικού σχεδιασμού, στη διαχείριση των υποδομών και στην ενίσχυση της συμμετοχής των πολιτών, θέτοντας τις βάσεις για μια πιο βιώσιμη και ανθεκτική αστική ανάπτυξη.

5.2 Ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης (τεχνολογική υποδομή, στρατηγικές, έργα)

Η υφιστάμενη κατάσταση της Καλαμάτας χαρακτηρίζεται από μια σταδιακή, αλλά σαφή μετάβαση προς την αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών στον αστικό σχεδιασμό και τη δημοτική διακυβέρνηση. Παρότι η πόλη δεν διαθέτει ακόμη ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό δίδυμο, έχουν αναπτυχθεί βασικές υποδομές και στρατηγικές που μπορούν να λειτουργήσουν ως θεμέλιο για μελλοντικές εφαρμογές ψηφιακών εργαλείων σε κλίμακα πόλης και γειτονιάς.

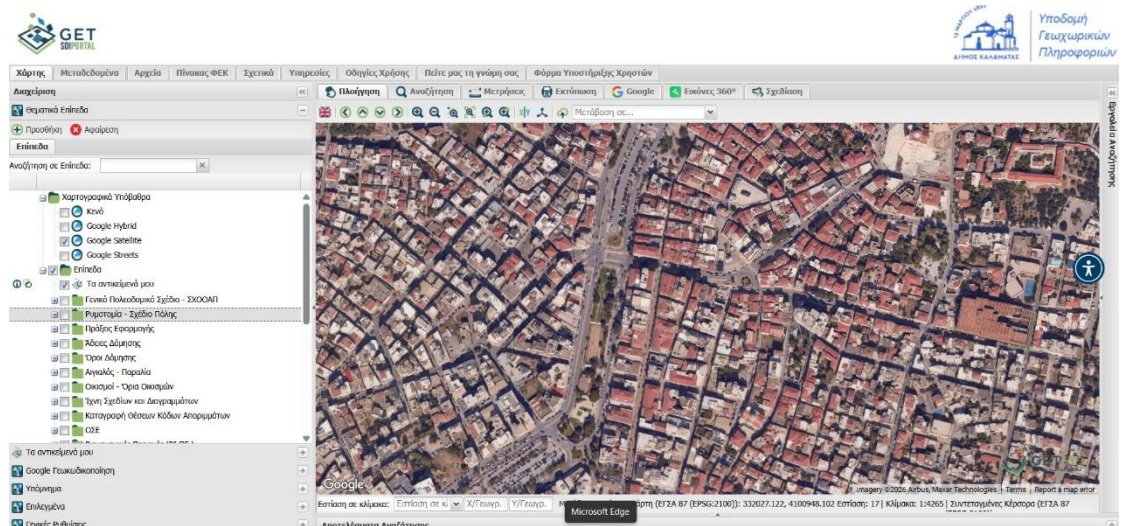
Σε επίπεδο τεχνολογικής υποδομής, ο Δήμος Καλαμάτας διαθέτει ψηφιακά συστήματα γεωχωρικής πληροφόρησης και πρόσβαση σε θεσμικά χωρικά δεδομένα, όπως πολεοδομικά σχέδια, όρια διοικητικών ενοτήτων και βασικά θεματικά επίπεδα χρήσεων γης. Παράλληλα, αξιοποιούνται εθνικές και ευρωπαϊκές πλατφόρμες ανοικτών δεδομένων, ενώ σε επιλεγμένους τομείς έχουν αναπτυχθεί ψηφιακές υποδομές που σχετίζονται με τη διαχείριση υπηρεσιών και την εξυπηρέτηση πολιτών. Ωστόσο, τα δεδομένα αυτά παραμένουν σε μεγάλο βαθμό αποσπασματικά και δεν ενοποιούνται σε ένα ενιαίο, τρισδιάστατο ή σημασιολογικά οργανωμένο μοντέλο της πόλης.

Σε στρατηγικό επίπεδο, η Καλαμάτα έχει υιοθετήσει σαφή προσανατολισμό προς τη βιώσιμη και ανθεκτική αστική ανάπτυξη, όπως αποτυπώνεται σε επίσημα κείμενα πολιτικής και στρατηγικού σχεδιασμού. Κεντρικό ρόλο κατέχει το Κλιματικό Συμβόλαιο (Climate City Contract), μέσω του οποίου η πόλη δεσμεύεται στην επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2030. Η στρατηγική αυτή περιλαμβάνει δράσεις που αφορούν την ενέργεια, την κινητικότητα, το δομημένο περιβάλλον και τη διαχείριση των φυσικών πόρων, αναγνωρίζοντας τον ρόλο των ψηφιακών τεχνολογιών ως εργαλείων παρακολούθησης, ανάλυσης και υποστήριξης της λήψης αποφάσεων.

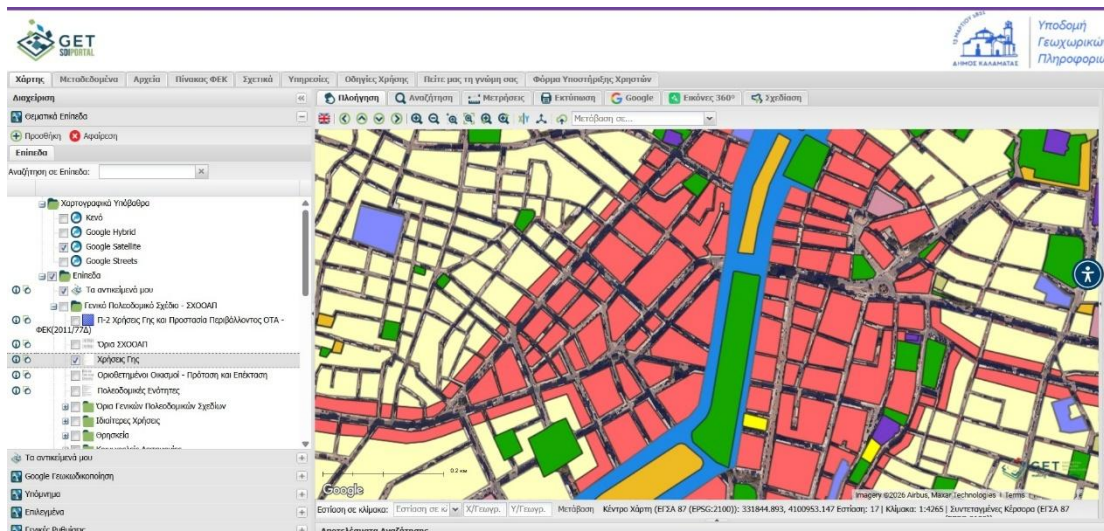
Παράλληλα, η πόλη συμμετέχει σε ευρωπαϊκά και εθνικά προγράμματα που προωθούν την καινοτομία, τον ψηφιακό μετασχηματισμό και τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Τα έργα αυτά περιλαμβάνουν παρεμβάσεις στον δημόσιο χώρο, δράσεις βιώσιμης κινητικότητας, καθώς και εφαρμογές που σχετίζονται με την ενεργειακή αναβάθμιση και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Ωστόσο, οι παρεμβάσεις

υλοποιούνται κυρίως ως μεμονωμένα έργα, χωρίς να υποστηρίζονται από ένα ενιαίο ψηφιακό πλαίσιο που να επιτρέπει τη συστηματική παρακολούθηση, αξιολόγηση και σύγκρισή τους σε βάθος χρόνου.

Στο πλαίσιο αυτό, ο Δήμος Καλαμάτας έχει αναπτύξει ψηφιακά εργαλεία γεωχωρικής απεικόνισης και στρατηγικού σχεδιασμού, τα οποία συνιστούν σημαντική βάση για την περαιτέρω εξέλιξη προς ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό δίδυμο πόλης. Το GIS του Δήμου Καλαμάτας (gis.kalamata.gr) λειτουργεί ως βασικό γεωχωρικό εργαλείο υποστήριξης της διοίκησης και της πληροφόρησης των πολιτών, παρέχοντας πρόσβαση σε θεματικά επίπεδα που αφορούν πολεοδομικά όρια, χρήσεις γης και διοικητικές ενότητες. Η πλατφόρμα διευκολύνει την κατανόηση της χωρικής οργάνωσης της πόλης, ωστόσο περιορίζεται κυρίως στην παρουσίαση στατικών, δισδιάστατων δεδομένων και δεν υποστηρίζει τρισδιάστατη μοντελοποίηση ή δυναμική ανάλυση.

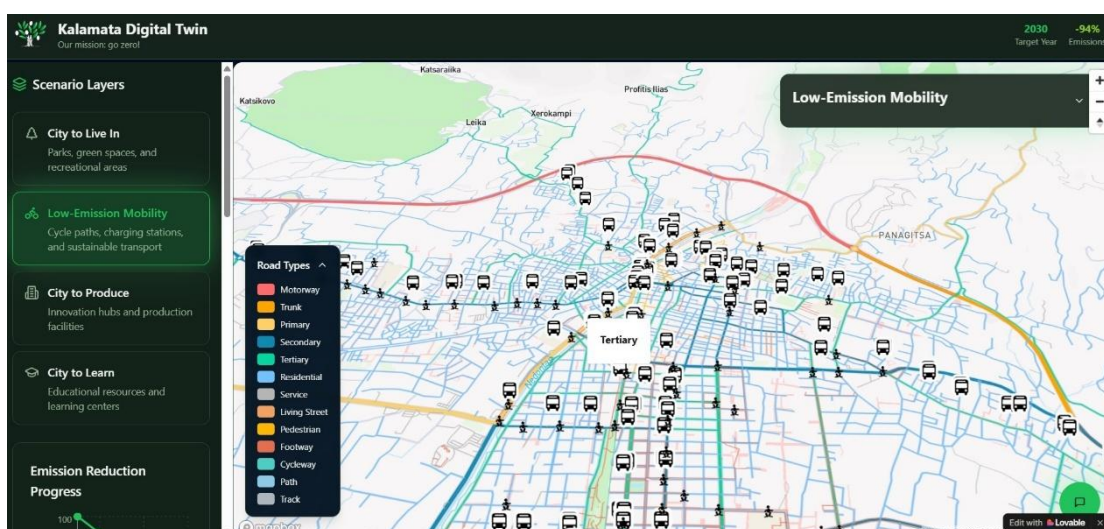


Εικόνα 12 Gis Δήμου Καλαμάτας

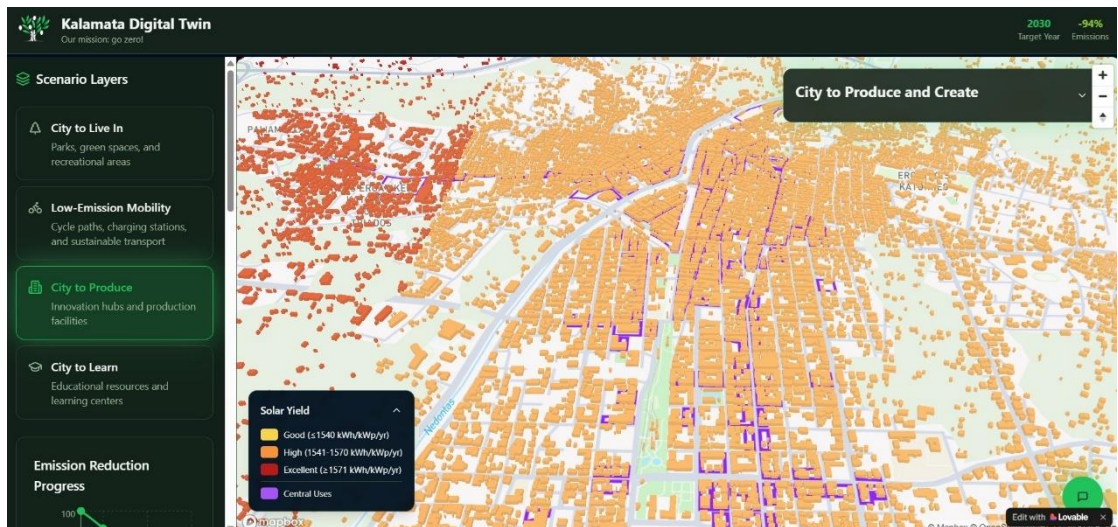


Εικόνα 13 Απεικόνιση χρήσεων γης

Συμπληρωματικά, η πλατφόρμα Kalamata Vision Map αποτελεί εργαλείο στρατηγικής απεικόνισης του αναπτυξιακού οράματος της πόλης. Μέσω ενός διαδραστικού χάρτη, παρουσιάζονται προτεινόμενες παρεμβάσεις, έργα και χωρικές κατευθύνσεις που αφορούν τη μελλοντική εξέλιξη της Καλαμάτας. Η πλατφόρμα λειτουργεί κυρίως ως μέσο επικοινωνίας και οπτικοποίησης πολιτικών, ενισχύοντας τη διαφάνεια και τη δημόσια κατανόηση των σχεδιαστικών επιλογών. Ωστόσο, δεν συγκεντρώνει τα βασικά χαρακτηριστικά ενός ψηφιακού διδύμου πόλης, καθώς δεν υποστηρίζει δυναμική ροή δεδομένων, προσομοιώσεις ή σημασιολογική μοντελοποίηση του αστικού χώρου.

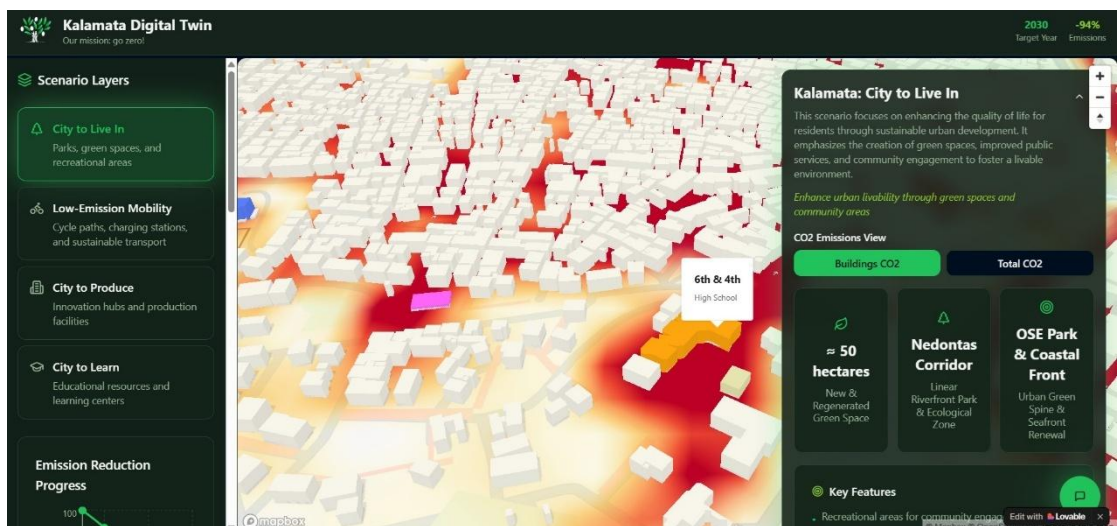


Εικόνα 14 Kalamata vision map



Εικόνα 15 Ηλιακή απόδοση

Η συνύπαρξη των παραπάνω εργαλείων καταδεικνύει ότι η Καλαμάτα διαθέτει βασικά στοιχεία ψηφιακής ετοιμότητας, τόσο σε επίπεδο γεωχωρικών δεδομένων όσο και σε επίπεδο στρατηγικής οπτικοποίησης. Παράλληλα, αναδεικνύει την απουσία ενός ενιαίου, τρισδιάστατου και δυναμικού ψηφιακού περιβάλλοντος που θα μπορούσε να συνδέσει δεδομένα, στρατηγικές και έργα. Το κενό αυτό δημιουργεί σαφές πεδίο για την ανάπτυξη ενός City Digital Twin, το οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει ως οριζόντιο εργαλείο ενοποίησης πολιτικών και παρεμβάσεων, ενισχύοντας τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σε επίπεδο πόλης και γειτονιάς.



Εικόνα 16 Εκπομπή CO2

5.3 Δυνατότητες ανάπτυξης City Digital Twin στην Καλαμάτα

5.3.1 Τομείς εφαρμογής (κυκλοφορία, ενέργεια, περιβάλλον, τουρισμός)

Η ανάπτυξη ενός **City Digital Twin** στην Καλαμάτα μπορεί να λειτουργήσει ως βασικό εργαλείο ολοκληρωμένου πολεοδομικού σχεδιασμού και αστικής διαχείρισης, αξιοποιώντας τις υφιστάμενες ψηφιακές υποδομές και τις στρατηγικές κατευθύνσεις της πόλης. Η μεσαία κλίμακα της Καλαμάτας επιτρέπει την πιλοτική εφαρμογή και σταδιακή εξέλιξη ενός ψηφιακού διδύμου, μειώνοντας την πολυπλοκότητα και το κόστος σε σύγκριση με μητροπολιτικά παραδείγματα, ενώ παράλληλα διατηρεί επαρκή πολεοδομική ποικιλία για ουσιαστικές αναλύσεις.

Το City Digital Twin μπορεί να λειτουργήσει ως ενοποιητικό πλαίσιο δεδομένων, στο οποίο συνδέονται γεωχωρικές πληροφορίες, στρατηγικές πολιτικές και υλοποιούμενα έργα. Η μετάβαση από υφιστάμενα εργαλεία δισδιάστατης απεικόνισης και στρατηγικής οπτικοποίησης σε ένα δυναμικό, τρισδιάστατο και αναλυτικό σύστημα προσφέρει τη δυνατότητα καλύτερης κατανόησης της λειτουργίας της πόλης, αξιολόγησης εναλλακτικών σεναρίων και τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων. Η ανάπτυξη του ψηφιακού διδύμου μπορεί να ακολουθήσει σταδιακή λογική, εστιάζοντας αρχικά σε τομείς υψηλής προτεραιότητας που σχετίζονται άμεσα με τις ανάγκες και τις προκλήσεις της Καλαμάτας.

Η ανάπτυξη ενός City Digital Twin για την πόλη της Καλαμάτας μπορεί να λειτουργήσει ως ολοκληρωμένο ψηφιακό εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού, συνδέοντας χωρικά δεδομένα, πραγματικές μετρήσεις και σεναρία προσομοίωσης με τις αναπτυξιακές και περιβαλλοντικές προτεραιότητες της πόλης. Η υφιστάμενη ψηφιακή υποδομή, όπως η πλατφόρμα **gis.kalamata.gr**, σε συνδυασμό με τις στρατηγικές που απορρέουν από το Σχέδιο Κλιματικής Ουδετερότητας 2030, δημιουργούν τις προϋποθέσεις για τη σταδιακή μετάβαση από αποσπασματικά γεωχωρικά εργαλεία σε ένα ενιαίο ψηφιακό δίδυμο πόλης.

Στον τομέα της **κυκλοφορίας και των μετακινήσεων**, ένα City Digital Twin μπορεί να υποστηρίξει την ανάλυση της κυκλοφοριακής ροής, της στάθμευσης και της χρήσης εναλλακτικών μέσων μετακίνησης. Μέσω της σύνδεσης GIS

δεδομένων, κυκλοφοριακών μετρήσεων και σεναρίων βιώσιμης κινητικότητας, δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης παρεμβάσεων, όπως πεζοδρομήσεις, ποδηλατικές διαδρομές και αναδιοργάνωση του οδικού δικτύου, πριν από την υλοποίησή τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για την Καλαμάτα, όπου η αυξημένη εποχική κινητικότητα και ο τουρισμός επιβαρύνουν το αστικό σύστημα μεταφορών.

Στον τομέα της **ενέργειας**, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αποτελέσει βασικό εργαλείο παρακολούθησης και ανάλυσης της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων και δημοτικών υποδομών. Μέσω της διασύνδεσης 3D αστικού μοντέλου με ενεργειακά δεδομένα (GIS-BIM), μπορούν να αναπτυχθούν σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης, αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών και μείωσης εκπομπών CO₂. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται άμεσα με τους στόχους της Καλαμάτας για κλιματική ουδετερότητα έως το 2030 και επιτρέπει τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων σε δημοτικό επίπεδο.

Ο **περιβαλλοντικός τομέας** αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο άξονα εφαρμογής. Ένα City Digital Twin μπορεί να ενσωματώσει δεδομένα για το μικροκλίμα, το πράσινο, τις θερμικές νησίδες, την ποιότητα αέρα και τον κίνδυνο πλημμυρών. Για μια παράκτια πόλη όπως η Καλαμάτα, η δυνατότητα προσομοίωσης περιβαλλοντικών φαινομένων και η αξιολόγηση μέτρων προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή ενισχύουν σημαντικά την ανθεκτικότητα του αστικού συστήματος.

Τέλος, στον τομέα του **τουρισμού και της αστικής εμπειρίας**, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αξιοποιηθεί ως πλατφόρμα οπτικοποίησης και συμμετοχής. Η τρισδιάστατη απεικόνιση της πόλης, σε συνδυασμό με πολιτιστικά, ιστορικά και λειτουργικά δεδομένα, μπορεί να υποστηρίξει τον σχεδιασμό τουριστικών διαδρομών, την ανάδειξη μνημείων και τη βελτίωση της εμπειρίας επισκεπτών και κατοίκων. Παράλληλα, ενισχύεται η συμμετοχικότητα μέσω σχολιασμού, προτάσεων και διαβούλευσης σε ψηφιακό περιβάλλον.

Συνολικά, ένα City Digital Twin για την Καλαμάτα δεν αποτελεί απλώς ένα τρισδιάστατο μοντέλο, αλλά ένα δυναμικό σύστημα διαχείρισης και ανάλυσης δεδομένων που μπορεί να υποστηρίξει τον πολεοδομικό σχεδιασμό, τη βιώσιμη

ανάπτυξη και τη μετάβαση της πόλης σε ένα πιο ανθεκτικό και «έξυπνο» αστικό μέλλον.

Τομέας εφαρμογής	Είδος δεδομένων	Ψηφιακά εργαλεία / τεχνολογίες	Εφαρμογές στον πολεοδομικό σχεδιασμό	Αναμενόμενα οφέλη
Κυκλοφορία & Μετακινήσεις	Κυκλοφοριακές ροές, στάθμευση, χρήσεις γης, εποχικότητα	GIS, κυκλοφοριακά μοντέλα, προσομοιώσεις	Αξιολόγηση πεζοδρομήσεων, ποδηλατικών διαδρομών, ανασχεδιασμός κόμβων	Μείωση συμφόρησης, βελτίωση προσβασιμότητας, βιώσιμη κινητικότητα
Ενέργεια	Κατανάλωση ενέργειας, χαρακτηριστικά κτιρίων, κλιματικά δεδομένα	GIS-BIM, CityGML, ενεργειακές προσομοιώσεις	Σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης σε κλίμακα κτιρίου και γειτονιάς	Μείωση εκπομπών CO ₂ , εξοικονόμηση ενέργειας
Περιβάλλον & Κλίμα	Θερμοκρασία, πράσινο, σκίαση, ποιότητα αέρα	GIS, περιβαλλοντικά μοντέλα, αισθητήρες	Σχεδιασμός παρεμβάσεων αστικού πρασίνου και μικροκλιματικής βελτίωσης	Ενίσχυση ανθεκτικότητας, βελτίωση μικροκλίματος
Τουρισμός & Αστική εμπειρία	Ροές επισκεπτών, πολιτιστικοί πόροι, δημόσιοι χώροι	3D απεικόνιση, χωρική ανάλυση, web εφαρμογές	Διαχείριση τουριστικών πιέσεων, σχεδιασμός διαδρομών	Ισορροπία τουρισμού-κατοικίας, βελτίωση εμπειρίας
Πολεοδομικός Σχεδιασμός	Χρήσεις γης, πολεοδομικοί κανονισμοί, σενάρια ανάπτυξης	GIS, CityGML, 3D μοντέλα, προσομοιώσεις	Αξιολόγηση πολεοδομικών παρεμβάσεων πριν την υλοποίηση	Τεκμηριωμένες αποφάσεις, ολοκληρωμένος σχεδιασμός

Πίνακας 2 Βασικοί τομείς εφαρμογής ενός City Digital Twin στην Καλαμάτα

5.3.2 Πηγές δεδομένων και ψηφιακά εργαλεία

Η ανάπτυξη ενός City Digital Twin για την πόλη της Καλαμάτα προϋποθέτει τη συστηματική αξιοποίηση υφιστάμενων και νέων πηγών δεδομένων, καθώς και τη χρήση ψηφιακών εργαλείων που επιτρέπουν την ενοποίηση, ανάλυση και

οπτικοποίηση πληροφοριών σε διαφορετικές χωρικές και θεματικές κλίμακες. Στην περίπτωση της Καλαμάτας, πέρα από τα θεσμικά γεωχωρικά δεδομένα και τις δημοτικές ψηφιακές υποδομές, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν και τα πιλοτικά έργα που εισάγουν πρακτικές ψηφιακών διδύμων σε επιμέρους τομείς της πόλης.

Βασική πηγή χωρικής πληροφόρησης αποτελούν τα γεωχωρικά και πολεοδομικά δεδομένα που διατίθενται μέσω των δημοτικών υπηρεσιών και των επίσημων εργαλείων χωρικού σχεδιασμού, όπως όρια συνοικιών, χρήσεις γης και πολεοδομικές ρυθμίσεις. Τα δεδομένα αυτά, αξιοποιούμενα μέσω συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, συγκροτούν τη βάση για την αναπαράσταση της αστικής δομής και τη σύνδεσή της με λειτουργίες όπως η κυκλοφορία, η ενέργεια και το περιβάλλον. Παράλληλα, δεδομένα του δομημένου περιβάλλοντος, όπως χαρακτηριστικά κτιρίων και μορφολογικές παράμετροι, μπορούν να ενσωματωθούν σε τρισδιάστατα μοντέλα πόλης, υποστηρίζοντας αναλύσεις πυκνότητας, ενεργειακής απόδοσης και σεναρίων ανάπτυξης.

Στον τομέα των ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων, η Καλαμάτα αξιοποιεί στρατηγικές που συνδέονται με τον στόχο της κλιματικής ουδετερότητας. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το πιλοτικό έργο **SchoolHeroZ**, το οποίο υλοποιείται στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής πρωτοβουλίας **NetZeroCities**. Το έργο επικεντρώνεται στη δημιουργία ψηφιακών διδύμων για επιλεγμένες σχολικές κοινότητες της πόλης, με στόχο τη μείωση των εκπομπών που προκύπτουν τόσο από την ενεργειακή κατανάλωση των σχολικών κτιρίων όσο και από τις καθημερινές μετακινήσεις μαθητών και προσωπικού.

Το πιλοτικό έργο **SchoolHeroZ**, ενταγμένο στην πρωτοβουλία **NetZeroCities**, τοποθετεί την **ενεργειακή απόδοση των σχολικών κτιρίων** και τη **συμπεριφορά κινητικότητας** στο επίκεντρο της στρατηγικής για κλιματική ουδετερότητα στην Καλαμάτα. Μέσω της δημιουργίας ψηφιακών διδύμων για έξι σχολικές κοινότητες και της ανάπτυξης ψηφιακής πλατφόρμας παρακολούθησης, το πρόγραμμα επιχειρεί να συνδέσει **τεχνολογία, συμμετοχική διακυβέρνηση και εκπαίδευση** για την προώθηση βιώσιμων αστικών πρακτικών.

Το **SchoolHeroZ** εισάγει νέες πηγές δεδομένων, όπως ενεργειακές μετρήσεις κτιρίων, δεδομένα κινητικότητας σε τοπική κλίμακα και πληροφορίες που

προκύπτουν από τη συμμετοχή των χρηστών μέσω ψηφιακών εφαρμογών. Τα δεδομένα αυτά συλλέγονται και ενοποιούνται σε ψηφιακή πλατφόρμα, επιτρέποντας την παρακολούθηση δεικτών, την αξιολόγηση σεναρίων και την υποστήριξη αλλαγών συμπεριφοράς. Αν και το έργο αφορά συγκεκριμένο υποσύνολο της πόλης, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής λογικής ψηφιακού διδύμου σε μικρή κλίμακα, με σαφείς προεκτάσεις για τη μελλοντική ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου City Digital Twin.

Πέρα από τα τεχνικά δεδομένα, το έργο συμβάλλει και στη διεύρυνση των κοινωνικών και συμμετοχικών πηγών πληροφόρησης, καθώς ενσωματώνει τη γνώση και τη συμπεριφορά των χρηστών στο ψηφιακό σύστημα. Η διάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον πολεοδομικό σχεδιασμό, καθώς ενισχύει τη σύνδεση μεταξύ τεχνολογίας και καθημερινής αστικής εμπειρίας. Η ενσωμάτωση κοινωνικών, ενεργειακών και χωρικών δεδομένων σε ένα ενιαίο ψηφιακό περιβάλλον αναδεικνύει τον ρόλο του City Digital Twin όχι μόνο ως εργαλείου ανάλυσης, αλλά και ως μέσου συμμετοχικής διακυβέρνησης.

Συνολικά, οι πηγές δεδομένων και τα ψηφιακά εργαλεία που είναι διαθέσιμα στην Καλαμάτα —από τα θεσμικά γεωχωρικά δεδομένα έως τα πιλοτικά έργα όπως το SchoolHeroZ— συγκροτούν ένα ρεαλιστικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη ενός City Digital Twin σε κλίμακα πόλης. Η αξιοποίηση και ενοποίησή τους μπορεί να ενισχύσει τον πολεοδομικό σχεδιασμό, να υποστηρίξει τους στόχους βιωσιμότητας και να αποτελέσει βάση για πιο τεκμηριωμένες και διαφανείς αποφάσεις στο μέλλον.

5.4 Προτεινόμενο πλαίσιο ανάπτυξης

5.4.1 Φάσεις υλοποίησης και εμπλεκόμενοι φορείς

Η ανάπτυξη ενός City Digital Twin για την Καλαμάτα προτείνεται να ακολουθήσει μια σταδιακή και ρεαλιστική διαδικασία υλοποίησης, η οποία λαμβάνει υπόψη το υφιστάμενο επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας της πόλης, τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τις διοικητικές δυνατότητες του Δήμου. Το προτεινόμενο πλαίσιο βασίζεται στη λογική της κλιμακωτής ανάπτυξης, με

διακριτές φάσεις που επιτρέπουν τη δοκιμή, αξιολόγηση και προσαρμογή του ψηφιακού διδύμου πριν από την πλήρη επέκτασή του σε κλίμακα πόλης.

Η **πρώτη φάση** αφορά τη συγκρότηση της βάσης δεδομένων και της οργανωτικής δομής του εγχειρήματος. Σε αυτό το στάδιο περιλαμβάνεται η χαρτογράφηση των διαθέσιμων γεωχωρικών, πολεοδομικών, ενεργειακών και περιβαλλοντικών δεδομένων, καθώς και η αξιολόγηση της ποιότητας και της συμβατότητάς τους. Παράλληλα, απαιτείται η δημιουργία ενός βασικού τρισδιάστατου μοντέλου πόλης, το οποίο θα λειτουργήσει ως κοινό σημείο αναφοράς για τις επόμενες φάσεις. **Κεντρικό ρόλο στη φάση αυτή έχει ο Δήμος Καλαμάτας, σε συνεργασία με τεχνικές υπηρεσίες, φορείς χωρικού σχεδιασμού και ακαδημαϊκά ιδρύματα που μπορούν να υποστηρίξουν τη δομημένη οργάνωση των δεδομένων.**

Η **δεύτερη φάση** επικεντρώνεται στην πιλοτική εφαρμογή του City Digital Twin σε επιλεγμένους τομείς και περιοχές. Σε αυτή τη φάση προτείνεται η αξιοποίηση θεματικών πιλοτικών εφαρμογών, όπως η κυκλοφορία, η ενέργεια ή ο πολεοδομικός σχεδιασμός σε επίπεδο γειτονιάς, με στόχο την ανάπτυξη λειτουργικών σεναρίων και τη δοκιμή εργαλείων ανάλυσης και προσομοίωσης. Παραδείγματα πιλοτικών δράσεων, όπως το έργο SchoolHeroZ, μπορούν να λειτουργήσουν ως πρότυπα μικρής κλίμακας για την ενσωμάτωση δεδομένων και τη συμμετοχή χρηστών. **Στη φάση αυτή εμπλέκονται, πέρα από τον Δήμο, ιδιωτικοί τεχνολογικοί πάροχοι, ερευνητικά κέντρα και τοπικοί φορείς.**

Η **τρίτη φάση** αφορά την επέκταση και ενοποίηση του ψηφιακού διδύμου σε κλίμακα πόλης. Το City Digital Twin μετατρέπεται σε οριζόντιο εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων, στο οποίο συνδέονται στρατηγικοί στόχοι, έργα και δεδομένα από διαφορετικούς τομείς. Σε αυτό το στάδιο, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να αξιοποιηθεί συστηματικά στον πολεοδομικό σχεδιασμό, για την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων ανάπτυξης, την παρακολούθηση δεικτών βιωσιμότητας και την υποστήριξη της διατομεακής συνεργασίας.

Η **τέταρτη φάση** περιλαμβάνει τη θεσμοθέτηση και τη μακροχρόνια λειτουργία του City Digital Twin. Σε αυτό το στάδιο, το ψηφιακό δίδυμο ενσωματώνεται στις καθημερινές διαδικασίες της δημοτικής διακυβέρνησης και

συνδέεται με μηχανισμούς παρακολούθησης στρατηγικών, όπως το Κλιματικό Συμβόλαιο της πόλης. Παράλληλα, ενισχύεται η συμμετοχικότητα μέσω της παροχής πρόσβασης σε επιλεγμένα δεδομένα και οπτικοποιήσεις για πολίτες και ενδιαφερόμενους φορείς. Η βιωσιμότητα του εγχειρήματος προϋποθέτει τη διαρκή συνεργασία μεταξύ δημόσιου τομέα, ακαδημαϊκής κοινότητας, ιδιωτικών παρόχων και κοινωνίας των πολιτών.

Συνολικά, το προτεινόμενο πλαίσιο ανάπτυξης του City Digital Twin για την Καλαμάτα βασίζεται σε μια συνεργατική και σταδιακή προσέγγιση, όπου οι εμπλεκόμενοι φορείς συμμετέχουν σε διαφορετικά στάδια ανάλογα με τον ρόλο και την τεχνογνωσία τους. Η προσέγγιση αυτή μειώνει τον κίνδυνο αποσπασματικών εφαρμογών και ενισχύει τη δυνατότητα του ψηφιακού διδύμου να λειτουργήσει ως μόνιμο και αξιόπιστο εργαλείο πολεοδομικού σχεδιασμού και βιώσιμης αστικής ανάπτυξης.

5.4.2 Συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού φορέα

Η ανάπτυξη και η βιώσιμη λειτουργία ενός City Digital Twin στην Καλαμάτα προϋποθέτει στενή και διαρκή συνεργασία μεταξύ δημόσιων και ιδιωτικών φορέων. Η πολυπλοκότητα ενός ψηφιακού διδύμου πόλης, τόσο σε τεχνολογικό όσο και σε οργανωτικό επίπεδο, καθιστά αναγκαία τη σύμπραξη διαφορετικών τύπων γνώσης, πόρων και αρμοδιοτήτων, οι οποίοι δεν μπορούν να καλυφθούν αποκλειστικά από τη δημόσια διοίκηση.

Ο δημόσιος τομέας, με κύριο εκπρόσωπο τον Δήμο Καλαμάτας, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στον καθορισμό των στρατηγικών στόχων, της θεσμικής κατεύθυνσης και του πλαισίου διακυβέρνησης του City Digital Twin. Ο Δήμος είναι υπεύθυνος για τη διάθεση θεσμικών δεδομένων, όπως πολεοδομικά σχέδια, χρήσεις γης και στρατηγικά κείμενα πολιτικής, καθώς και για τη διασφάλιση της διαφάνειας, της προστασίας προσωπικών δεδομένων και της ευθυγράμμισης του ψηφιακού διδύμου με τις ανάγκες των πολιτών. Παράλληλα, ο δημόσιος τομέας λειτουργεί ως εγγυητής της συνέχειας και της μακροχρόνιας βιωσιμότητας του εγχειρήματος.

Ο ιδιωτικός τομέας συμβάλλει κυρίως με την παροχή τεχνογνωσίας, τεχνολογικών λύσεων και καινοτόμων εργαλείων που απαιτούνται για την ανάπτυξη και τη λειτουργία του ψηφιακού διδύμου. Εταιρείες τεχνολογίας, πάροχοι λογισμικού, σύμβουλοι δεδομένων και startups μπορούν να υποστηρίξουν τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων, την ανάπτυξη εφαρμογών ανάλυσης και οπτικοποίησης, καθώς και την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών, όπως προσομοιώσεις και ανάλυση σεναρίων. Η συμβολή αυτή είναι κρίσιμη, ιδίως σε φάσεις πιλοτικής εφαρμογής και τεχνολογικής εξέλιξης του City Digital Twin.

Η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα μπορεί να υλοποιηθεί μέσα από ευέλικτα σχήματα σύμπραξης, όπως συμβάσεις παροχής υπηρεσιών, συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα (**ΣΔΙΤ**), ερευνητικές συνεργασίες ή πιλοτικά έργα στο πλαίσιο ευρωπαϊκών προγραμμάτων. Η εμπειρία από έργα όπως το SchoolHeroZ αναδεικνύει τη σημασία τέτοιων συνεργασιών, όπου ο δημόσιος φορέας καθορίζει το πλαίσιο και τους στόχους, ενώ ο ιδιωτικός και ο ερευνητικός τομέας συμβάλλουν στην τεχνολογική υλοποίηση και την καινοτομία.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σαφής κατανομή ρόλων και ευθυνών μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων, ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα εξάρτησης από συγκεκριμένους παρόχους και να διασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα και η επεκτασιμότητα του συστήματος. Η υιοθέτηση ανοικτών προτύπων και η αξιοποίηση ανοικτών δεδομένων μπορούν να λειτουργήσουν ως μηχανισμοί εξισορρόπησης μεταξύ δημόσιου συμφέροντος και ιδιωτικής καινοτομίας.

Συνολικά, η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού φορέα αποτελεί βασικό πυλώνα για την επιτυχή ανάπτυξη ενός City Digital Twin στην Καλαμάτα. Μέσω μιας ισορροπημένης και καλά δομημένης σύμπραξης, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εξελιχθεί σε ένα αξιόπιστο, βιώσιμο και λειτουργικό εργαλείο πολεοδομικού σχεδιασμού, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων και τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη σε βάθος χρόνου.

5.4.3 Κοινωνική συμμετοχή και διαφάνεια

Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι τα ψηφιακά δίδυμα πόλης δεν μπορούν να αντιμετωπίζονται αποκλειστικά ως τεχνολογικά συστήματα, αλλά ως κοινωνικο-τεχνικές υποδομές που ενσωματώνουν πολίτες, φορείς και διαδικασίες διακυβέρνησης. Σύμφωνα με τη συνολική ανασκόπηση των Georgios Mylonas και συνεργατών, η μετάβαση από τα ψηφιακά δίδυμα της βιομηχανίας στα ψηφιακά δίδυμα πόλης καθιστά κρίσιμη τη διάσταση της κοινωνικής συμμετοχής, της διαφάνειας και της πρόσβασης σε δεδομένα, καθώς οι πόλεις λειτουργούν ως «συστήματα συστημάτων» με πολλαπλούς χρήστες και αντικρουόμενες ανάγκες. Οι συγγραφείς επισημαίνουν ότι η επιτυχία των City Digital Twins εξαρτάται από τη δυνατότητα κατανόησης και αξιοποίησης των ψηφιακών αναπαραστάσεων από μη ειδικούς χρήστες, καθώς και από την ενσωμάτωση μηχανισμών ανοικτής πληροφόρησης και συμμετοχικής λήψης αποφάσεων. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη διαφάνεια και τη λογοδοσία και μετατρέπει το ψηφιακό δίδυμο από εργαλείο ανάλυσης σε πλατφόρμα αστικής διακυβέρνησης.

Μέσω της αξιοποίησης ψηφιακών πλατφορμών και διαδραστικών χαρτών, το City Digital Twin μπορεί να προσφέρει στους πολίτες πρόσβαση σε επιλεγμένα γεωχωρικά και θεματικά δεδομένα που αφορούν τον πολεοδομικό σχεδιασμό, τις αστικές παρεμβάσεις και τους στρατηγικούς στόχους της πόλης. Η οπτικοποίηση σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο περιβάλλον καθιστά τις πληροφορίες πιο κατανοητές, μειώνοντας το χάσμα μεταξύ τεχνικής γνώσης και κοινωνίας. Με τον τρόπο αυτό, ενισχύεται η εμπιστοσύνη προς τη δημοτική διοίκηση και βελτιώνεται η ποιότητα του δημόσιου διαλόγου.

Παράλληλα, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να λειτουργήσει ως πλατφόρμα συμμετοχικού σχεδιασμού, επιτρέποντας τη συλλογή απόψεων, σχολίων και προτάσεων από τους κατοίκους σε διαφορετικά στάδια σχεδιασμού και υλοποίησης έργων. Η δυνατότητα διερεύνησης εναλλακτικών σεναρίων και η παρουσίασή τους με σαφή και συγκρίσιμο τρόπο διευκολύνει τη διαμόρφωση λύσεων και περιορίζει τις συγκρούσεις που συχνά προκύπτουν σε μεταγενέστερα στάδια υλοποίησης. Ιδιαίτερα σε ζητήματα που αφορούν τη χρήση δημόσιου χώρου, την κινητικότητα

και την περιβαλλοντική ποιότητα, η συμμετοχή των πολιτών μπορεί να προσδώσει προστιθέμενη αξία στον πολεοδομικό σχεδιασμό.

Η διάσταση της διαφάνειας ενισχύεται περαιτέρω μέσω της δημοσιοποίησης δεδομένων, δεικτών και αποτελεσμάτων αξιολόγησης σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο. Στο πλαίσιο ενός City Digital Twin, η παρακολούθηση της προόδου έργων και στρατηγικών, όπως οι δράσεις για την κλιματική ουδετερότητα, μπορεί να παρουσιαστεί με σαφή και τεκμηριωμένο τρόπο, επιτρέποντας την κοινωνική λογοδοσία και τον έλεγχο των πολιτικών αποφάσεων. Η χρήση ανοικτών δεδομένων και ανοικτών προτύπων συμβάλλει στη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της επαναχρησιμοποίησης της πληροφορίας από διαφορετικούς φορείς.

Συνολικά, η ενσωμάτωση της κοινωνικής συμμετοχής και της διαφάνειας στο City Digital Twin μετατρέπει το ψηφιακό εργαλείο σε μηχανισμό συνεργατικής διακυβέρνησης. Στην περίπτωση της Καλαμάτας, όπου ήδη αναπτύσσονται πρωτοβουλίες διαβούλευσης και ψηφιακής επικοινωνίας με τους πολίτες, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να λειτουργήσει ως ενοποιητικό πλαίσιο που συνδέει δεδομένα, στρατηγικές και κοινωνικές διαδικασίες, ενισχύοντας τη νομιμοποίηση και την αποτελεσματικότητα του πολεοδομικού σχεδιασμού.

Η κοινωνική συμμετοχή στην Καλαμάτα τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει σταδιακή ενίσχυση, στο πλαίσιο μιας ευρύτερης προσπάθειας του Δήμου για ενίσχυση της διαφάνειας, της επικοινωνίας με τους πολίτες και της συμμετοχικής διακυβέρνησης. Αν και η πόλη δεν διαθέτει ακόμη ολοκληρωμένα ψηφιακά εργαλεία συμμετοχικού σχεδιασμού σε πραγματικό χρόνο, έχουν αναπτυχθεί πρωτοβουλίες και μηχανισμοί διαβούλευσης που συγκροτούν ένα βασικό επίπεδο κοινωνικής ετοιμότητας για την αξιοποίηση πιο σύνθετων ψηφιακών συστημάτων, όπως ένα City Digital Twin.

Σε θεσμικό επίπεδο, η κοινωνική συμμετοχή εκφράζεται κυρίως μέσω διαδικασιών δημόσιας διαβούλευσης για στρατηγικά σχέδια, αναπτυξιακές παρεμβάσεις και κανονιστικές ρυθμίσεις. Οι διαδικασίες αυτές πραγματοποιούνται τόσο με φυσική παρουσία όσο και μέσω ψηφιακών καναλιών ενημέρωσης, επιτρέποντας στους πολίτες να ενημερώνονται και να διατυπώνουν απόψεις. Ωστόσο, η συμμετοχή παραμένει σε μεγάλο βαθμό συμβουλευτική και δεν

υποστηρίζεται συστηματικά από ψηφιακά εργαλεία χωρικής ανάλυσης ή οπτικοποίησης, γεγονός που περιορίζει τη δυνατότητα ουσιαστικής συνδιαμόρφωσης.

Σε επίπεδο ψηφιακής υποδομής, ο Δήμος Καλαμάτας αξιοποιεί διαδικτυακές πλατφόρμες ενημέρωσης, γεωχωρικά εργαλεία απεικόνισης και εφαρμογές επικοινωνίας με τους πολίτες, τα οποία ενισχύουν τη διαφάνεια και τη διάχυση της πληροφορίας. Εργαλεία όπως το GIS Kalamata και ο ψηφιακός χάρτης στρατηγικού οράματος συμβάλλουν στην κατανόηση των χωρικών παρεμβάσεων, χωρίς όμως να επιτρέπουν ενεργή αλληλεπίδραση ή συμμετοχική αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων. Η κοινωνική συμμετοχή περιορίζεται έτσι κυρίως στο επίπεδο της ενημέρωσης και της έμμεσης διαβούλευσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν πιλοτικές δράσεις που στοχεύουν στην ενεργοποίηση συγκεκριμένων κοινωνικών ομάδων, όπως μαθητές, εκπαιδευτικοί και τοπικές κοινότητες. Η συμμετοχή της Καλαμάτας σε ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες για τη βιώσιμη ανάπτυξη έχει ενισχύσει πειραματικές μορφές συμμετοχής, όπου οι πολίτες δεν λειτουργούν μόνο ως αποδέκτες πληροφορίας αλλά και ως φορείς αλλαγής συμπεριφοράς. Αν και οι δράσεις αυτές εφαρμόζονται σε περιορισμένη κλίμακα, αναδεικνύουν τη δυναμική για πιο ενεργό ρόλο της κοινωνίας σε ζητήματα ενέργειας, κινητικότητας και ποιότητας ζωής.

Παρά τις παραπάνω πρωτοβουλίες, η κοινωνική συμμετοχή στην Καλαμάτα δεν έχει ακόμη ενσωματωθεί σε ένα ενιαίο, ψηφιακά υποστηριζόμενο πλαίσιο που να συνδέει χωρικά δεδομένα, στρατηγικούς στόχους και απόψεις των πολιτών. **Η απουσία εργαλείων που να επιτρέπουν τη διαδραστική απεικόνιση προτάσεων και τη σύγκριση σεναρίων περιορίζει τη δυνατότητα ουσιαστικής συμμετοχής στον πολεοδομικό σχεδιασμό.** Το κενό αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για την ανάπτυξη ψηφιακών συστημάτων, όπως ένα City Digital Twin, τα οποία θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως κοινό περιβάλλον διαλόγου, ανάλυσης και λήψης αποφάσεων.

Συνολικά, η υφιστάμενη κατάσταση της κοινωνικής συμμετοχής στην Καλαμάτα χαρακτηρίζεται από θετικά πρώτα βήματα και αυξανόμενη ευαισθητοποίηση, αλλά και από περιορισμούς που σχετίζονται με την

αποσπασματική χρήση ψηφιακών εργαλείων. Η μετάβαση προς πιο ολοκληρωμένες, συμμετοχικές και διαφανείς μορφές αστικού σχεδιασμού προϋποθέτει την ενοποίηση των υφιστάμενων πρακτικών σε ένα κοινό ψηφιακό πλαίσιο, το οποίο θα ενισχύσει τον ρόλο των πολιτών και θα βελτιώσει την ποιότητα του πολεοδομικού σχεδιασμού.

5.5 SWOT Ανάλυση για την ανάπτυξη City Digital Twin στην

Καλαμάτα

Strengths (Δυνατά Σημεία)

- Υφιστάμενη ψηφιακή υποδομή γεωχωρικών δεδομένων (δημοτικό GIS, θεσμικά χωρικά δεδομένα).
- Σαφής στρατηγικός προσανατολισμός προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και την κλιματική ουδετερότητα (Climate City Contract).
- Συμμετοχή σε ευρωπαϊκά προγράμματα και πιλοτικές δράσεις καινοτομίας (π.χ. SchoolHeroZ).
- Σχετικά συμπαγής αστική μορφή, που ευνοεί την πιλοτική εφαρμογή και την κλιμάκωση ενός ψηφιακού διδύμου.
- Υφιστάμενα εργαλεία στρατηγικής οπτικοποίησης (Kalamata Vision Map), τα οποία μπορούν να ενταχθούν σε ένα ευρύτερο ψηφιακό πλαίσιο.
- Αυξανόμενη εμπειρία της δημοτικής διοίκησης σε ζητήματα ψηφιακού μετασχηματισμού και ανοικτών δεδομένων.

Weaknesses (Αδυναμίες)

- Απουσία ενιαίου, ενοποιημένου τρισδιάστατου και σημασιολογικού μοντέλου της πόλης.
- Αποσπασματική συλλογή και διαχείριση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών υπηρεσιών και έργων.
- Περιορισμένη ενσωμάτωση δυναμικών ή δεδομένων πραγματικού χρόνου (real-time data).
- Έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού σε προηγμένες τεχνολογίες City Digital Twin.

- Περιορισμένη χρήση ψηφιακών εργαλείων συμμετοχικού πολεοδομικού σχεδιασμού.
 - Ανεπαρκής διαλειτουργικότητα μεταξύ GIS, εργαλείων στρατηγικής οπτικοποίησης και συστημάτων ανάλυσης.
-

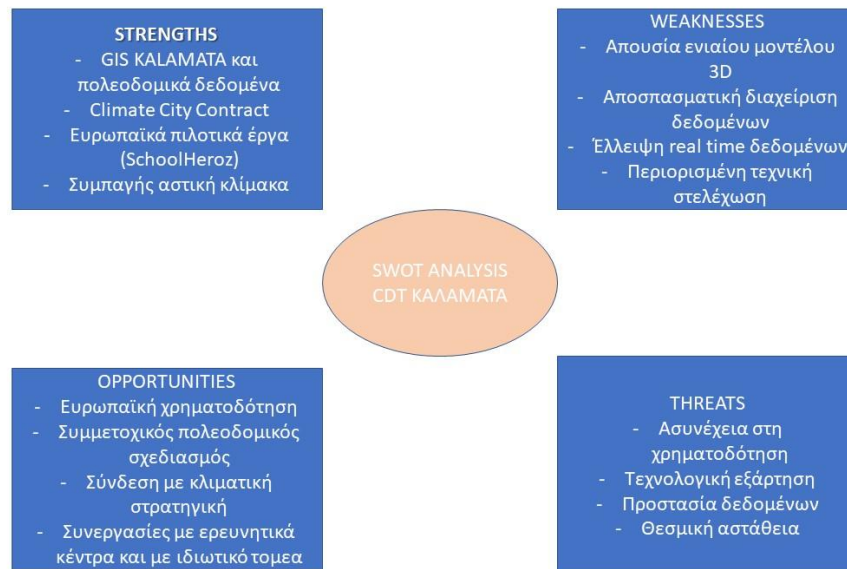
Opportunities (Ευκαιρίες)

- Αξιοποίηση ευρωπαϊκών χρηματοδοτικών εργαλείων (NetZeroCities, Horizon Europe, Smart Cities).
 - Επέκταση πιλοτικών έργων μικρής κλίμακας (π.χ. σχολικές γειτονιές) σε επίπεδο πόλης.
 - Ενσωμάτωση κοινωνικής συμμετοχής και διαφάνειας μέσω ψηφιακών πλατφορμών.
 - Σύνδεση του City Digital Twin με τον πολεοδομικό σχεδιασμό, τον τουρισμό και τη βιώσιμη κινητικότητα.
 - Χρήση του ψηφιακού διδύμου ως εργαλείου παρακολούθησης στρατηγικών στόχων και δεικτών.
 - Δημιουργία συνεργασιών με πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και ιδιωτικούς φορείς.
-

Threats (Απειλές)

- Περιορισμοί χρηματοδότησης για μακροχρόνια λειτουργία και συντήρηση του συστήματος.
- Κίνδυνος τεχνολογικής εξάρτησης από συγκεκριμένους παρόχους (vendor lock-in).
- Δυσκολίες διαχείρισης προσωπικών δεδομένων και ζητήματα προστασίας ιδιωτικότητας.
- Χαμηλό επίπεδο ψηφιακής ετοιμότητας μέρους του πληθυσμού.
- Ενδεχόμενη έλλειψη πολιτικής συνέχειας και θεσμικής στήριξης σε βάθος χρόνου.
- Κίνδυνος το ψηφιακό δίδυμο να παραμείνει εργαλείο απεικόνισης και όχι ουσιαστικής υποστήριξης αποφάσεων.

Η SWOT ανάλυση αναδεικνύει ότι η Καλαμάτα διαθέτει ένα αξιόλογο υπόβαθρο ψηφιακής και στρατηγικής ετοιμότητας για την ανάπτυξη ενός City Digital Twin, ωστόσο η επιτυχία του εγχειρήματος εξαρτάται από την υπέρβαση θεσμικών και τεχνολογικών αδυναμιών. Η αξιοποίηση των ευκαιριών που προκύπτουν από τη σύνδεση του ψηφιακού διδύμου με τον πολεοδομικό σχεδιασμό και τη συμμετοχική διακυβέρνηση μπορεί να περιορίσει τις απειλές και να ενισχύσει τη βιωσιμότητα του συστήματος σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 17 SWOT ανάλυση για την ανάπτυξη City Digital Twin στην Καλαμάτα

5.6 Αποτίμηση της προτεινόμενης στρατηγικής

Η αποτίμηση της προτεινόμενης στρατηγικής ανάπτυξης ενός City Digital Twin για την Καλαμάτα βασίζεται στη συνδυαστική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης, των στρατηγικών στόχων της πόλης και των δυνατοτήτων που αναδεικνύονται μέσα από την ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών της. Η στρατηγική που προτείνεται δεν αντιμετωπίζει το ψηφιακό δίδυμο ως αυτοτελές τεχνολογικό έργο, αλλά ως οριζόντιο εργαλείο αστικής διακυβέρνησης, ικανό να συνδέσει δεδομένα, πολιτικές και κοινωνικούς φορείς σε ένα ενιαίο πλαίσιο λήψης αποφάσεων.

Σε επίπεδο τεχνολογικής επάρκειας, η στρατηγική θεωρείται ρεαλιστική και εφαρμόσιμη, καθώς βασίζεται σε υφιστάμενες ψηφιακές υποδομές και εργαλεία

που διαθέτει ήδη ο Δήμος Καλαμάτας, όπως συστήματα γεωχωρικής πληροφόρησης και πλατφόρμες στρατηγικής οπτικοποίησης. Η σταδιακή προσέγγιση που προτείνεται μειώνει τον κίνδυνο τεχνολογικής αστοχίας και επιτρέπει τη δοκιμή επιμέρους λειτουργιών πριν από την πλήρη κλιμάκωση του ψηφιακού διδύμου σε επίπεδο πόλης.

Από την πλευρά της διοικητικής και θεσμικής βιωσιμότητας, η στρατηγική αξιοποιεί τον υφιστάμενο προσανατολισμό της πόλης προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και την κλιματική ουδετερότητα, ενσωματώνοντας το City Digital Twin ως εργαλείο παρακολούθησης και υποστήριξης των στρατηγικών δεσμεύσεων. Η δυνατότητα σύνδεσης του ψηφιακού διδύμου με επίσημα στρατηγικά κείμενα και δείκτες επιτρέπει τη θεσμική του ενσωμάτωση και ενισχύει τη συνέχεια της πολιτικής πέρα από μεμονωμένες παρεμβάσεις ή έργα.

Ιδιαίτερα θετική κρίνεται η αποτίμηση της στρατηγικής ως προς την κοινωνική διάσταση. Η ενσωμάτωση μηχανισμών διαφάνειας και συμμετοχής μετατρέπει το City Digital Twin σε εργαλείο κοινωνικού διαλόγου και όχι αποκλειστικά τεχνικής ανάλυσης. Η εμπειρία από πιλοτικές δράσεις συμμετοχικού χαρακτήρα δείχνει ότι η πόλη διαθέτει βασικό επίπεδο κοινωνικής ετοιμότητας, το οποίο μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω μέσω της οπτικοποίησης δεδομένων και της παρουσίασης εναλλακτικών σεναρίων με κατανοητό τρόπο.

Σε ό,τι αφορά τον πολεοδομικό σχεδιασμό, η προτεινόμενη στρατηγική αναδεικνύει το ψηφιακό δίδυμο ως εργαλείο προληπτικής αξιολόγησης και όχι απλής τεκμηρίωσης υφιστάμενων καταστάσεων. Η δυνατότητα προσομοίωσης σεναρίων ανάπτυξης, η σύνδεση με χρήσεις γης και η αξιολόγηση επιπτώσεων σε περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς δείκτες ενισχύουν τη μετάβαση προς πιο τεκμηριωμένες και ολοκληρωμένες αποφάσεις. Με τον τρόπο αυτό, το City Digital Twin μπορεί να υποστηρίξει τον σχεδιασμό σε επίπεδο γειτονιάς και πόλης με μεγαλύτερη ακρίβεια και διαφάνεια.

Παρά τα παραπάνω θετικά στοιχεία, η αποτίμηση της στρατηγικής αναδεικνύει και σημαντικές προκλήσεις. Η διαρκής επικαιροποίηση δεδομένων, η ανάγκη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού και οι απαιτήσεις συντήρησης ενός σύνθετου ψηφιακού συστήματος αποτελούν κρίσιμους παράγοντες κινδύνου.

Επιπλέον, ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων και θεσμικής συνέχειας απαιτούν σαφές πλαίσιο διακυβέρνησης και διαρκή πολιτική στήριξη.

Συνολικά, η προτεινόμενη στρατηγική για την ανάπτυξη City Digital Twin στην Καλαμάτα κρίνεται ως συνεκτική, ρεαλιστική και προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά της πόλης. Η επιτυχία της εξαρτάται από τη σταδιακή εφαρμογή, τη συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα και την ενεργή συμμετοχή της κοινωνίας. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, το ψηφιακό δίδυμο μπορεί να εξελιχθεί σε βασικό εργαλείο υποστήριξης του πολεοδομικού σχεδιασμού και της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, συμβάλλοντας στη μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα και λειτουργικότητα της πόλης.

Η αποτίμηση της προτεινόμενης στρατηγικής αναδεικνύει ότι η άμεση μεταφορά διεθνών προτύπων ανάπτυξης City Digital Twins στο ελληνικό αστικό περιβάλλον δεν είναι εφικτή χωρίς ουσιαστική προσαρμογή στα τοπικά θεσμικά, πολεοδομικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά. Οι περισσότερες διεθνείς στρατηγικές έχουν αναπτυχθεί σε πόλεις με υψηλό επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας, ολοκληρωμένα συστήματα δεδομένων και σταθερά πλαίσια διακυβέρνησης, συνθήκες που διαφοροποιούνται σημαντικά στον ελληνικό αστικό χώρο.

Στην ελληνική πραγματικότητα, οι πολεοδομικές δομές χαρακτηρίζονται από έντονη ιστορική διαστρωμάτωση, κατακερματισμό χρήσεων γης και πολυπλοκότητα ιδιοκτησιακών καθεστώτων, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη σταδιακή και επιλεκτική εφαρμογή ψηφιακών εργαλείων. Επιπλέον, η αποσπασματική διαθεσιμότητα δεδομένων και οι διαφορετικοί βαθμοί ψηφιακής ετοιμότητας μεταξύ δημοτικών υπηρεσιών απαιτούν ευέλικτα και προσαρμοστικά μοντέλα ανάπτυξης ψηφιακών διδύμων, τα οποία δεν προϋποθέτουν πλήρη ωριμότητα από το αρχικό στάδιο.

Παράλληλα, η κοινωνική διάσταση του ελληνικού αστικού περιβάλλοντος, με ισχυρή παρουσία τοπικών κοινοτήτων και αυξημένη ευαισθησία σε ζητήματα δημόσιου χώρου, καθιστά αναγκαία την ενσωμάτωση συμμετοχικών διαδικασιών ήδη από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πρότυπες στρατηγικές οφείλουν να μετασχηματιστούν από τεχνοκεντρικά μοντέλα σε ανθρωποκεντρικές

προσεγγίσεις, όπου το ψηφιακό δίδυμο λειτουργεί ως εργαλείο διαλόγου, διαφάνειας και κοινωνικής νομιμοποίησης.

Συνεπώς, η προσαρμογή των διεθνών στρατηγικών στο ελληνικό αστικό περιβάλλον προϋποθέτει μια ισορροπημένη προσέγγιση που συνδυάζει την υιοθέτηση διεθνών προτύπων με τη ρεαλιστική αποτίμηση των τοπικών συνθηκών. Η στρατηγική ανάπτυξης City Digital Twin για πόλεις όπως η Καλαμάτα οφείλει να δίνει έμφαση στη σταδιακή υλοποίηση, στη διαλειτουργικότητα και στη σύνδεση με τον πολεοδομικό σχεδιασμό, ώστε το ψηφιακό εργαλείο να λειτουργήσει ως καταλύτης βιώσιμης αστικής μετάβασης και όχι ως αποσπασματική τεχνολογική καινοτομία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη βασικών ευρημάτων

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε ότι τα Ψηφιακά Δίδυμα Πόλεων (City Digital Twins) συνιστούν ένα σύνθετο και δυναμικό εργαλείο, ικανό να υποστηρίξει τον σύγχρονο πολεοδομικό σχεδιασμό και τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Τα ψηφιακά δίδυμα υπερβαίνουν τον ρόλο της απλής τρισδιάστατης απεικόνισης, καθώς ενσωματώνουν γεωχωρικά δεδομένα, πληροφορίες πραγματικού χρόνου και μηχανισμούς προσομοίωσης, συμβάλλοντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε διαφορετικά επίπεδα αστικής διακυβέρνησης.

Η ανάλυση διεθνών εφαρμογών κατέδειξε ότι η αποτελεσματική λειτουργία των City Digital Twins εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δεδομένων, τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων GIS και IoT, καθώς και από την ύπαρξη θεσμικής υποστήριξης και σαφούς στρατηγικού πλαισίου. Οι περιπτώσεις της Βαρκελώνης, του Ελσίνκι και του Άμστερνταμ ανέδειξαν διαφορετικές αλλά συμπληρωματικές προσεγγίσεις ως προς την ανάπτυξη και αξιοποίηση ψηφιακών διδύμων.

Συγκεκριμένα, η Βαρκελώνη ανέδειξε τον ρόλο των ψηφιακών διδύμων ως εργαλείων υποστήριξης της έξυπνης αστικής κινητικότητας και της διαχείρισης

πόρων, κυρίως σε θεσμικό επίπεδο και με περιορισμένη δημόσια πρόσβαση. Αντίθετα, το Ελσίνκι κατέδειξε τη σημασία της ανοικτής διάθεσης τρισδιάστατων αστικών μοντέλων, καθώς το Helsinki 3D Mesh επιτρέπει την ευρεία κατανόηση της αστικής μορφολογίας και λειτουργεί ως βάση για περαιτέρω θεματικές αναλύσεις, όπως η εκτίμηση του ηλιακού δυναμικού.

Η περίπτωση του Άμστερνταμ συμπληρώνει τα παραπάνω παραδείγματα, αναδεικνύοντας τη σημασία της συμμετοχικής και δεδομενο-κεντρικής προσέγγισης. Η αξιοποίηση ανοιχτών δεδομένων και ψηφιακών εργαλείων στο Άμστερνταμ ενισχύει τη διαφάνεια και τη συνεργασία μεταξύ δημόσιων φορέων, πολιτών και ερευνητικών ιδρυμάτων, προωθώντας τη διαμόρφωση πολιτικών και την ανάλυση σύνθετων αστικών ζητημάτων, όπως η κινητικότητα, η ενεργειακή κατανάλωση και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Συνολικά, τα ευρήματα της έρευνας καταδεικνύουν ότι τα City Digital Twins μπορούν να συμβάλουν ουσιαστικά στη βελτίωση της αστικής διακυβέρνησης, της βιωσιμότητας και της ποιότητας ζωής, υπό την προϋπόθεση ότι υιοθετούνται με ολιστική προσέγγιση και προσαρμόζονται στις τοπικές χωρικές και θεσμικές ιδιαιτερότητες. Παράλληλα, αναδείχθηκαν προκλήσεις που αφορούν την πολυπλοκότητα των δεδομένων, τους περιορισμούς πρόσβασης και τις τεχνικές απαιτήσεις, οι οποίες αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της μελλοντικής εφαρμογής αντίστοιχων πρακτικών στον ελληνικό αστικό χώρο.

6.2 Ερευνητική συνεισφορά και πρακτική αξία

Η παρούσα διπλωματική εργασία συμβάλλει στην επιστημονική συζήτηση γύρω από τα **Ψηφιακά Δίδυμα Πόλεων (City Digital Twins)**, προσφέροντας μια συνθετική και διερευνητική προσέγγιση της αξιοποίησής τους στον σύγχρονο πολεοδομικό σχεδιασμό. Σε ερευνητικό επίπεδο, η εργασία συμβάλλει στη συστηματική αποσαφήνιση των τεχνολογικών, θεσμικών και λειτουργικών παραμέτρων που συνθέτουν ένα ψηφιακό δίδυμο πόλης, υπερβαίνοντας την περιορισμένη αντίληψη που ταυτίζει τα ψηφιακά δίδυμα αποκλειστικά με τρισδιάστατες απεικονίσεις.

Μέσα από τη συγκριτική ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων, και ειδικότερα των περιπτώσεων της Βαρκελώνης, του Ελσίνκι και του Άμστερνταμ, η εργασία αναδεικνύει διαφορετικά μοντέλα υλοποίησης ψηφιακών διδύμων, φωτίζοντας τις επιπτώσεις της δημόσιας προσβασιμότητας, της διακυβέρνησης δεδομένων και της συμμετοχικότητας στη λειτουργικότητα και στην αποδοχή τους. Η σύγκριση αυτή προσφέρει ένα εννοιολογικό πλαίσιο αξιολόγησης, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί σε μελλοντικές ερευνητικές και εφαρμοσμένες μελέτες.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα αποτελέσματα της έρευνας καταδεικνύουν ότι τα City Digital Twins μπορούν να λειτουργήσουν ως εργαλεία υποστήριξης τεκμηριωμένων αποφάσεων σε κρίσιμους τομείς του αστικού σχεδιασμού, όπως η κινητικότητα, η ενεργειακή διαχείριση, η βιωσιμότητα και η κατανομή πόρων. Η ανάλυση εφαρμογών όπως το Helsinki 3D και οι πλατφόρμες ψηφιακών διδύμων της Βαρκελώνης και του Άμστερνταμ αναδεικνύει τη δυνατότητα χρήσης τους για προσομοίωση σεναρίων και αξιολόγηση πολιτικών πριν από την εφαρμογή τους στον φυσικό χώρο.

Ιδιαίτερη πρακτική αξία της εργασίας έγκειται στη δυνατότητα προσαρμογής των διεθνών εμπειριών στο ελληνικό αστικό περιβάλλον. Η συστηματική καταγραφή των προϋποθέσεων, των περιορισμών και των καλών πρακτικών παρέχει ένα χρήσιμο σημείο αναφοράς για δήμους, πολεοδομικές υπηρεσίες και φορείς τοπικής αυτοδιοίκησης που επιδιώκουν να διερευνήσουν την εφαρμογή ψηφιακών διδύμων σε ελληνικές πόλεις. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία γεφυρώνει το χάσμα μεταξύ θεωρητικής έρευνας και εφαρμοσμένου πολεοδομικού σχεδιασμού.

Συνολικά, η ερευνητική και πρακτική συνεισφορά της εργασίας έγκειται στην ανάδειξη των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων ως πολυδιάστατων εργαλείων που μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα, τη διαφάνεια και την ποιότητα ζωής, υπό την προϋπόθεση ότι εντάσσονται σε ένα σαφές θεσμικό και στρατηγικό πλαίσιο και προσαρμόζονται στις ιδιαιτερότητες του εκάστοτε αστικού περιβάλλοντος.

6.3 Προτάσεις πολιτικής για έξυπνες ελληνικές πόλεις

Η ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων έξυπνων πόλεων ανέδειξε διαφορετικά μοντέλα ανάπτυξης και αξιοποίησης Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων (City Digital Twins), τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν ως πρότυπα για την ελληνική πραγματικότητα. Με βάση τις εμπειρίες της Βαρκελώνη, του Ελσίνκι και του Άμστερνταμ, διαμορφώνονται τρεις συμπληρωματικές προτάσεις πολιτικής για την ανάπτυξη έξυπνων ελληνικών πόλεων.

6.3.1 Θεσμικό και στρατηγικό μοντέλο (πρότυπο Βαρκελώνης)

Η περίπτωση της Βαρκελώνης αναδεικνύει τη σημασία της ενσωμάτωσης των ψηφιακών διδύμων σε ένα σαφές θεσμικό και στρατηγικό πλαίσιο. Για τις ελληνικές πόλεις, προτείνεται η υιοθέτηση ενός κεντρικού μηχανισμού συντονισμού σε επίπεδο δήμου ή μητροπολιτικής περιοχής, ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για τη συλλογή δεδομένων, τη διαχείριση των ψηφιακών εργαλείων και τη σύνδεσή τους με τον πολεοδομικό σχεδιασμό. Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη χρήση των City Digital Twins ως εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων για κρίσιμους τομείς, όπως η κινητικότητα και η διαχείριση πόρων.

6.3.2 Ανοικτό τεχνικό μοντέλο και έμφαση στο GIS (πρότυπο Ελσίνκι)

Το παράδειγμα του Ελσίνκι υπογραμμίζει τη σημασία της ανοιχτής διάθεσης γεωχωρικών και τρισδιάστατων δεδομένων ως βάσης για την ανάπτυξη ψηφιακών διδύμων. Στο ελληνικό πλαίσιο, προτείνεται η προτεραιοποίηση της δημιουργίας ανοιχτών 3D αστικών μοντέλων και γεωχωρικών υποδομών, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο από δημόσιους φορείς όσο και από ερευνητές και πολίτες. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη διαφάνεια, μειώνει τα εμπόδια εισόδου και δημιουργεί τις προϋποθέσεις για σταδιακή μετάβαση προς πιο σύνθετες εφαρμογές ψηφιακών διδύμων.

6.3.3 Συμμετοχικό και δεδομενο-κεντρικό μοντέλο (πρότυπο Άμστερνταμ)

Η εμπειρία του Άμστερνταμ αναδεικνύει τον καθοριστικό ρόλο της συμμετοχικότητας και της ανοιχτής αξιοποίησης δεδομένων στην επιτυχία των έξυπνων πόλεων. Για την Ελλάδα, προτείνεται η ενίσχυση πολιτικών που

προωθούν τη συμμετοχή των πολιτών μέσω ανοικτών πλατφορμών, διαδραστικών χαρτών και ψηφιακών εργαλείων διαβούλευσης. Παράλληλα, η αξιοποίηση δεδομένων πραγματικού χρόνου μπορεί να υποστηρίξει τη συνεχή παρακολούθηση και αξιολόγηση αστικών πολιτικών, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη στη δημόσια διοίκηση.

Διεθνές Πρότυπο	Κύρια Χαρακτηριστικά Μοντέλου	Προτεινόμενη Πολιτική για Ελλάδα	Πρακτική Εφαρμογή σε Ελληνικές Πόλεις
Βαρκελώνη	Θεσμική ενσωμάτωση Digital Twin στη λήψη αποφάσεων, έμφαση σε κινητικότητα και διαχείριση πόρων	Δημιουργία δημοτικών μονάδων ψηφιακού σχεδιασμού και συντονισμού δεδομένων	Χρήση ψηφιακών εργαλείων για προσομοίωση κυκλοφοριακών ρυθμίσεων, σχεδίων βιώσιμης κινητικότητας και ενεργειακών παρεμβάσεων
Ελσίνκι	Ανοιχτό 3D αστικό μοντέλο, δημόσια προσβασιμότητα, ισχυρή βάση GIS	Ανάπτυξη ανοικτών γεωχωρικών και τρισδιάστατων δεδομένων σε επίπεδο δήμου	Δημιουργία 3D μοντέλων πόλης για χωρική ανάλυση, σκιασμό, ενεργειακό σχεδιασμό και αξιολόγηση παρεμβάσεων
Άμστερνταμ	Ανοιχτά δεδομένα, συμμετοχική διακυβέρνηση, αξιοποίηση real-time δεδομένων	Ενίσχυση ανοικτών δεδομένων και ψηφιακών πλατφορμών διαβούλευσης	Διαδραστικοί χάρτες, dashboards βιωσιμότητας, συμμετοχικός σχεδιασμός μέσω ψηφιακών εφαρμογών

Πίνακας 3 Σύνδεση διεθνών προτύπων City Digital Twins με προτεινόμενες πολιτικές και πιθανές εφαρμογές στον ελληνικό αστικό χώρο.

6.4 Μελλοντικές προοπτικές ,επεκτάσεις και περιορισμοί της έρευνας

6.4.1 Μελλοντικές προοπτικές και επεκτάσεις

Η παρούσα έρευνα ανέδειξε τη δυναμική των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων ως εργαλείων υποστήριξης του πολεοδομικού σχεδιασμού και της βιώσιμης αστικής

διακυβέρνησης. Ωστόσο, το πεδίο των City Digital Twins παραμένει εξελισσόμενο, γεγονός που δημιουργεί σημαντικές δυνατότητες για περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση και εφαρμοσμένη έρευνα.

Μια βασική μελλοντική κατεύθυνση αφορά την ποσοτική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ψηφιακών διδύμων. Η παρούσα εργασία ακολούθησε ποιοτική και συγκριτική προσέγγιση· συνεπώς, επόμενες μελέτες θα μπορούσαν να εστιάσουν σε μετρήσιμους δείκτες απόδοσης, όπως η μείωση κυκλοφοριακής συμφόρησης, η εξοικονόμηση ενέργειας ή η βελτίωση της προσβασιμότητας σε αστικές υπηρεσίες μέσω της χρήσης ψηφιακών μοντέλων.

Επιπλέον, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περαιτέρω διερεύνηση της ενσωμάτωσης τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης στα αστικά ψηφιακά δίδυμα. Η ανάπτυξη πιο σύνθετων προγνωστικών μοντέλων θα μπορούσε να επιτρέψει όχι μόνο την οπτικοποίηση υφιστάμενων συνθηκών, αλλά και την πρόβλεψη μελλοντικών εξελίξεων, ενισχύοντας τον στρατηγικό σχεδιασμό σε τομείς όπως η κλιματική προσαρμογή και η ανθεκτικότητα των πόλεων.

Μια ακόμη προοπτική αφορά την ενίσχυση της συμμετοχικής διάστασης των ψηφιακών διδύμων. Η έρευνα έδειξε ότι η δημόσια προσβασιμότητα και τα ανοιχτά δεδομένα ενισχύουν τη διαφάνεια και τη συνεργασία. Μελλοντικές μελέτες θα μπορούσαν να εξετάσουν πώς οι πολίτες αλληλεπιδρούν με τέτοιες πλατφόρμες και ποιον βαθμό επιρροής έχουν στη διαμόρφωση πολιτικών.

Ιδιαίτερης σημασίας για την ελληνική πραγματικότητα είναι η πιλοτική εφαρμογή ψηφιακού διδύμου σε μεσαίου μεγέθους πόλη, με στόχο την αξιολόγηση τεχνικών, θεσμικών και οικονομικών παραμέτρων υλοποίησης. Μια τέτοια εφαρμογή θα μπορούσε να λειτουργήσει ως εργαστήριο καινοτομίας και να προσφέρει εμπειρικά δεδομένα για την προσαρμογή διεθνών πρακτικών στο εθνικό πλαίσιο.

Τέλος, το πεδίο της διακυβέρνησης δεδομένων αναδεικνύεται ως κρίσιμο για τη βιωσιμότητα των City Digital Twins. Μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει σε ζητήματα προστασίας προσωπικών δεδομένων, ηθικής χρήσης αλγορίθμων και θεσμικού πλαισίου, ώστε η τεχνολογική πρόοδος να συμβαδίζει με τις αρχές της κοινωνικής υπευθυνότητας και της δημοκρατικής διακυβέρνησης.

Συνολικά, οι μελλοντικές προοπτικές των Ψηφιακών Διδύμων Πόλεων εκτείνονται πέρα από την τεχνική τους διάσταση, αγγίζοντας ζητήματα στρατηγικής διαχείρισης, θεσμικής οργάνωσης και κοινωνικής συμμετοχής. Η περαιτέρω ερευνητική εμβάθυνση στο πεδίο αυτό μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη διαμόρφωση πιο βιώσιμων, ανθεκτικών και έξυπνων αστικών συστημάτων.

6.4.2 Περιορισμοί της έρευνας

Παρά τη συστηματική ανάλυση του αντικειμένου, η παρούσα έρευνα υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται τόσο με τη μεθοδολογική προσέγγιση όσο και με τη φύση του εξεταζόμενου πεδίου.

Αρχικά, η εργασία βασίστηκε κυρίως σε ποιοτική και συγκριτική ανάλυση διεθνών παραδειγμάτων, χωρίς την εφαρμογή εμπειρικής ποσοτικής αξιολόγησης ή πιλοτικής υλοποίησης ψηφιακού διδύμου σε ελληνική πόλη. Ως εκ τούτου, τα συμπεράσματα που προκύπτουν αφορούν κυρίως τη διερεύνηση δυνατοτήτων και προϋποθέσεων εφαρμογής και όχι την αποτίμηση μετρήσιμων αποτελεσμάτων.

Επιπλέον, η πρόσβαση σε πλήρως λειτουργικές πλατφόρμες ψηφιακών διδύμων είναι συχνά περιορισμένη, καθώς σε πολλές περιπτώσεις πρόκειται για εργαλεία που χρησιμοποιούνται κυρίως σε θεσμικό ή ερευνητικό επίπεδο. Η ανάλυση βασίστηκε σε δημόσια διαθέσιμες πληροφορίες, τεχνικές περιγραφές και διαδικτυακές εφαρμογές, γεγονός που ενδέχεται να περιορίζει την πλήρη κατανόηση των εσωτερικών μηχανισμών λειτουργίας τους.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά την ταχεία εξέλιξη των τεχνολογιών που σχετίζονται με τα City Digital Twins. Η συνεχής ανάπτυξη νέων εργαλείων, προτύπων και αλγορίθμων ενδέχεται να μεταβάλλει το τεχνολογικό και θεσμικό πλαίσιο μέσα στο οποίο λειτουργούν οι έξυπνες πόλεις, καθιστώντας ορισμένα συμπεράσματα χρονικά εξαρτώμενα.

Τέλος, η μεταφορά διεθνών πρακτικών στο ελληνικό πλαίσιο απαιτεί προσεκτική προσαρμογή στις τοπικές διοικητικές, οικονομικές και θεσμικές συνθήκες. Η παρούσα εργασία εντοπίζει δυνατότητες εφαρμογής, χωρίς όμως να εξετάζει σε βάθος ζητήματα χρηματοδότησης, διοικητικής ικανότητας ή νομικού πλαισίου, τα οποία αποτελούν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας.

Η αναγνώριση των παραπάνω περιορισμών δεν μειώνει τη σημασία των ευρημάτων, αλλά ενισχύει τη διαφάνεια και την επιστημονική εγκυρότητα της έρευνας.

Η μετάβαση προς έξυπνες και βιώσιμες πόλεις δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική πρόκληση, αλλά στρατηγική επιλογή που επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο σχεδιάζουμε, διαχειριζόμαστε και βιώνουμε τον αστικό χώρο. Τα Ψηφιακά Δίδυμα Πόλεων αναδεικνύονται ως δυναμικά εργαλεία που μπορούν να γεφυρώσουν το χάσμα μεταξύ δεδομένων και σχεδιασμού, μετατρέποντας την πληροφορία σε τεκμηριωμένη απόφαση. Μέσα από τη διερεύνηση διεθνών πρακτικών και τη σύνδεσή τους με την ελληνική πραγματικότητα, η παρούσα εργασία επιχειρεί να συμβάλει σε έναν ευρύτερο διάλογο για το μέλλον του αστικού σχεδιασμού. Η ουσιαστική αξιοποίηση των ψηφιακών διδύμων προϋποθέτει θεσμική ωριμότητα, τεχνική επάρκεια και κοινωνική συμμετοχή, στοιχεία που μπορούν να διαμορφώσουν τις βάσεις για πιο ανθεκτικές, διαφανείς και βιώσιμες ελληνικές πόλεις στο μέλλον.

Βιβλιογραφία

- (2025, Δεκέμβριος 14). Ανάκτηση από <https://eurocities.eu/projects/living-in-eu/>
- (2026, Ιανουάριος 3). Ανάκτηση από IBM: <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin>
- 3D Bag Netherlands*. (χ.χ.). Ανάκτηση από <https://3dbag.nl>
- Amsterdam Netherlands*. (2026, January). Ανάκτηση από <https://www.amsterdam.nl/innovatie/digitalisering/3d-amsterdam>
- Annysha Huzzat, A. A. (2025). A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities.
- Commission, E. (2025, Δεκέμβριος 14). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/>.
Ανάκτηση από Ιστότοπος της ΕΕ για την Ψηφιακή πολιτική: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/smart-cities-and-communities>
- Creswell, J. W. (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. USA: Sage Publications.
- Diaz-Sarachaga, J. M. (2024). May urban digital twins spur the New Urban Agenda? The Spanish case study.
- Euro Cities*. (2025, Νοέμβριος 3). Ανάκτηση από <https://eurocities.eu/latest/urban-digital-twins-transforming-city-planning-and-governance/>:
<https://eurocities.eu/latest/urban-digital-twins-transforming-city-planning-and-governance/>
- Gemeente Amsterdam*. (Φεβρουάριος , 2026). Ανάκτηση από Digital Urban Planning Lab: <https://www.amsterdam.nl/innovatie/digitalisering-technologie/digitalisering/digital-urban-planning>
- GeoBIM Benchmark*. (2026, Ιανουάριος). Ανάκτηση από Amsterdam CityGML model LoD 1: <https://3d.bk.tudelft.nl/projects/geobim-benchmark/amsterdamgml.html>
- Hämäläinen, M. (2021). *Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city*.
- Helsinki 3d* . (χ.χ.). Ανάκτηση από (<https://kartta.hel.fi/3d/>)
- Helsinki Finland*. (2025, Νοέμβριος). Ανάκτηση από <https://www.hel.fi/en/decision-making/information-on-helsinki/maps-and-geospatial-data/helsinki-3d>

- <https://digital-strategy.ec.europa.eu/>. (2025, Μάιος 14). Ανάκτηση από <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/citiverse>
- <https://eurocities.eu/>. (2025, Δεκέμβριος 14). Ανάκτηση από Eurocities: <https://eurocities.eu/projects/living-in-eu/>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/digital-twin>). (2025, Δεκέμβριος). Ανάκτηση από Sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/social-sciences/digital-twin>)
- Imane Jeddoub, Z. B. (χ.χ.). Enriched Semantic 3D Point Clouds: An Alternative to 3D City Models for Digital Twin for Cities? *In International 3D GeoInfo Conference* (σσ. (pp. 407-423)). Springer Nature Switzerland.
- Mylonas, G. K.-1. (2026, Ιανουάριος 3). *IEEE Access*. Ανάκτηση από <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9576739>
- Smartcities*. (2025, Δεκέμβριος). Ανάκτηση από (<https://www.smartcitiesworld.net/smart-cities/smart-city-barcelona?topics=barcelona>)
- Twin4Resilience*. (2026, January). Ανάκτηση από <https://t4r.nweurope.eu/city-of-amsterdam>
- Twin4Resilience*. (2026, January). Ανάκτηση από <https://t4r.nweurope.eu/city-of-amsterdam>
- Συνέδριο, Ε. Ε. (2023). *Εξυπνες πόλεις Υπάρχουν απτές λύσεις, αλλά ο κατακερματισμός τους δυσκολεύει την ευρύτερη υιοθέτησή τους*. Λουξεμβούργο: Υπηρεσία Εκδόσεων ΕΕ.
- Alvi, M., Dutta, H., Minerva, R., Crespi, N., Raza, S. M., & Herath, M. (2025). Global perspectives on digital twin smart cities: Innovations, challenges, and pathways to a sustainable urban future. *Sustainable Cities and Society*, 126, 106356.
- De Jaeger, A., & Swerts, T. (2026). Right to the digital Twin City? citizen participation and limits-by-design in Rotterdam's urban digital twin. *Cities*, 168, 106498.
- Yessef, M., Hakam, Y., Tabaa, M., Alammari, M. M., & Elbarbary, Z. M. (2025). Digital twin technology in smart cities: A step toward intelligent urban management. *Energy Reports*, 14, 5539-5557.

- Huzzat, A., Anpalagan, A., Khwaja, A. S., Woungang, I., Alnoman, A. A., & Pillai, A. S. (2025). A comprehensive review of Digital Twin technologies in smart cities. *Digital Engineering*, 4, 100040.
- Sacoto-Cabrera, E. J., Perez-Torres, A., Tello-Oquendo, L., & Cerrada, M. (2025). IoT, AI, and Digital Twins in Smart Cities: A Systematic Review for a Thematic Mapping and Research Agenda. *Smart Cities*, 8(5), 175.
- Luca, M., Lepri, B., Gallotti, R., Paolazzi, S., Bigi, M., & Pistore, M. Towards civic digital twins: co-design the citizen-centric future of Bologna (2024). arXiv preprint arXiv:2412.06328.
- Temple, L., Pereira, G. V., & Klausner, L. D. (2024). Unravelling the Use of Digital Twins to Assist Decision-and Policy-Making in Smart Cities. arXiv preprint arXiv:2405.20916.
- Hämäläinen, M. (2021). Urban development with dynamic digital twins in Helsinki city. *IET Smart Cities*, 3 (4), 201-210.
- Mylonas, G., Kalogeras, A., Kalogeras, G., Anagnostopoulos, C., Alexakos, C., & Muñoz, L. (2021). Digital twins from smart manufacturing to smart cities: A survey. *Ieee Access*, 9, 143222-143249.
- Ding, P., Liu, S. Q., Chiong, R., Dhakal, S., Chen, D., Li, D., ... & Chung, S. H. (2026). A review of digital twins in smart industries: Concepts, milestones, trends, applications, opportunities and challenges. *Computers in Industry*, 174, 104398.
- Vallicelli, M. (2018). *Smart cities and digital workplace culture in the global European context: Amsterdam, London and Paris*. *City, Culture and Society*, 12, 25-34.
- Jeddoub, I., Ballouch, Z., Hajji, R., & Billen, R. (2023, September). *Enriched Semantic 3D Point Clouds: An Alternative to 3D City Models for Digital Twin for Cities?*. In *International 3D GeoInfo Conference* (pp. 407-423). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Masoumi, H., Shirowzhan, S., Eskandarpour, P., & Pettit, C. J. (2023). City digital twins: Their maturity level and differentiation from 3D city models. *Big Earth Data*, 7(1), 1-36.
- NetZeroCities. (2023). *Kalamata: 2030 Climate Neutrality Action Plan*

- Diaz-Sarachaga, J. M. (2024). May urban digital twins spur the New Urban Agenda? The Spanish case study. *Sustainable Cities and Society*, 114, 105788.
- Channi, H. K., Kumar, P., & Safdarian, F. (2025). Planning and building digital twins for smart cities. In *Digital Twins for Smart Cities and Villages* (pp. 205-225). Elsevier.
- Farag, A. A., & Doheim, R. M. (2025). Geospatial digital twins: Applications in sustainable urban planning. In *Digital Twins for Smart Metabolic Circular Cities* (pp. 175-196). Elsevier.
- Χριστοδούλου, Χ., Βαρθολομαίος, Α., & Οικονόμου, Μ. (2024). Βιώσιμος (;) αστικός σχεδιασμός: Εγχειρίδιο – Βασικά στοιχεία και διαδικασίες. Κάλλιπος.
- Batty, M. (2018). Digital twins. *Environment and planning B: Urban analytics and City Science*, 45(5), 817-820.
- Barcelona Supercomputing Center – Centro Nacional de Supercomputación. (2022). Barcelona tests digital twin developed by BSC if it is a 15-minute city. (<https://www.bsc.es>)
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. Sage publications.
- Kuipers, M., Martens, C., Bozon, D., van Beeck, T., & Hemmes, J. *Circular City Index*.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



REPORT

Profitability for Solar Systems

April 25, 2026

Overview



Reference period: 20 years

PROFIT	157.206,17 € compensation for grid feed-in
	34.760,69 € cost savings from self-consumption
INVESTMENT	122.804,73 € system costs plus 2.456,09 € operating costs / year
	147.708,39 € credit costs / 27.903,65 € interest amount with 119.804,73 € financing requirement equivalent to an annuity of 14.770,84 €
AREA	456,61 m² total area

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Inputs

Selected Potential Areas



Musterstadt
Musterstraße 1, 00000 Musterstadt

3 / 12

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Consumption Details for Profitability Calculator

Electricity Demand

This section contains your details about your personal electricity demand, derived either from your household size and additional consumption components or by specifying your exact electricity consumption.

Household size:	3 Persons
Heat pump available:	yes
Living space size:	100 m ²
E-car available:	yes
Distance / year	10.000 km
Calculated electricity demand:	8.900 kWh / year

Self-Consumption

Depending on your consumption behavior, more electricity from the solar system can be used directly. For example, if you consume more electricity during the day, the direct consumption share will increase. The same applies to battery usage. This section contains your details about how much solar power you consume directly. These values may have been defined by selecting a predefined consumption profile.

Consumption profile:	No consumption profile selected
Direct consumption:	30 %
Include power storage:	yes
Storage consumption:	30 %
Storage capacity:	10 kWh

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Energy Costs

This section lists your energy cost details. These should match your current electricity costs from your provider. The feed-in compensation amount defines the compensation for the portion of generated solar power that is not consumed directly and fed into the public grid. You could also adjust the projected electricity price increase. The average electricity price increase in German households from 2000 to 2021 was approximately 6.1%. Further increases are expected in the future.

Cost per kWh:	29 ct
Compensation per kWh:	8,20 ct
Electricity price increase per year:	2 %

Financing

This section contains your financing details, including equity capital, term, and interest rate. As current interest rates are subject to continuous fluctuations, independent research is necessary.

Financing planned:	yes
Investment costs:	122.804,73 €
Equity capital:	3.000,00 €
Credit amount:	119.804,73 €
Duration:	10 Years
Interest rate:	4 %

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Results

Financing Plan

In addition to financing through a bank, there are other funding opportunities from the government. For more information, consult KfW. For investment cost calculation, a defined price per installed kilowatt peak (kWp) is used.

Credit amount: 119.804,73 €

Duration: 10,00 Years

Interest rate: 4,00 %

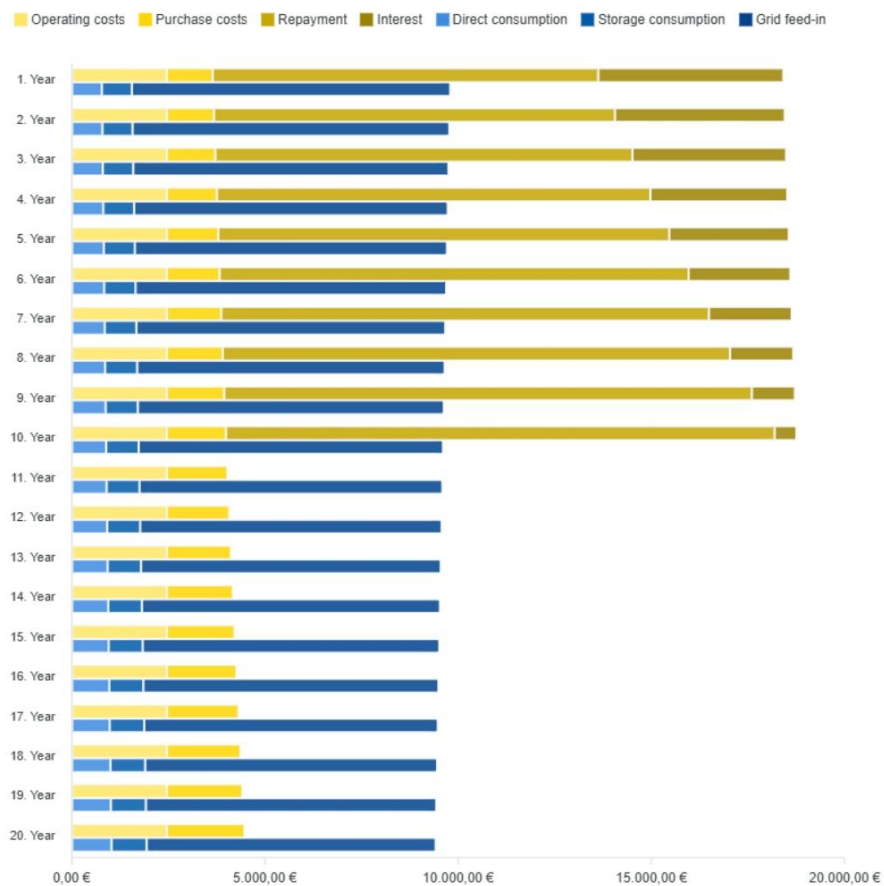
Years	Annuity	Repayment	Remaining debt	Interest portion
1	14.770,84 €	9.978,65 €	109.826,08 €	4.792,19 €
2	14.770,84 €	10.377,80 €	99.448,29 €	4.393,04 €
3	14.770,84 €	10.792,91 €	88.655,38 €	3.977,93 €
4	14.770,84 €	11.224,62 €	77.430,76 €	3.546,22 €
5	14.770,84 €	11.673,61 €	65.757,15 €	3.097,23 €
6	14.770,84 €	12.140,55 €	53.616,60 €	2.630,29 €
7	14.770,84 €	12.626,17 €	40.990,42 €	2.144,66 €
8	14.770,84 €	13.131,22 €	27.859,20 €	1.639,62 €
9	14.770,84 €	13.656,47 €	14.202,73 €	1.114,37 €
10	14.770,84 €	14.202,73 €	0,00 €	568,11 €
Total credit costs				147.708,39 €

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Profitability Calculation

Revenue/Expense Plan

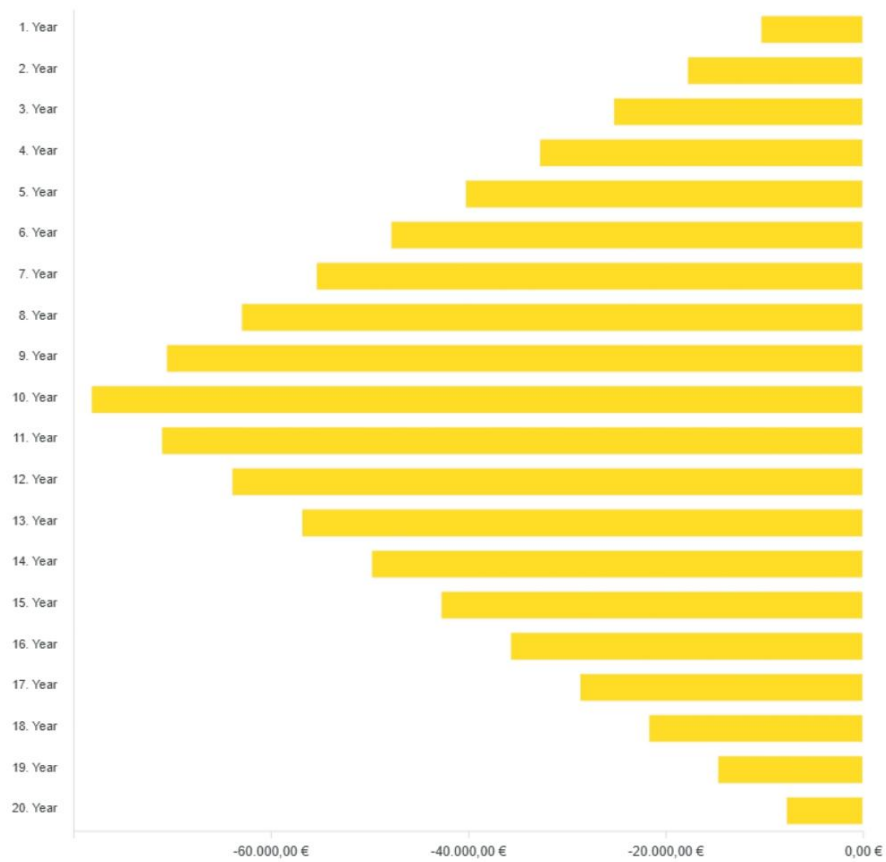
The income and expenditure plan compares the annual income and expenditure for electricity consumption over an assumed lifetime of the PV system of 20 years.



PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Liquidity Trend

The cumulative liquidity progression shows how the available funds change over time due to the acquisition and operation of the solar system over a period of 20 years.



PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Environmental Balance

CO2 Savings

A solar system does not emit CO2 when generating electricity. Only during the production of solar modules is CO2 emitted due to the required manufacturing energy.

The CO2 emissions are offset in your individual case after an operational period of: 1,07 Years

The CO2 savings correspond to the calculated comparison with CO2 emissions that would result from obtaining the same amount of electricity from the German electricity mix (as of 2022).

Your total CO2 savings over a lifetime of 20 years is: 826.006 kg

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Key Data Report

Energy Cost Balance

The specified values are calculated based on the energy yield of potential areas as well as personalized consumption and energy cost details.

Year	Operating costs	Grid consumption	Direct consumption	Storage consumption	Grid feed-in	Liquidity
1	2.456,09 €	1.187,26 €	774,30 €	774,30 €	8.241,37 €	-10.436,96 €
2	2.456,09 €	1.221,27 €	785,84 €	781,89 €	8.201,26 €	-17.894,90 €
3	2.456,09 €	1.256,17 €	797,53 €	789,47 €	8.161,15 €	-25.373,68 €
4	2.456,09 €	1.291,98 €	809,37 €	797,04 €	8.121,04 €	-32.873,17 €
5	2.456,09 €	1.328,71 €	821,36 €	804,60 €	8.080,93 €	-40.393,22 €
6	2.456,09 €	1.366,40 €	833,52 €	812,15 €	8.040,81 €	-47.933,67 €
7	2.456,09 €	1.405,06 €	845,83 €	819,67 €	8.000,70 €	-55.494,40 €
8	2.456,09 €	1.444,73 €	858,30 €	827,17 €	7.960,59 €	-63.075,27 €
9	2.456,09 €	1.485,41 €	870,93 €	834,64 €	7.920,48 €	-70.676,16 €
10	2.456,09 €	1.527,15 €	883,72 €	842,08 €	7.880,36 €	-78.296,93 €
11	2.456,09 €	1.569,97 €	896,67 €	849,48 €	7.840,25 €	-71.166,62 €
12	2.456,09 €	1.613,88 €	909,79 €	856,84 €	7.800,14 €	-64.055,94 €
13	2.456,09 €	1.658,92 €	923,08 €	864,16 €	7.760,03 €	-56.964,77 €
14	2.456,09 €	1.705,12 €	936,53 €	871,43 €	7.719,92 €	-49.892,99 €
15	2.456,09 €	1.752,51 €	950,16 €	878,64 €	7.679,80 €	-42.840,48 €
16	2.456,09 €	1.801,11 €	963,95 €	885,79 €	7.639,69 €	-35.807,14 €
17	2.456,09 €	1.850,95 €	977,91 €	892,88 €	7.599,58 €	-28.792,87 €
18	2.456,09 €	1.902,06 €	992,05 €	899,89 €	7.559,47 €	-21.797,56 €
19	2.456,09 €	1.954,48 €	1.006,36 €	906,83 €	7.519,36 €	-14.821,11 €
20	2.456,09 €	2.008,23 €	1.020,85 €	913,69 €	7.479,24 €	-7.863,42 €
Total:	49.121,89 €	31.331,37 €	17.858,05 €	16.902,64 €	157.206,17 €	

PROFITABILITY FOR SOLAR SYSTEMS

Energy Balance

The specified values are calculated based on the energy yield of potential areas and personalized consumption details.

Year	Energy yield	Energy demand	Storage losses	Direct consumption	Storage consumption	Grid consumption	Grid supply
1	105.845 kWh	8.900 kWh	534 kWh	2.670 kWh	2.670 kWh	4.094 kWh	100.505 kWh
2	105.315 kWh	8.900 kWh	529 kWh	2.657 kWh	2.643 kWh	4.129 kWh	100.015 kWh
3	104.786 kWh	8.900 kWh	523 kWh	2.643 kWh	2.617 kWh	4.163 kWh	99.526 kWh
4	104.257 kWh	8.900 kWh	518 kWh	2.630 kWh	2.590 kWh	4.198 kWh	99.037 kWh
5	103.728 kWh	8.900 kWh	513 kWh	2.617 kWh	2.563 kWh	4.233 kWh	98.548 kWh
6	103.198 kWh	8.900 kWh	507 kWh	2.603 kWh	2.537 kWh	4.268 kWh	98.059 kWh
7	102.669 kWh	8.900 kWh	502 kWh	2.590 kWh	2.510 kWh	4.302 kWh	97.570 kWh
8	102.140 kWh	8.900 kWh	497 kWh	2.577 kWh	2.483 kWh	4.337 kWh	97.080 kWh
9	101.611 kWh	8.900 kWh	491 kWh	2.563 kWh	2.456 kWh	4.372 kWh	96.591 kWh
10	101.082 kWh	8.900 kWh	486 kWh	2.550 kWh	2.430 kWh	4.406 kWh	96.102 kWh
11	100.552 kWh	8.900 kWh	481 kWh	2.537 kWh	2.403 kWh	4.441 kWh	95.613 kWh
12	100.023 kWh	8.900 kWh	475 kWh	2.523 kWh	2.376 kWh	4.476 kWh	95.124 kWh
13	99.494 kWh	8.900 kWh	470 kWh	2.510 kWh	2.350 kWh	4.511 kWh	94.634 kWh
14	98.965 kWh	8.900 kWh	465 kWh	2.496 kWh	2.323 kWh	4.545 kWh	94.145 kWh
15	98.435 kWh	8.900 kWh	459 kWh	2.483 kWh	2.296 kWh	4.580 kWh	93.656 kWh
16	97.906 kWh	8.900 kWh	454 kWh	2.470 kWh	2.270 kWh	4.615 kWh	93.167 kWh
17	97.377 kWh	8.900 kWh	449 kWh	2.456 kWh	2.243 kWh	4.649 kWh	92.678 kWh
18	96.848 kWh	8.900 kWh	443 kWh	2.443 kWh	2.216 kWh	4.684 kWh	92.189 kWh
19	96.319 kWh	8.900 kWh	438 kWh	2.430 kWh	2.189 kWh	4.719 kWh	91.699 kWh
20	95.789 kWh	8.900 kWh	433 kWh	2.416 kWh	2.163 kWh	4.753 kWh	91.210 kWh
Total:	2.016.339 kWh	178.000 kWh	9.665 kWh	50.864 kWh	48.327 kWh	88.475 kWh	1.917.148 kWh



Information

The interactive VC Solar App contains a yield calculator that determines the photovoltaic output based on semantic areas and drawn open spaces and allows the dimensioning and evaluation of a specific solar installation. In addition to roof surfaces and facades, the software can also take into account shading from other objects such as trees, dormers or planned buildings. All objects and models loaded into the VC Map contribute to shading calculations allowing interactive solar yield calculations directly in the browser. Individual adjustments enable efficient and environmentally friendly planning of the solar system. Cities, municipalities and citizens benefit from intuitive reporting and integration into existing planning processes.

Virtual City Systems was founded in 2005 and has established itself as a pioneer in the field of urban digital twins based on 3D city models. With headquarters in Berlin and a branch in Grafing, the software company is part of the international CADFEM Group. More than 200 customers, including cities such as Hamburg, Rotterdam, Vienna and Singapore, use the innovative solutions for the management, visualization and use of 3D geodata. Virtual City Systems relies on open standards and open source software to support cities and municipalities in using digital tools to design urban environments and develop sustainable solutions.

Are you a local authority or municipal service provider interested in a digital solution for solar potential analysis?
Then find out more on our website:
www.vc.systems