



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Ψηφιακός Πολιτισμός, Έξυπνες Πόλεις, IoT και Προηγμένες Ψηφιακές
Τεχνολογίες»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Αξιολόγηση των Δεικτών ESG στη Στρατηγική Βιωσιμότητας των Ευρωπαϊκών Έξυπνων Πόλεων Assessment of ESG Indicators in the Sustainability Strategy of European Smart Cities
Ονοματεπώνυμο Φοιτητή	Παναγιώτης Πρόκος
Πατρώνυμο	Νικόλαος
Αριθμός Μητρώου	ΨΠΟΛ/2442
Επιβλέπων	Δημήτριος Βέργαδος, Καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης **Ιούλιος 2026**

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δημήτριος Βέργαδος
Καθηγητής

Χρήστος Δουληγέρης
Καθηγητής

Δημήτριος Κοτσιφάκος
Διδάσκων ΠΜΣ

Περίληψη

Η παρούσα εργασία διερευνά τον τρόπο ενσωμάτωσης των δεικτών Environmental, Social and Governance (ESG) στον στρατηγικό σχεδιασμό βιωσιμότητας ευρωπαϊκών έξυπνων πόλεων, με στόχο την εννοιολογική ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου (Digital Twin) αστικής βιωσιμότητας. Αφετηρία αποτελεί η διαπίστωση ότι η υφιστάμενη βιβλιογραφία παρουσιάζει έντονο κατακερματισμό, καθώς απουσιάζει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που να συνδέει συστηματικά τις τρεις ESG διαστάσεις με τα αστικά υποσυστήματα μέσω ψηφιακών εργαλείων. Για την επίτευξη του σκοπού της εργασίας επιλέχθηκε η μεθοδολογία της συστηματικής ανασκόπησης βιβλιογραφίας βάσει του πρωτοκόλλου PRISMA. Αναζητήθηκαν μελέτες μέσω τεσσάρων ακαδημαϊκών βάσεων δεδομένων, με αποτέλεσμα την τελική επιλογή τριάντα δύο μελετών που πληρούσαν τα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού. Βάσει των ευρημάτων της ανασκόπησης αναπτύχθηκε εννοιολογικό μοντέλο ψηφιακού διδύμου πέντε αλληλένδετων υποσυστημάτων (ενέργεια, μεταφορές, ύδρευση, ψηφιακή υποδομή, διακυβέρνηση), το οποίο ενσωματώνει δεκαεννέα ESG παραμέτρους σε κλίμακα βαθμολόγησης 0 έως 100. Η εφαρμογή του μοντέλου στη Helsinki απέδωσε συνολικό ESG Score 74,6/100, με ισχυρότερη επίδοση στη Governance διάσταση και σχετική υστέρηση στην Environmental, κυρίως λόγω των προκλήσεων της ενεργειακής μετάβασης. Επιπροσθέτως, η εφαρμογή του ίδιου μοντέλου στην Αθήνα ως δεύτερη περίπτωση μελέτης απέδωσε συνολικό ESG Score 58,1/100, αναδεικνύοντας ένα χάσμα 16,5 μονάδων έναντι της Helsinki που αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα της «Ευρώπης δύο ταχυτήτων» στη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο πόλεων επιβεβαίωσε τη μεθοδολογική στιβαρότητα και γενικευσιμότητα του μοντέλου, ενώ ταυτόχρονα τεκμηρίωσε ότι η Αθήνα απέχει ακόμη σημαντικά από τη βιωσιμότητα, εμφανίζοντας βαθιές, διαρθρωτικές υστερήσεις, η γεφύρωση των οποίων προϋποθέτει μια μακρόπνοη και συντονισμένη πορεία στοχευμένων παρεμβάσεων. Η μελέτη καταδεικνύει ότι η ενσωμάτωση ESG δεικτών σε αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου είναι θεωρητικά τεκμηριωμένη και εφαρμόσιμη, υπό την προϋπόθεση ότι αντιμετωπίζεται ως εννοιολογικό εργαλείο σύνθεσης και όχι ως αυτόματη τεχνολογική λύση. Η ποιότητα της αστικής διακυβέρνησης αναδεικνύεται ως ο κρισιμότερος παράγοντας επίτευξης βιωσιμότητας σε όλες τις ESG διαστάσεις.

Λέξεις-Κλειδιά: ESG Δείκτες, Ψηφιακό Δίδυμο, Έξυπνες Πόλεις, Αστική Βιωσιμότητα

Abstract

This study explores how Environmental, Social, and Governance (ESG) indicators can be integrated into the strategic sustainability planning of European smart cities, with the aim of conceptually developing a Digital Twin of urban sustainability. The starting point is the observation that the existing literature is highly fragmented, as there is no comprehensive framework that systematically links the three ESG dimensions with urban subsystems through digital tools. To achieve the study's objective, the systematic literature review methodology based on the PRISMA protocol was selected. Studies were searched for across four academic databases, resulting in the final selection of thirty-two studies that met the inclusion and exclusion criteria. Based on the review's findings, a conceptual model of a digital twin comprising five interconnected subsystems (energy, transportation, water supply, digital infrastructure, governance) was developed, which incorporates nineteen ESG parameters on a 0 to 100 rating scale. Applying the model to Helsinki yielded an overall ESG Score of 74.6/100, with the strongest performance in the Governance dimension and a relative lag in the Environmental dimension, mainly due to the challenges of the energy transition. In addition, the application of the same model to Athens as a second case study yielded an overall ESG Score of 58.1/100, revealing a 16.5-point gap relative to Helsinki that reflects the reality of a "two-speed Europe" in sustainable urban development. The comparative assessment of the two cities confirmed the methodological robustness and generalizability of the model, while also demonstrating that Athens is in a pre-transitional phase, with clear potential for transitioning towards sustainability through targeted interventions. The study demonstrates that the integration of ESG indicators into a digital twin architecture is theoretically sound and feasible, provided it is treated as a conceptual tool for synthesis rather than an automatic technological solution. The quality of urban governance emerges as the most critical factor in achieving sustainability across all ESG dimensions.

Keywords: ESG Indicators, Digital Twin, Smart Cities, Urban Sustainability

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
Abstract	4
Περιεχόμενα Πινάκων	7
Περιεχόμενα Σχημάτων	8
1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Πλαίσιο και σκοπός της μελέτης.....	9
1.2 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα.....	10
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Επισκόπηση	11
2.1 Βιωσιμότητα και αστικός μετασχηματισμός.....	11
2.2 Δείκτες ESG: ορισμοί, διαστάσεις και εφαρμογή στον δημόσιο τομέα.....	12
2.3 Έξυπνες πόλεις και στρατηγικές βιωσιμότητας.....	13
2.4 Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins) ως εργαλεία βιώσιμου αστικού σχεδιασμού.....	15
2.4.1 Γεωχωρικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και Χωρική Ανάλυση	15
2.4.2 Building Information Modelling (BIM) και Ολοκλήρωση Υποδομών	16
2.4.3 Πλατφόρμες Ανοικτών Δεδομένων και Αστική Διαφάνεια	16
2.4.4 Εργαλεία Συμμετοχικού Σχεδιασμού και Ψηφιακής Δημοκρατίας.....	16
2.4.5 Πλατφόρμες IoT και Δίκτυα Αισθητήρων.....	17
2.4.6 Τα Ψηφιακά Δίδυμα ως Ολοκληρωτική Πλατφόρμα Σύνθεσης.....	17
2.4.7 Συνθετική Αποτίμηση, Η Συμπληρωματικότητα των Εργαλείων.....	18
3. Μεθοδολογία	20
3.1 Σκοπός της Έρευνας.....	20
3.2 Βάσεις Δεδομένων Αναζήτησης	20
3.3 Λέξεις-Κλειδιά και Συνδυασμοί Αναζήτησης.....	20
3.4 Κριτήρια Ένταξης και Αποκλεισμού	21
Κριτήρια Ένταξης	21
Κριτήρια Αποκλεισμού.....	21
3.5 Διαδικασία Επιλογής Μελετών	21
4. Εννοιολογική Μοντελοποίηση Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης	24
4.1 Εννοιολογική Προσέγγιση και Αρχιτεκτονική του Μοντέλου	24
4.2 Παράμετροι και Μεταβλητές του Μοντέλου ανά ESG Διάσταση	25
4.3 Υποσυστήματα και Δομή του Ψηφιακού Διδύμου	26
4.4 Ενσωμάτωση ESG Δεικτών στο Μοντέλο	27
4.5 Διαγράμματα Ροής και Σχεδιαστικές Αποτυπώσεις	28
4.6 Λειτουργικές Απαιτήσεις και Περιορισμοί του Μοντέλου	31
5. Εφαρμογή και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης: Case Study Helsinki	33
5.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Helsinki ως Έξυπνης Πόλης.....	33
5.2 Τροφοδότηση του Μοντέλου με Δεδομένα της Helsinki	33
5.2.1 Πηγές Δεδομένων και Αντιστοίχιση στις Παραμέτρους του Μοντέλου.....	34
5.2.2 Διαδικασία Κανονικοποίησης και Στάθμισης.....	35
5.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ανά ESG Διάσταση	36
5.3.1 Περιβαλλοντική Διάσταση (Environmental ESG, E-Score)	36
5.3.2 Κοινωνική Διάσταση (Social ESG, S-Score).....	37
5.3.3 Διάσταση Διακυβέρνησης (Governance ESG, G-Score)	37
5.4 Σύνθεση Αποτελεσμάτων και Αξιολόγηση Μοντέλου.....	38
5.4.1 Ολοκληρωμένη Εικόνα Αστικής Βιωσιμότητας Helsinki	38
5.4.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων βάσει Προτύπων Αναφοράς	39

5.4.3 Αξιολόγηση Αποτελεσματικότητας του Μοντέλου ESG-DT	39
5.4.4 Προτάσεις Βελτίωσης Αστικής Βιωσιμότητας βάσει Αποτελεσμάτων	40
6. Εφαρμογή και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης: Case Study Αθήνα.....	42
6.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Αθήνας ως Έξυπνης Πόλης	42
6.2 Τροφοδότηση του Μοντέλου με Δεδομένα της Αθήνας	43
6.2.1 Πηγές Δεδομένων και Αντιστοίχιση στις Παραμέτρους του Μοντέλου	43
6.2.2 Διαδικασία Κανονικοποίησης και Στάθμισης	45
6.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ανά ESG Διάσταση	46
6.3.1 Περιβαλλοντική Διάσταση (Environmental ESG, E-Score)	46
6.3.2 Κοινωνική Διάσταση (Social ESG, S-Score).....	47
6.3.3 Διάσταση Διακυβέρνησης (Governance ESG, G-Score)	47
6.4 Σύνθεση Αποτελεσμάτων και Αξιολόγηση Βιωσιμότητας	48
6.4.1 Ολοκληρωμένη Εικόνα Αστικής Βιωσιμότητας της Αθήνας	48
6.4.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων βάσει Προτύπων Αναφοράς	48
6.4.3 Συμπεράσματα Βιωσιμότητας: Είναι η Αθήνα Βιώσιμη Έξυπνη Πόλη;	49
6.4.4 Προτεινόμενα Βήματα Μετάβασης της Αθήνας προς τη Βιωσιμότητα	50
7. Συζήτηση	53
7.1 Ανακεφαλαίωση Κεντρικών Ευρημάτων και Σύνδεση με τα Ερευνητικά Ερωτήματα	53
7.2 Η Σχέση ESG Δεικτών και Αστικής Βιωσιμότητας υπό Κριτικό Πρίσμα	53
7.3 Ψηφιακά Δίδυμα και ESG: Δυνατότητες και Όρια της Ενσωμάτωσης	54
7.4 Η Governance-Environmental Συνεργεία: Εύρημα ή Τεχνούργημα Μέτρησης;	54
7.5 Περιορισμοί της Μελέτης και Επιπτώσεις για την Ερμηνεία.....	55
7.6 Συμβολή στη Βιβλιογραφία και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	56
8. Συμπεράσματα	57
Βιβλιογραφία.....	59
Παράρτημα	66

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Εργαλεία Βιώσιμου Αστικού Σχεδιασμού: Λειτουργίες και ESG Συνάφεια. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	18
Πίνακας 2. Παράμετροι και Μεταβλητές Εισόδου ανά ESG Διάσταση. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	26
Πίνακας 3. Παράμετροι Εισόδου Μοντέλου ESG-DT: Πηγές Δεδομένων Helsinki και Τιμές Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	34
Πίνακας 4. Αποτελέσματα ESG Βαθμολόγησης ανά Υποσύστημα και Διάσταση (Helsinki, 2023). Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	36
Πίνακας 5. Συγκριτική Αξιολόγηση ESG Αποτελεσμάτων Helsinki έναντι Ευρωπαϊκών Προτύπων Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	39
Πίνακας 6. Παράμετροι Εισόδου Μοντέλου ESG-DT: Πηγές Δεδομένων Αθήνας και Τιμές Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	43
Πίνακας 7. Αποτελέσματα ESG Βαθμολόγησης ανά Υποσύστημα και Διάσταση (Αθήνα, 2023). Πηγή: Ιδία επεξεργασία	46
Πίνακας 8. Συγκριτική Αξιολόγηση ESG Αποτελεσμάτων Αθήνας έναντι Helsinki και Ευρωπαϊκών Προτύπων Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία	49

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1. PRISMA Διάγραμμα ροής άρθρων ανασκόπησης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	22
Σχήμα 2. Ολοκληρωμένη Πολυεπίπεδη Αρχιτεκτονική του Ψηφιακού Διδύμου Αστικής ESG Βιωσιμότητας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	29
Σχήμα 3. Ροή Δεδομένων μεταξύ των Πέντε Αστικών Υποσυστημάτων και του Μηχανισμού Αξιολόγησης ESG. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	30
Σχήμα 4. Διάγραμμα Ροής Διαδικασίας Υπολογισμού Σύνθετης ESG Βαθμολογίας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.....	31

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο και σκοπός της μελέτης

Οι ευρωπαϊκές πόλεις βρίσκονται σήμερα στο επίκεντρο σύνθετων και αλληλοσυνδεόμενων πιέσεων βιωσιμότητας, οι οποίες απορρέουν από την κλιματική αλλαγή, την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, τη διαχείριση φυσικών πόρων και τις προκλήσεις της αστικής διακυβέρνησης. Η ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων, η ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η γήρανση των υποδομών και οι κοινωνικές ανισότητες εντείνουν την απαίτηση για νέες μορφές αστικού σχεδιασμού που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές προσεγγίσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, οι πόλεις δεν λειτουργούν πλέον μόνο ως γεωγραφικές οντότητες, αλλά ως πολύπλοκα κοινωνικο-τεχνικά συστήματα, όπου οι αποφάσεις σε επίπεδο πολιτικής, επενδύσεων και χωρικού σχεδιασμού επηρεάζουν άμεσα τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και ανθεκτικότητά τους (Teixeira Dias et al., 2023).

Η έννοια της βιωσιμότητας, όπως έχει αναπτυχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, εξελίχθηκε σταδιακά από μια γενική περιβαλλοντική ανησυχία σε ένα πολυδιάστατο πλαίσιο που ενσωματώνει περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους. Τα τελευταία χρόνια, η προσέγγιση αυτή έχει μετουσιωθεί επιχειρησιακά μέσω των δεικτών Environmental, Social and Governance (ESG), οι οποίοι αρχικά αναπτύχθηκαν στον χρηματοοικονομικό και εταιρικό τομέα, αλλά πλέον διεκδικούν αυξανόμενο ρόλο και στον δημόσιο και αστικό σχεδιασμό. Οι δείκτες ESG προσφέρουν μια πιο δομημένη και μετρήσιμη αποτύπωση της βιωσιμότητας, επιτρέποντας την αξιολόγηση πολιτικών και παρεμβάσεων με όρους περιβαλλοντικού αποτυπώματος, κοινωνικής συνοχής και ποιότητας διακυβέρνησης (Battisti, 2023).

Η μεταφορά των αρχών ESG στο αστικό περιβάλλον συνδέεται άμεσα με την ανάδυση των έξυπνων πόλεων ως στρατηγικού πλαισίου ανάπτυξης. Οι έξυπνες πόλεις αξιοποιούν ψηφιακές τεχνολογίες, δεδομένα και καινοτόμα εργαλεία διαχείρισης για τη βελτιστοποίηση των αστικών λειτουργιών και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Ωστόσο, η τεχνολογική διάσταση από μόνη της δεν επαρκεί για να διασφαλίσει τη βιωσιμότητα· απαιτείται η ενσωμάτωση σαφών κριτηρίων και δεικτών που να κατευθύνουν τη λήψη αποφάσεων. Σε αυτό το σημείο, οι δείκτες ESG λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ στρατηγικής βιωσιμότητας και ψηφιακού μετασχηματισμού, προσφέροντας ένα ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης για τομείς όπως οι μεταφορές, η ενέργεια και οι αστικές υποδομές (Dovolil & Svitek, 2024).

Παρά την αυξανόμενη αναγνώριση της σημασίας των ESG δεικτών στις πόλεις, η υφιστάμενη βιβλιογραφία παρουσιάζει έντονο κατακερματισμό. Πολλές μελέτες εστιάζουν σε επιμέρους τομείς, όπως η αστική αναγέννηση, η στέγαση ή οι πράσινοι χώροι, χωρίς να ενσωματώνουν μια ολιστική προσέγγιση που να συνδέει συστηματικά τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και διοικητικές διαστάσεις. Επιπλέον, η εφαρμογή των ESG συχνά περιορίζεται σε απολογιστικές πρακτικές ή σε δείκτες αναφοράς, χωρίς να αξιοποιούνται ως ενεργά εργαλεία στρατηγικού σχεδιασμού και πρόβλεψης (Bocca & Massimiano, 2024; Wójtowicz, 2024).

Ένα ακόμη κρίσιμο κενό της βιβλιογραφίας αφορά την απουσία ενοποιημένων ψηφιακών εργαλείων που να υποστηρίζουν τη δυναμική αξιολόγηση και τη διαρκή επικαιροποίηση των ESG δεικτών στο αστικό περιβάλλον. Αν και αναγνωρίζεται η δυναμική των ψηφιακών διδύμων (digital twins) ως μέσων προσομοίωσης και ανάλυσης πολύπλοκων αστικών συστημάτων, η σύνδεσή τους με τα ESG κριτήρια παραμένει περιορισμένη και αποσπασματική. Οι περισσότερες εφαρμογές εστιάζουν σε τεχνικές ή περιβαλλοντικές παραμέτρους, χωρίς να ενσωματώνουν συστηματικά κοινωνικούς και διοικητικούς δείκτες, γεγονός που περιορίζει τη χρησιμότητά τους για ολοκληρωμένη στρατηγική βιωσιμότητας (Zuri & Celani, 2024; Wieteska-Rosiak, 2025).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η συστηματική αποτύπωση και ανάλυση της επιστημονικής γνώσης σχετικά με τη χρήση των δεικτών ESG στον σχεδιασμό και τη διαχείριση των ευρωπαϊκών έξυπνων πόλεων. Μέσω μιας συστηματικής ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, επιδιώκεται η σύνθεση των υφιστάμενων προσεγγίσεων και η ανάδειξη κοινών προτύπων, τάσεων και κενών. Η μελέτη φιλοδοξεί να συμβάλει στη διαμόρφωση ενός εννοιολογικού πλαισίου που θα προσδιορίζει τις βασικές λειτουργικές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου έξυπνης πόλης, ικανού να ενσωματώνει και να αξιοποιεί συστηματικά τους δείκτες ESG ως εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού και λήψης αποφάσεων (Bocca & Massimiano, 2025).

1.2 Στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα μελέτη διαμορφώνεται με γνώμονα τη συστηματική και τεκμηριωμένη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι δείκτες Environmental, Social and Governance (ESG) ενσωματώνονται στον στρατηγικό σχεδιασμό και τη λειτουργία των ευρωπαϊκών έξυπνων πόλεων. Δεδομένης της πολυπλοκότητας του αντικειμένου και της ετερογένειας της υφιστάμενης βιβλιογραφίας, η έρευνα δεν αποσκοπεί στην παραγωγή πρωτογενούς εμπειρικού υλικού, αλλά στη συγκρότηση μιας συνεκτικής και αξιόπιστης βάσης γνώσης μέσω συστηματικής ανασκόπησης της διεθνούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, σύμφωνα με τις αρχές της μεθοδολογίας PRISMA.

Ο πρώτος βασικός στόχος της μελέτης είναι η χαρτογράφηση της υφιστάμενης βιβλιογραφίας που αφορά τη χρήση και εφαρμογή των δεικτών ESG στο αστικό περιβάλλον και ειδικότερα στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων. Η χαρτογράφηση αυτή αποσκοπεί στον εντοπισμό των κυρίαρχων θεματικών, των ερευνητικών τάσεων, καθώς και των γεωγραφικών και τομεακών εστιάσεων των σχετικών μελετών. Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιδιώκεται η συστηματική αποτύπωση του πώς οι διαφορετικές διαστάσεις των ESG δεικτών προσεγγίζονται στη βιβλιογραφία και ποιοι τομείς αστικής λειτουργίας συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον.

Ο δεύτερος στόχος της μελέτης αφορά την αναλυτική εξέταση και κατηγοριοποίηση των ευρημάτων της βιβλιογραφίας σε σχέση με τους επιμέρους τομείς αστικής λειτουργίας, όπως η ενέργεια, οι μεταφορές, οι υποδομές, η ύδρευση και αποχέτευση, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και η αστική διακυβέρνηση. Μέσω αυτής της ανάλυσης, η μελέτη επιδιώκει να αναδείξει τις διαφοροποιήσεις στον τρόπο εφαρμογής των ESG δεικτών, καθώς και τις συνέργειες ή τις αποκλίσεις μεταξύ περιβαλλοντικών, κοινωνικών και διοικητικών διαστάσεων στο επίπεδο της πόλης.

Ο τρίτος στόχος επικεντρώνεται στη σύνθεση των αποτελεσμάτων της συστηματικής ανασκόπησης με σκοπό τη διαμόρφωση ενός εννοιολογικού πλαισίου που να υποστηρίζει τον στρατηγικό σχεδιασμό βιώσιμων έξυπνων πόλεων. Ειδικότερα, η μελέτη στοχεύει στην εξαγωγή λειτουργικών προϋποθέσεων και βασικών απαιτήσεων για την ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου έξυπνης πόλης, το οποίο θα μπορεί να ενσωματώνει συστηματικά τους δείκτες ESG και να λειτουργεί ως εργαλείο υποστήριξης της λήψης αποφάσεων και της αξιολόγησης πολιτικών βιωσιμότητας.

Βάσει των παραπάνω η παρούσα μελέτη εξετάζει τα εξής ερευνητικά ερωτήματα:

- Ποιοι δείκτες ESG αναδεικνύονται συχνότερα στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με τις ευρωπαϊκές έξυπνες πόλεις και πώς κατανέμονται στις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και διοικητικές διαστάσεις;
- Σε ποιους βασικούς τομείς αστικής λειτουργίας εφαρμόζονται οι δείκτες ESG και με ποιον τρόπο υποστηρίζουν τον στρατηγικό σχεδιασμό και τη βιωσιμότητα των πόλεων;
- Ποιες προσεγγίσεις και πρακτικές αξιοποίησης των ESG δεικτών προκύπτουν από τη βιβλιογραφία ως καταλληλότερες για την ολοκληρωμένη διαχείριση έξυπνων πόλεων;
- Ποιες λειτουργικές προϋποθέσεις μπορούν να εξαχθούν από τα ευρήματα της συστηματικής ανασκόπησης για την ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου που να υποστηρίζει τη στρατηγική βιωσιμότητας μέσω ESG δεικτών;

Τα παραπάνω ερευνητικά ερωτήματα απαντώνται αποκλειστικά μέσω της συστηματικής ανασκόπησης της βιβλιογραφίας και της συνθετικής ανάλυσης των υφιστάμενων μελετών, χωρίς τη χρήση πρωτογενούς εμπειρικής έρευνας. Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη διασφαλίζει τη μεθοδολογική της συνέπεια και εστιάζει στην παραγωγή θεωρητικά τεκμηριωμένων και πρακτικά αξιοποιήσιμων συμπερασμάτων.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Βιωσιμότητα και αστικός μετασχηματισμός

Η έννοια της βιωσιμότητας έχει εξελιχθεί από έναν γενικό κανονιστικό στόχο περιβαλλοντικής προστασίας σε ένα σύνθετο και πολυδιάστατο πλαίσιο που περιλαμβάνει περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές διαστάσεις. Στον πυρήνα της, η βιωσιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα των κοινωνικών συστημάτων να καλύπτουν τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να υπονομεύουν τις δυνατότητες των μελλοντικών γενεών. Η μεταφορά αυτής της έννοιας στον αστικό χώρο συνοδεύτηκε από τη σταδιακή αναγνώριση των πόλεων ως βασικών πεδίων παρέμβασης, δεδομένου ότι συγκεντρώνουν πληθυσμό, οικονομική δραστηριότητα και κατανάλωση πόρων σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα (McCormick et al., 2013).

Η μετάβαση της βιωσιμότητας από θεωρητικό στόχο σε πρακτική αστικής πολιτικής οδήγησε στην ανάπτυξη της έννοιας του αστικού μετασχηματισμού. Ο αστικός μετασχηματισμός δεν αφορά αποσπασματικές παρεμβάσεις ή τεχνικές βελτιώσεις, αλλά βαθιές, συστημικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις σχεδιάζονται, λειτουργούν και διακυβερνώνται. Η βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι οι μετασχηματισμοί αυτοί είναι μακροχρόνιοι, πολυεπίπεδοι και εμπλέκουν ένα ευρύ φάσμα δρώντων, από θεσμούς και επιχειρήσεις έως πολίτες και τοπικές κοινότητες (Ernst et al., 2016).

Οι πόλεις λειτουργούν ως κύριοι κόμβοι περιβαλλοντικών πιέσεων, καθώς συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της κατανάλωσης ενέργειας και της παραγωγής αποβλήτων. Η αστική μορφή, οι μεταφορές, οι ενεργειακές υποδομές και τα κτιριακά αποθέματα συμβάλλουν καθοριστικά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα των πόλεων. Η ανάγκη περιορισμού αυτών των πιέσεων καθιστά τον αστικό μετασχηματισμό κεντρικό μοχλό για την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων σε εθνικό και διεθνές επίπεδο (Mendizabal et al., 2018).

Παράλληλα, οι πόλεις αποτελούν πεδία έντονων κοινωνικών ανισοτήτων, οι οποίες συχνά επιτείνονται στο πλαίσιο της αστικής ανάπτυξης. Ζητήματα όπως η πρόσβαση σε ποιοτική στέγαση, οι ανισότητες στην υγεία, η κοινωνική ευαλωτότητα και ο αποκλεισμός συγκεκριμένων ομάδων συνδέονται άμεσα με τον τρόπο οργάνωσης και διαχείρισης του αστικού χώρου. Ο αστικός μετασχηματισμός προς τη βιωσιμότητα προϋποθέτει, επομένως, την ενσωμάτωση κοινωνικών διαστάσεων και την αντιμετώπιση των ανισοτήτων ως αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας αλλαγής (Crane et al., 2021).

Οι πόλεις διαδραματίζουν καίριο ρόλο στον οικονομικό μετασχηματισμό, καθώς αποτελούν κέντρα καινοτομίας, παραγωγής και επενδύσεων. Η μετάβαση προς πιο βιώσιμα οικονομικά μοντέλα συνδέεται με την ανάπτυξη νέων μορφών επιχειρηματικότητας, την προώθηση της πράσινης οικονομίας και τη δημιουργία θέσεων εργασίας που ευθυγραμμίζονται με περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς στόχους. Στο πλαίσιο αυτό, ο αστικός μετασχηματισμός συνδέεται στενά με την αναδιάρθρωση των τοπικών οικονομιών και τη μετάβαση σε πιο ανθεκτικά και συμπεριληπτικά οικονομικά συστήματα (Haase et al., 2017).

Η διεθνής βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι ο αστικός μετασχηματισμός προς τη βιωσιμότητα δεν ακολουθεί μια ενιαία, γραμμική πορεία, αλλά διαμορφώνεται μέσα από διαφορετικά αφηγήματα και πλαίσια κατανόησης. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται και «πλαισιώνεται» η βιωσιμότητα επηρεάζει καθοριστικά τις πολιτικές επιλογές και τις προτεραιότητες δράσης. Διαφορετικές προσεγγίσεις δίνουν έμφαση είτε στην τεχνολογική καινοτομία, είτε στην κοινωνική αλλαγή, είτε στη θεσμική αναδιάρθρωση, αναδεικνύοντας την πολυπλοκότητα των αστικών μετασχηματισμών (Iwaniec et al., 2019).

Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη σημασία αποκτούν οι συμμετοχικές και πειραματικές προσεγγίσεις στον αστικό σχεδιασμό, οι οποίες στοχεύουν στη συν-δημιουργία λύσεων με τη συμμετοχή πολλαπλών εμπλεκόμενων μερών. Πρωτοβουλίες όπως τα Urban Transition Labs αναδεικνύονται ως χώροι πειραματισμού, όπου δοκιμάζονται νέες πρακτικές και πολιτικές που μπορούν να οδηγήσουν σε μετασχηματιστικές αλλαγές. Οι προσεγγίσεις αυτές υπογραμμίζουν τη σημασία της κοινωνικής μάθησης και της συλλογικής δράσης στη διαδικασία αστικού μετασχηματισμού (Nevens et al., 2013).

Η σύνδεση του αστικού μετασχηματισμού με μακρο-πλαίσια πολιτικής, όπως η βιώσιμη ανάπτυξη και οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs), ενισχύει περαιτέρω τη στρατηγική σημασία των πόλεων. Οι πόλεις καλούνται να λειτουργήσουν ως βασικοί φορείς υλοποίησης παγκόσμιων

στόχων σε τοπικό επίπεδο, μεταφράζοντας γενικές αρχές σε συγκεκριμένες πολιτικές και παρεμβάσεις. Η επίτευξη των SDGs προϋποθέτει συντονισμένες δράσεις σε πολλαπλά επίπεδα διακυβέρνησης, με τις πόλεις να διαδραματίζουν κομβικό ρόλο στην εφαρμογή τους (Grainger-Brown et al., 2022).

Παράλληλα, η έννοια της ανθεκτικότητας (resilience) ενσωματώνεται ολοένα και περισσότερο στη συζήτηση για τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Η ανθεκτικότητα αναφέρεται στην ικανότητα των πόλεων να απορροφούν, να προσαρμόζονται και να ανακάμπτουν από κρίσεις, είτε αυτές σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, είτε με οικονομικές ή κοινωνικές αναταράξεις. Ο αστικός μετασχηματισμός προς τη βιωσιμότητα δεν αποσκοπεί μόνο στη μείωση των επιπτώσεων, αλλά και στην ενίσχυση της προσαρμοστικής ικανότητας των αστικών συστημάτων (Mendizabal et al., 2018).

Η πράσινη μετάβαση αποτελεί ένα ακόμη κρίσιμο μακρο-πλαίσιο που διαμορφώνει τις σύγχρονες στρατηγικές αστικού μετασχηματισμού. Η μετάβαση αυτή περιλαμβάνει την απανθρακοποίηση των ενεργειακών συστημάτων, την προώθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον αστικό ιστό. Οι πόλεις λειτουργούν ως πιλοτικά πεδία για την εφαρμογή πράσινων τεχνολογιών και πολιτικών, συνδέοντας τον αστικό μετασχηματισμό με ευρύτερους στόχους κλιματικής ουδετερότητας (Ibrahim et al., 2018).

Τέλος, η σύγχρονη βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι ο αστικός μετασχηματισμός προς τη βιωσιμότητα απαιτεί συστηματική προσέγγιση και ολιστικό σχεδιασμό. Η ενσωμάτωση τεχνολογικών, κοινωνικών και θεσμικών παραμέτρων σε ένα ενιαίο πλαίσιο καθίσταται αναγκαία για την αντιμετώπιση των σύνθετων προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι πόλεις. Η βιωσιμότητα δεν μπορεί να επιτευχθεί μέσω μεμονωμένων παρεμβάσεων, αλλά μέσα από συντονισμένες και μακροπρόθεσμες στρατηγικές που λαμβάνουν υπόψη την πολυπλοκότητα των αστικών συστημάτων (Aelenei et al., 2016).

Η βιωσιμότητα και ο αστικός μετασχηματισμός συνιστούν αλληλένδετες έννοιες που καθορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο επαναπροσδιορίζεται ο ρόλος των πόλεων στον 21ο αιώνα. Οι πόλεις, ως κόμβοι περιβαλλοντικών πιέσεων, κοινωνικών ανισοτήτων και οικονομικού μετασχηματισμού, αποτελούν ταυτόχρονα πεδία προβλημάτων και χώρους δυνατοτήτων. Η κατανόηση των δυναμικών του αστικού μετασχηματισμού αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη διαμόρφωση αποτελεσματικών στρατηγικών βιωσιμότητας και για τη σύνδεση των μακρο-πλαισίων πολιτικής με τις πρακτικές εφαρμογές σε τοπικό επίπεδο (Ernst et al., 2016).

2.2 Δείκτες ESG: ορισμοί, διαστάσεις και εφαρμογή στον δημόσιο τομέα

Οι δείκτες Environmental, Social and Governance (ESG) αποτελούν ένα ολοένα και πιο διαδεδομένο πλαίσιο αξιολόγησης της βιωσιμότητας οργανισμών, πολιτικών και δραστηριοτήτων. Αρχικά αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της υπεύθυνης επενδυτικής πρακτικής, με στόχο τη συμπλήρωση των παραδοσιακών χρηματοοικονομικών δεικτών από μη χρηματοοικονομικές διαστάσεις που επηρεάζουν τη μακροπρόθεσμη αξία και ανθεκτικότητα των οργανισμών. Οι δείκτες ESG επιδιώκουν να αποτυπώσουν, με συστηματικό τρόπο, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, τις κοινωνικές επιπτώσεις και την ποιότητα της διακυβέρνησης, προσφέροντας ένα πιο ολιστικό πλαίσιο κατανόησης της βιωσιμότητας (Kocmanová & Dočekalová, 2012).

Η περιβαλλοντική διάσταση (Environmental) των ESG δεικτών αφορά ζητήματα όπως οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η κατανάλωση ενέργειας και φυσικών πόρων, η διαχείριση αποβλήτων και η προστασία της βιοποικιλότητας. Η κοινωνική διάσταση (Social) εστιάζει σε θέματα που σχετίζονται με την κοινωνική ευημερία, όπως οι εργασιακές συνθήκες, η κοινωνική συνοχή, η ισότητα, η υγεία και η ασφάλεια. Τέλος, η διάσταση της διακυβέρνησης (Governance) αφορά τη διαφάνεια, τη λογοδοσία, τη δεοντολογία, τη συμμετοχική λήψη αποφάσεων και τη θεσμική ποιότητα. Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει τη δομημένη ανάλυση της βιωσιμότητας, αλλά ταυτόχρονα αναδεικνύει την αλληλεξάρτηση των τριών διαστάσεων (Domanović, 2022).

Παρότι οι δείκτες ESG σχεδιάστηκαν πρωτίστως για τον ιδιωτικό και εταιρικό τομέα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη μεταφορά και προσαρμογή τους στον δημόσιο τομέα. Δημόσιοι οργανισμοί, κρατικές επιχειρήσεις και τοπικές αρχές καλούνται πλέον να ενσωματώσουν αρχές βιωσιμότητας στη λειτουργία τους, τόσο λόγω θεσμικών απαιτήσεων όσο και λόγω κοινωνικών πιέσεων για μεγαλύτερη διαφάνεια και υπευθυνότητα. Η εφαρμογή των ESG στον δημόσιο τομέα επιχειρεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ πολιτικών

στόχων και μετρήσιμων αποτελεσμάτων, προσφέροντας ένα κοινό λεξιλόγιο αξιολόγησης (Wacławik et al., 2025).

Η μεταφορά των ESG δεικτών στον δημόσιο τομέα δεν συνιστά απλή διαδικασία αντιγραφής των εταιρικών πρακτικών, αλλά απαιτεί ουσιαστική προσαρμογή στο θεσμικό και λειτουργικό πλαίσιο της δημόσιας διοίκησης. Σε αντίθεση με τις ιδιωτικές επιχειρήσεις, οι δημόσιοι οργανισμοί δεν αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση του κέρδους, αλλά στην παροχή δημόσιας αξίας και υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, οι ESG δείκτες στον δημόσιο τομέα αποκτούν διαφορετικό περιεχόμενο, με μεγαλύτερη έμφαση στην κοινωνική διάσταση και στη διακυβέρνηση, καθώς και στη σύνδεση με πολιτικές δημόσιου συμφέροντος (Roy, 2023).

Ιδιαίτερη σημασία στον δημόσιο τομέα αποκτά η διάσταση της διακυβέρνησης, καθώς σχετίζεται άμεσα με τη θεσμική αξιοπιστία, τη νομιμοποίηση των πολιτικών αποφάσεων και την εμπιστοσύνη των πολιτών. Θέματα όπως η ηθική κουλτούρα, η ηγεσία για τη βιωσιμότητα, η διαφάνεια και η λογοδοσία εντάσσονται στον πυρήνα της ESG προσέγγισης για δημόσιους οργανισμούς. Η ποιότητα της διακυβέρνησης επηρεάζει όχι μόνο την αποτελεσματικότητα των πολιτικών, αλλά και τη δυνατότητα υλοποίησης περιβαλλοντικών και κοινωνικών στόχων σε βάθος χρόνου (Zahari et al., 2024).

Παρά τη θεωρητική ελκυστικότητα των ESG δεικτών, η εφαρμογή τους στον δημόσιο τομέα συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις μετρησιμότητας. Πολλές από τις κοινωνικές και διοικητικές παραμέτρους που επιχειρούν να αποτυπώσουν οι ESG δείκτες είναι ποιοτικές, πολυδιάστατες και δύσκολα ποσοτικοποιήσιμες. Η έλλειψη αξιόπιστων και συγκρίσιμων δεδομένων, ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο, περιορίζει τη δυνατότητα συστηματικής αξιολόγησης και παρακολούθησης της επίδοσης των δημόσιων οργανισμών (Domanić, 2022).

Ένα επιπλέον πρόβλημα αφορά την ετερογένεια των προσεγγίσεων ESG στον δημόσιο τομέα. Διαφορετικοί οργανισμοί, τομείς πολιτικής και γεωγραφικά πλαίσια υιοθετούν διαφορετικά σύνολα δεικτών, με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολη η σύγκριση και η σύνθεση των αποτελεσμάτων. Η ετερογένεια αυτή αντανάκλα τόσο τις διαφορετικές θεσμικές δομές όσο και τις ποικίλες προτεραιότητες πολιτικής, αλλά ταυτόχρονα περιορίζει την ανάπτυξη κοινών προτύπων και βέλτιστων πρακτικών (Wacławik et al., 2025).

Στο επίπεδο των πόλεων, τα ζητήματα ετερογένειας και μετρησιμότητας γίνονται ακόμη πιο έντονα. Οι πόλεις διαφέρουν σημαντικά ως προς το μέγεθος, τη διοικητική τους οργάνωση, τις οικονομικές τους δυνατότητες και τα περιβαλλοντικά τους χαρακτηριστικά. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή ενιαίων ESG δεικτών συναντά δυσκολίες, ενώ συχνά παρατηρείται η ανάπτυξη τοπικά προσαρμοσμένων κριτηρίων που δεν είναι εύκολα συγκρίσιμα. Η έλλειψη τυποποιημένων πλαισίων αξιολόγησης δυσχεραίνει την αποτύπωση της συνολικής εικόνας της αστικής βιωσιμότητας (Battisti, 2023).

Η απουσία τυποποίησης στους ESG δείκτες των πόλεων συνδέεται και με τη διαφοροποίηση των πρακτικών αναφοράς και γνωστοποίησης. Ενώ σε ορισμένους τομείς, όπως οι δημόσιες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, παρατηρείται μεγαλύτερη ωριμότητα σε θέματα βιωσιμότητας και ESG reporting, σε άλλους τομείς η καταγραφή παραμένει αποσπασματική. Η ανομοιογένεια αυτή δημιουργεί κενά πληροφόρησης και περιορίζει τη δυνατότητα στρατηγικής αξιοποίησης των ESG δεδομένων σε επίπεδο πολιτικής (Imperiale et al., 2023).

Τέλος, η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η εφαρμογή των ESG δεικτών στον δημόσιο τομέα και ειδικότερα στις πόλεις βρίσκεται ακόμη σε μεταβατικό στάδιο. Παρότι αναγνωρίζεται η δυναμική τους ως εργαλείων εννοιολογικής χαρτογράφησης και στρατηγικού προσανατολισμού, δεν υπάρχει ακόμη καθολικά αποδεκτό πλαίσιο που να συνδυάζει αποτελεσματικά τη μετρησιμότητα, τη συγκρισιμότητα και τη λειτουργική χρησιμότητα. Στο παρόν στάδιο, η ESG προσέγγιση λειτουργεί κυρίως ως εννοιολογικό εργαλείο κατανόησης της βιωσιμότητας στον δημόσιο τομέα, προετοιμάζοντας το έδαφος για πιο ολοκληρωμένες εφαρμογές στο μέλλον (Jaiwani & Gopalkrishnan, 2025).

Οι δείκτες ESG προσφέρουν ένα ισχυρό αλλά ακόμη εξελισσόμενο πλαίσιο για την κατανόηση και την αποτύπωση της βιωσιμότητας στον δημόσιο τομέα και στις πόλεις. Η εννοιολογική χαρτογράφηση των διαστάσεων, των δυνατοτήτων και των περιορισμών τους αποτελεί αναγκαίο βήμα πριν από οποιαδήποτε αξιολογητική ή εφαρμοσμένη προσέγγιση, ιδίως στο σύνθετο και πολυεπίπεδο περιβάλλον των σύγχρονων αστικών συστημάτων.

2.3 Έξυπνες πόλεις και στρατηγικές βιωσιμότητας

Η έννοια της έξυπνης πόλης (smart city) έχει υποστεί σημαντική εξέλιξη τις τελευταίες δύο δεκαετίες, ακολουθώντας μια πορεία που αντανάκλα τις μεταβαλλόμενες προτεραιότητες του αστικού σχεδιασμού και της δημόσιας πολιτικής. Στα αρχικά στάδια, ο όρος smart city συνδέθηκε κυρίως με την ενσωμάτωση τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ICT) στις αστικές υποδομές, με έμφαση στη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας, της ταχύτητας και της λειτουργικότητας των πόλεων. Η τεχνολογία αντιμετωπιζόταν ως αυτοσκοπός, με την «έξυπνη» πόλη να ταυτίζεται με την ψηφιοποίηση των αστικών λειτουργιών και τη χρήση αισθητήρων, δικτύων και αυτοματισμών (Buallay et al., 2021).

Σταδιακά, η βιβλιογραφία άρχισε να ασκεί κριτική σε αυτή τη στενά τεχνοκεντρική προσέγγιση, επισημαίνοντας ότι η τεχνολογία από μόνη της δεν αρκεί για την αντιμετώπιση των σύνθετων προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι πόλεις. Η έννοια της έξυπνης πόλης επαναπροσδιορίστηκε ώστε να ενσωματώνει στόχους βιωσιμότητας, περιβαλλοντικής προστασίας και κοινωνικής ευημερίας. Έτσι, η smart city προσέγγιση άρχισε να συνδέεται με την πράσινη ανάπτυξη, την αποδοτική χρήση πόρων και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, μεταβαίνοντας από την απλή τεχνολογική καινοτομία σε ένα ευρύτερο όραμα βιώσιμης αστικής ανάπτυξης (Bonab et al., 2023).

Σε αυτό το εξελικτικό πλαίσιο, η έξυπνη πόλη αναγνωρίζεται πλέον ως ένα σύνθετο κοινωνικο-τεχνικό σύστημα, στο οποίο η τεχνολογία λειτουργεί ως μέσο για την επίτευξη ευρύτερων στρατηγικών στόχων. Η σύγχρονη προσέγγιση των έξυπνων πόλεων δίνει έμφαση στη διακυβέρνηση, στη συμμετοχή των πολιτών και στη διαφάνεια, αναδεικνύοντας τη σημασία της θεσμικής διάστασης. Η smart city δεν αφορά μόνο την «έξυπνη» διαχείριση υποδομών, αλλά και τη βελτίωση της ποιότητας λήψης αποφάσεων και της λογοδοσίας των δημόσιων φορέων (Sklavos et al., 2025).

Κεντρικό στοιχείο των σύγχρονων έξυπνων πόλεων αποτελεί η ικανότητά τους να λειτουργούν ως μηχανισμοί συλλογής, επεξεργασίας και αξιοποίησης δεδομένων. Μέσω αισθητήρων, πλατφορμών IoT και συστημάτων πληροφορικής, οι πόλεις παράγουν μεγάλους όγκους δεδομένων που αφορούν την κυκλοφορία, την κατανάλωση ενέργειας, τις εκπομπές ρύπων και τη λειτουργία κρίσιμων υποδομών. Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν την παρακολούθηση της αστικής δραστηριότητας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο και δημιουργούν νέες δυνατότητες για την ανάλυση και πρόβλεψη περιβαλλοντικών και λειτουργικών κινδύνων (Okojie et al., 2023).

Η λειτουργία των έξυπνων πόλεων ως κόμβων δεδομένων συνδέεται άμεσα με τη στρατηγική βιωσιμότητας και τη δυνατότητα εφαρμογής των δεικτών ESG. Οι ESG δείκτες απαιτούν αξιόπιστα, συστηματικά και επικαιροποιημένα δεδομένα προκειμένου να αποτυπώσουν με ακρίβεια την περιβαλλοντική, κοινωνική και διοικητική επίδοση. Οι έξυπνες πόλεις, μέσω των ψηφιακών τους υποδομών, μπορούν να υποστηρίξουν τη συλλογή και ενοποίηση αυτών των δεδομένων, μετατρέποντας τη βιωσιμότητα από αφηρημένο στόχο σε μετρήσιμη και διαχειρίσιμη διαδικασία (Gu et al., 2024).

Πέρα από τη συλλογή δεδομένων, οι έξυπνες πόλεις λειτουργούν και ως πλατφόρμες εφαρμογής δημόσιων πολιτικών, συμπεριλαμβανομένων των στρατηγικών που βασίζονται σε ESG στόχους. Οι ψηφιακές πλατφόρμες διακυβέρνησης, τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων και τα εργαλεία παρακολούθησης επιτρέπουν την ενσωμάτωση των ESG δεικτών στον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την αξιολόγηση αστικών πολιτικών. Με αυτόν τον τρόπο, οι smart city στρατηγικές μετασχηματίζονται σε μηχανισμούς επιχειρησιακής εφαρμογής της βιωσιμότητας (Dovolil & Svítek, 2024).

Η σύνδεση των έξυπνων πόλεων με τους ESG στόχους καθίσταται ιδιαίτερα εμφανής σε τομείς όπως οι μεταφορές, η εφοδιαστική αλυσίδα και οι αστικές υποδομές. Η χρήση ψηφιακών εργαλείων για τη βελτιστοποίηση της κυκλοφορίας, τη μείωση των εκπομπών και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας ευθυγραμμίζεται άμεσα με την περιβαλλοντική διάσταση των ESG. Παράλληλα, οι κοινωνικές και διοικητικές διαστάσεις υποστηρίζονται μέσω πολιτικών προσβασιμότητας, συμμετοχικής διακυβέρνησης και διαφάνειας (Barykin et al., 2023).

Σε επίπεδο πολιτικής, οι στρατηγικές έξυπνων πόλεων αναγνωρίζονται ως μοχλοί ενίσχυσης της ESG επίδοσης όχι μόνο των δημόσιων φορέων, αλλά και των επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται εντός του αστικού χώρου. Η βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι οι πολιτικές smart city μπορούν να επηρεάσουν θετικά τη συμπεριφορά των επιχειρήσεων, ενθαρρύνοντας την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών και τη βελτίωση της ESG απόδοσής τους. Οι πόλεις, ως

ρυθμιστικά και θεσμικά περιβάλλοντα, διαμορφώνουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύσσονται οι εταιρικές στρατηγικές βιωσιμότητας (Zhou et al., 2025).

Παράλληλα, η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι οι έξυπνες πόλεις μπορούν να λειτουργήσουν ως πιλοτικά πεδία για την ανάπτυξη και δοκιμή νέων προσεγγίσεων ESG. Συγκριτικές μελέτες μεταξύ διαφορετικών πόλεων και αστικών αναπτυξιακών μοντέλων αναδεικνύουν τον ρόλο της smart city στρατηγικής στη δημιουργία ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος μέσω της βιωσιμότητας. Η ενσωμάτωση ESG αρχών στη διαχείριση των έξυπνων πόλεων συμβάλλει όχι μόνο στην περιβαλλοντική και κοινωνική επίδοση, αλλά και στη μακροπρόθεσμη οικονομική ανθεκτικότητα (Elhag & Elhag, 2024).

Ωστόσο, η σύνδεση smart city στρατηγικών και ESG στόχων δεν είναι αυτονόητη ούτε ομοιόμορφη. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι σε πολλές περιπτώσεις οι στρατηγικές έξυπνων πόλεων παραμένουν αποσπασματικές, με έμφαση σε μεμονωμένες τεχνολογικές εφαρμογές χωρίς σαφή ενσωμάτωση σε ένα συνεκτικό πλαίσιο βιωσιμότητας. Η απουσία κοινών προτύπων και δεικτών αξιολόγησης περιορίζει τη δυνατότητα συστηματικής σύγκρισης και αποτίμησης της ESG επίδοσης των πόλεων (Chong et al., 2022).

Στο πλαίσιο αυτό, η σύγχρονη βιβλιογραφία υπογραμμίζει την ανάγκη μετάβασης από την «έξυπνη πόλη ως τεχνολογικό έργο» στην «έξυπνη πόλη ως στρατηγική διακυβέρνησης βιωσιμότητας». Η ενσωμάτωση των ESG στόχων στις smart city στρατηγικές απαιτεί συντονισμό μεταξύ τεχνολογίας, πολιτικής και θεσμών, καθώς και τη συστηματική αξιοποίηση δεδομένων για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Οι έξυπνες πόλεις μπορούν να αποτελέσουν τον συνδετικό κρίκο μεταξύ ψηφιακού μετασχηματισμού και βιώσιμης ανάπτυξης, εφόσον οι στρατηγικές τους σχεδιαστούν με ολιστικό και μακροπρόθεσμο τρόπο (Gu et al., 2024).

Η έννοια της έξυπνης πόλης έχει εξελιχθεί από μια τεχνολογικά προσανατολισμένη προσέγγιση σε ένα πολυδιάστατο πλαίσιο που ενσωματώνει στόχους βιωσιμότητας και διακυβέρνησης. Οι έξυπνες πόλεις λειτουργούν τόσο ως μηχανισμοί συλλογής δεδομένων όσο και ως πλατφόρμες εφαρμογής ESG πολιτικών, συνδέοντας ρητά τις smart city στρατηγικές με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης. Η κατανόηση αυτής της εξέλιξης αποτελεί κρίσιμο υπόβαθρο για την περαιτέρω ανάλυση του ρόλου των ESG δεικτών στον στρατηγικό σχεδιασμό των σύγχρονων πόλεων.

2.4 Ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins) ως εργαλεία βιώσιμου αστικού σχεδιασμού

Ο σύγχρονος βιώσιμος αστικός σχεδιασμός αξιοποιεί ένα ευρύ φάσμα εργαλείων και μεθοδολογικών προσεγγίσεων, τα οποία διαμορφώθηκαν σταδιακά ανταποκρινόμενα στην αυξανόμενη πολυπλοκότητα των αστικών συστημάτων και στις ανάγκες ολιστικής διαχείρισής τους. Η εξέλιξη αυτή δεν ακολούθησε γραμμική πορεία, αλλά χαρακτηρίζεται από συνεχή εμπλουτισμό της εργαλειοθήκης του αστικού σχεδιαστή: από τα παραδοσιακά γεωχωρικά συστήματα πληροφοριών, μέσω των πλατφορμών ψηφιακής μοντελοποίησης κτιρίων και υποδομών, προς τα σύγχρονα εργαλεία ανοικτών δεδομένων, συμμετοχικού σχεδιασμού και, τελικά, στα δυναμικά ψηφιακά δίδυμα αστικής κλίμακας. Κάθε γενιά εργαλείων δεν αντικατέστησε την προηγούμενη αλλά τη συμπλήρωσε, δημιουργώντας ένα στρωματοποιημένο τεχνολογικό οικοσύστημα στην υπηρεσία της βιώσιμης ανάπτυξης.

2.4.1 Γεωχωρικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) και Χωρική Ανάλυση

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) αποτελούν έναν από τους θεμελιώδεις πυλώνες του σύγχρονου αστικού σχεδιασμού. Η ικανότητά τους να ενοποιούν, αναλύουν και οπτικοποιούν χωρικά δεδομένα τα καθιστά αναπαραστάσιμα εργαλεία για την κατανόηση της γεωγραφικής διάστασης της αστικής βιωσιμότητας. Στο πλαίσιο των ESG δεικτών, τα GIS επιτρέπουν τη χαρτογράφηση χωρικών ανισοτήτων, τον εντοπισμό περιοχών περιβαλλοντικής τραγωδίας και την αποτύπωση της γεωγραφικής κατανομής κοινωνικών υπηρεσιών. Οι Shirowzhan et al. (2020) αναδεικνύουν τη συνδυαστική αξία GIS και ψηφιακών διδύμων για τη μέτρηση της επίδρασης κατασκευής υποδομών σε έξυπνες πόλεις, αποδεικνύοντας ότι η γεωχωρική ανάλυση παραμένει απαραίτητο στοιχείο ακόμη και στις πλέον σύγχρονες ψηφιακές εφαρμογές.

Η χωρική διάσταση των ESG δεικτών, δηλαδή η κατανόηση του πού και σε ποιους κατανέμονται τα οφέλη και οι επιβαρύνσεις της αστικής ανάπτυξης, αποτελεί κρίσιμη παράμετρο που μόνο τα GIS εργαλεία μπορούν να αποτυπώσουν πλήρως. Οι Räsänen et al. (2019) χρησιμοποιούν γεωχωρική ανάλυση για τη χαρτογράφηση τρωτότητας σε φαινόμενα θερμικής νησίδας στη Helsinki, αναδεικνύοντας πώς οι χωρικές ανισότητες στην περιβαλλοντική έκθεση δεν αποτυπώνονται από τους μέσους αστικούς δείκτες. Η εφαρμογή GIS στο πλαίσιο ESG αξιολόγησης επιτρέπει επομένως μια χωρικά διαφοροποιημένη ανάλυση που υπερβαίνει τα όρια των συνολικών δεικτών σε επίπεδο πόλης.

2.4.2 Building Information Modelling (BIM) και Ολοκλήρωση Υποδομών

Το Building Information Modelling (BIM) αντιπροσωπεύει μια ριζική μεταβολή στον τρόπο σχεδιασμού, κατασκευής και διαχείρισης κτιρίων και υποδομών. Ως πλαίσιο ψηφιακής μοντελοποίησης που ενσωματώνει γεωμετρικές, υλικές και λειτουργικές πληροφορίες σε ένα ενιαίο μοντέλο, το BIM επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, τη μείωση αποβλήτων κατασκευής και την καλύτερη διαχείριση κύκλου ζωής υποδομών, στοιχεία άμεσα σχετικά με την Environmental ESG διάσταση. Οι Wu et al. (2025) τεκμηριώνουν πώς η ολοκλήρωση GIS, BIM και IoT σε ενιαία πλατφόρμα επιτρέπει την οπτικοποίηση ESG επιδόσεων για τον στρατηγικό αστικό σχεδιασμό, αναδεικνύοντας το BIM ως το ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ της χωρικής ανάλυσης και της δυναμικής παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο.

Η σύνδεση BIM με ESG στόχους αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο του European Green Deal και των φιλόδοξων στόχων ενεργειακής αναβάθμισης του κτιριακού αποθέματος. Οι Caprari et al. (2022) αναδεικνύουν ότι η χρήση ψηφιακών εργαλείων μοντελοποίησης, συμπεριλαμβανομένου του BIM, στο πλαίσιο του αστικού σχεδιασμού της Πράσινης Συμφωνίας απαιτεί υψηλής ποιότητας, διαλειτουργικά δεδομένα, μια προϋπόθεση που συνδέει άμεσα την τεχνολογική επάρκεια με την ποιότητα της αστικής ESG αξιολόγησης.

2.4.3 Πλατφόρμες Ανοικτών Δεδομένων και Αστική Διαφάνεια

Η ανάδυση πλατφορμών ανοικτών αστικών δεδομένων αποτελεί έναν από τους πλέον σημαντικούς μετασχηματισμούς στον σύγχρονο αστικό σχεδιασμό, καθώς δημιουργεί τις υποδομές πληροφόρησης που επιτρέπουν τη μετρήσιμη και διαφανή αξιολόγηση της αστικής βιωσιμότητας. Οι Jaakola et al. (2015), σε εμβληματική μελέτη για την πλατφόρμα Helsinki Region Infoshare (HRI), τεκμηριώνουν πώς η συστηματική διάθεση ανοικτών αστικών δεδομένων δημιουργεί μια κρίσιμη υποδομή γνώσης για ερευνητές, σχεδιαστές πολιτικής και πολίτες. Η πλατφόρμα HRI, ως παράδειγμα βέλτιστης πρακτικής, αποδεικνύει ότι τα ανοικτά δεδομένα δεν αποτελούν απλώς τεχνικό εργαλείο αλλά πολιτική επιλογή με άμεσες επιπτώσεις στη Governance ESG διάσταση.

Η σχέση ανοικτών δεδομένων και ESG αξιολόγησης είναι αμφίδρομη: τα ανοικτά δεδομένα τροφοδοτούν τους ESG δείκτες, αλλά ταυτόχρονα η δημοσίευση ESG δεδομένων αποτελεί από μόνη της μέτρο ποιότητας διακυβέρνησης. Οι Ala-Mantila et al. (2023) αξιοποιούν ανοικτά δεδομένα για τη μέτρηση βιώσιμης αστικής ανάπτυξης σε επίπεδο γειτονιάς στις φινλανδικές πόλεις, αναδεικνύοντας ότι η διαθεσιμότητα λεπτομερών, γεωγραφικά διαβαθμισμένων δεδομένων αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για την παραγωγή ESG αξιολογήσεων που να αντικατοπτρίζουν την πραγματική αστική πολυπλοκότητα.

2.4.4 Εργαλεία Συμμετοχικού Σχεδιασμού και Ψηφιακής Δημοκρατίας

Η συμμετοχή των πολιτών στον αστικό σχεδιασμό αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο της Governance ESG διάστασης και εξελίσσεται σημαντικά μέσα από ψηφιακά εργαλεία συν-δημιουργίας. Ψηφιακές πλατφόρμες συμμετοχικού σχεδιασμού, e-democracy εφαρμογές και συμμετοχικοί προϋπολογισμοί επιτρέπουν την εμπλοκή ευρύτερων κοινωνικών ομάδων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τον αστικό χώρο. Οι Tartia και Hämäläinen (2024) παρουσιάζουν πώς διαδικασίες συν-δημιουργίας με αξιοποίηση ψηφιακών πλατφορμών στη μητροπολιτική περιοχή Helsinki δημιουργούν ανθρωποκεντρικά ψηφιακά εργαλεία αστικής ανάπτυξης, αναδεικνύοντας ότι η τεχνολογία μόνο τότε αποδίδει κοινωνική αξία όταν σχεδιάζεται με και για τους πολίτες.

Η σύνδεση εργαλείων συμμετοχικού σχεδιασμού με τους ESG στόχους αποτελεί ένα από τα πλέον υποσχόμενα πεδία ανάπτυξης. Οι Berigüete et al. (2024) τεκμηριώνουν πώς αναδυόμενες ψηφιακές τεχνολογίες, από chatbots έως immersive visualisation εφαρμογές, ενισχύουν τη συμμετοχή πολιτών σε αστική περιβαλλοντική διαχείριση, δημιουργώντας νέα κανάλια ανατροφοδότησης μεταξύ αστικής διοίκησης και κοινωνίας. Η παρατήρηση αυτή αναδεικνύει ότι τα εργαλεία συμμετοχικού σχεδιασμού δεν αποτελούν απλώς «κοινωνική αποδοχή» τεχνολογικών έργων, αλλά ουσιαστικό μέρος της διακυβερνητικής διάστασης της βιωσιμότητας.

2.4.5 Πλατφόρμες IoT και Δίκτυα Αισθητήρων

Τα δίκτυα αισθητήρων και οι πλατφόρμες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) αποτελούν τη φυσική υποδομή που επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από το αστικό περιβάλλον. Η ικανότητα παρακολούθησης της ποιότητας αέρα, της κατανάλωσης ενέργειας, της κυκλοφορίας και της ποιότητας υδάτων σε συνεχή βάση μετασχηματίζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις κατανοούν και διαχειρίζονται τα περιβαλλοντικά τους συστήματα. Οι Alourani et al. (2025) αναπτύσσουν υβριδικό AI-IoT framework για προβλεπτική διαχείριση αστικής υποδομής, αναδεικνύοντας ότι η συνδυαστική χρήση τεχνητής νοημοσύνης και IoT δεδομένων επιτρέπει τη μετάβαση από αντιδραστική σε προβλεπτική διαχείριση αστικών συστημάτων.

Τα IoT δεδομένα αποτελούν το «αίμα» που τροφοδοτεί τόσο τα GIS και BIM εργαλεία όσο και, κυρίως, τα ψηφιακά δίδυμα. Οι Faliagka et al. (2024) αναλύουν τις αρχιτεκτονικές DT framework για έξυπνες πόλεις, τονίζοντας ότι η ενσωμάτωση IoT δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία ενός αστικού DT. Ταυτόχρονα, η ανάπτυξη δικτύων IoT αισθητήρων αποτελεί από μόνη της δείκτη αστικής ψηφιακής ωριμότητας, μια παράμετρος που ενσωματώνεται ως δείκτης στη Governance και Environmental ESG αξιολόγηση.

2.4.6 Τα Ψηφιακά Δίδυμα ως Ολοκληρωτική Πλατφόρμα Σύνθεσης

Τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins) αναδύονται τα τελευταία χρόνια ως ένα από τα πλέον υποσχόμενα εργαλεία για τη διαχείριση της πολυπλοκότητας των σύγχρονων πόλεων. Ο όρος αναφέρεται στη δημιουργία ενός δυναμικού, ψηφιακού αναπαραστατικού μοντέλου ενός φυσικού συστήματος, το οποίο ενημερώνεται συνεχώς μέσω δεδομένων πραγματικού χρόνου και επιτρέπει την παρακολούθηση, ανάλυση και προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων λειτουργίας. Στο αστικό περιβάλλον, τα ψηφιακά δίδυμα λειτουργούν ως ενοποιημένες πλατφόρμες που συνδέουν φυσικές υποδομές, ανθρώπινες δραστηριότητες και ψηφιακά δεδομένα σε ένα συνεκτικό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (Hämäläinen, 2021; Mazzetto, 2024). Σε αυτή τη λογική, τα ψηφιακά δίδυμα δεν αντικαθιστούν τα προηγούμενα εργαλεία, GIS, BIM, IoT, πλατφόρμες ανοικτών δεδομένων, αλλά τα ενοποιούν, λειτουργώντας ως το ανώτερο στρώμα μιας ολοκληρωμένης ψηφιακής αρχιτεκτονικής αστικού σχεδιασμού.

Βασικό χαρακτηριστικό των ψηφιακών διδύμων είναι ο δυναμικός και εξελικτικός τους χαρακτήρας. Σε αντίθεση με τα στατικά μοντέλα ή τις απλές προσομοιώσεις, τα digital twins βασίζονται στη συνεχή ροή δεδομένων από αισθητήρες, συστήματα πληροφορικής και βάσεις δεδομένων, επιτρέποντας την επικαιροποίηση του μοντέλου σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η ιδιότητα αυτή τα καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλα για την υποστήριξη βιώσιμου αστικού σχεδιασμού, καθώς επιτρέπουν την κατανόηση πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ περιβαλλοντικών, κοινωνικών και λειτουργικών παραμέτρων (Weil et al., 2023). Οι Supianto et al. (2024) τεκμηριώνουν ότι ένα αποτελεσματικό αστικό DT framework πρέπει να βασίζεται σε ιεραρχικά επίπεδα αφαίρεσης που επιτρέπουν την αντιστοίχιση ετερογενών δεδομένων, ακριβώς η ιδιότητα που καθιστά τα ψηφιακά δίδυμα τον ιδανικό κόμβο σύνθεσης των υπόλοιπων ψηφιακών εργαλείων.

Στο πλαίσιο των αστικών υποδομών, τα ψηφιακά δίδυμα αξιοποιούνται για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση συστημάτων όπως τα δίκτυα μεταφορών, τα κτίρια και οι δημοτικές εγκαταστάσεις. Μέσω της ενσωμάτωσης δεδομένων χρήσης, φθοράς και απόδοσης, οι πόλεις μπορούν να προσομοιώσουν διαφορετικά σενάρια συντήρησης και ανάπτυξης, μειώνοντας το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η χρήση των digital twins στις υποδομές συμβάλλει στην πρόληψη αστοχιών, στη βελτίωση της ασφάλειας και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των αστικών συστημάτων (Tan & Li, 2024). Παράλληλα, οι Broo et al. (2022)

αποδεικνύουν ότι ένα smart infrastructure DT που ενσωματώνει μηχανισμούς παρακολούθησης απόδοσης παρέχει σαφώς καλύτερη υποστήριξη λήψης αποφάσεων σε σχέση με μεμονωμένα εργαλεία GIS ή BIM.

Στον τομέα της ενέργειας, τα digital twins επιτρέπουν την προσομοίωση της ενεργειακής κατανάλωσης κτιρίων και γειτονιών, τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενεργειακών δικτύων και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι Huang et al. (2022) αποδεικνύουν εμπειρικά ότι τα DT για ολοκληρωμένα περιφερειακά ενεργειακά συστήματα σε έξυπνες πόλεις βελτιστοποιούν σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα, ενώ οι Jafari et al. (2023) επεκτείνουν αυτή την εφαρμογή στο σύνολο του αστικού ενεργειακού και μεταφορικού συστήματος.

Στον περιβαλλοντικό τομέα, τα ψηφιακά δίδυμα λειτουργούν ως εργαλεία παρακολούθησης και διαχείρισης φυσικών πόρων και περιβαλλοντικών κινδύνων. Εφαρμογές που αφορούν την ποιότητα του αέρα, τη διαχείριση υδάτων, τον θόρυβο και τις αστικές θερμικές νησίδες βασίζονται στη σύνθεση δεδομένων από πολλαπλές πηγές. Οι Mabrouk et al. (2025) αναδεικνύουν ότι τα DT πόλεων λειτουργούν ως εργαλεία κλιματικής ανθεκτικότητας μόνο εφόσον ενσωματώνουν δεδομένα κλιματικής πίεσης σε πραγματικό χρόνο, παρατήρηση που αναδεικνύει τη σύνδεση ψηφιακών διδύμων με την Environmental ESG διάσταση.

Πέρα από τις τεχνικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές, τα ψηφιακά δίδυμα αποκτούν αυξανόμενο ρόλο στη διακυβέρνηση των έξυπνων πόλεων. Ως πλατφόρμες ενοποίησης δεδομένων, υποστηρίζουν τη διαφάνεια, τη λογοδοσία και τη συμμετοχική λήψη αποφάσεων. Οι Qanazi et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα υφιστάμενα αστικά DT υπολείπονται σε κοινωνική διάσταση, αναδεικνύοντας ότι ένα ολοκληρωμένο ψηφιακό δίδυμο πρέπει να ενσωματώνει εξίσου ισχυρά τόσο τεχνικές όσο και κοινωνικές παραμέτρους αξιολόγησης.

Η σύγχρονη βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι τα ψηφιακά δίδυμα δεν αποτελούν απλώς τεχνολογικές λύσεις, αλλά εννοιολογικά εργαλεία σύνθεσης και κατανόησης της πολυπλοκότητας των αστικών συστημάτων. Μέσα από τη συνδυαστική ανάλυση δεδομένων από διαφορετικούς τομείς, τα digital twins επιτρέπουν την ολιστική προσέγγιση της βιωσιμότητας, υπερβαίνοντας τον κατακερματισμό που συχνά χαρακτηρίζει τον αστικό σχεδιασμό (Weil et al., 2023). Παρά τις σημαντικές δυνατότητές τους, αντιμετωπίζουν προκλήσεις που σχετίζονται με τη διακυβέρνηση των δεδομένων, τη διαλειτουργικότητα και την οργανωτική ωριμότητα. Ο Traoré (2024) υπογραμμίζει ότι η διαλειτουργικότητα αποτελεί ίσως την κρίσιμότερη πρόκληση για τα αστικά DT, καθώς τα αστικά δεδομένα προέρχονται από πλήθος ανόμοιων πηγών, πρόκληση που αφορά εξίσου και τα υπόλοιπα ψηφιακά εργαλεία αστικού σχεδιασμού.

2.4.7 Συνθετική Αποτίμηση, Η Συμπληρωματικότητα των Εργαλείων

Η επισκόπηση των εργαλείων βιώσιμου αστικού σχεδιασμού αναδεικνύει ότι κανένα μεμονωμένο εργαλείο δεν επαρκεί για την ολιστική διαχείριση της αστικής βιωσιμότητας. Τα GIS παρέχουν τη χωρική διάσταση, το BIM τη δομική μοντελοποίηση, τα ανοικτά δεδομένα την πληροφοριακή υποδομή, τα εργαλεία συμμετοχικού σχεδιασμού τη δημοκρατική νομιμοποίηση, τα IoT δίκτυα την πραγματικού χρόνου παρακολούθηση και τα ψηφιακά δίδυμα την ολοκληρωτική σύνθεση. Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις βασικές λειτουργίες και την ESG συνάφεια κάθε εργαλείου:

Πίνακας 1. Εργαλεία Βιώσιμου Αστικού Σχεδιασμού: Λειτουργίες και ESG Συνάφεια. Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Εργαλείο	Κύρια Λειτουργία	Σχέση με ESG / Βιωσιμότητα
GIS & Γεωχωρικά Εργαλεία	Χωρική ανάλυση και αποτύπωση αστικών δεδομένων	Χαρτογράφηση χωρικών ανισοτήτων ESG, ανάλυση περιβαλλοντικής τρωτότητας
BIM (Building Information Modelling)	Ψηφιακή μοντελοποίηση κτιρίων και υποδομών	Ενεργειακή αποδοτικότητα, μείωση εκπομπών σε κτιριακό επίπεδο
Πλατφόρμες Ανοικτών Δεδομένων	Διαχείριση και διάθεση αστικών δεδομένων	Τροφοδότηση ESG δεικτών, ενίσχυση διαφάνειας (Governance ESG)

Εργαλεία Συμμετοχικού Σχεδιασμού	Συν-δημιουργία πολιτικών με εμπλοκή πολιτών	Ενίσχυση Social & Governance ESG, δημοκρατική νομιμοποίηση
IoT Πλατφόρμες & Αισθητήρες	Συλλογή δεδομένων πραγματικού χρόνου	Παρακολούθηση περιβαλλοντικών δεικτών, ενεργειακή διαχείριση
Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)	Δυναμική προσομοίωση ολόκληρου αστικού συστήματος	Ολιστική σύνθεση και αξιολόγηση ESG σε όλες τις διαστάσεις

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, τα ψηφιακά δίδυμα αναδεικνύονται ως το εργαλείο με τις μεγαλύτερες δυνατότητες για την ολοκληρωμένη ενσωμάτωση ESG δεικτών σε αστικό επίπεδο, ακριβώς επειδή έχουν τη δυνατότητα να ενοποιούν τις εισροές όλων των προηγούμενων εργαλείων σε ένα κοινό αναλυτικό πλαίσιο. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή ενός ESG ψηφιακού δίδυμου προϋποθέτει τη λειτουργική ωριμότητα όλων των υποκείμενων εργαλείων: δίχως αξιόπιστα GIS δεδομένα, ποιοτικά BIM μοντέλα, ανοικτές πλατφόρμες δεδομένων και λειτουργικά IoT δίκτυα, το ψηφιακό δίδυμο παραμένει εννοιολογικό σχήμα χωρίς επιχειρησιακό υπόβαθρο. Η κατανόηση αυτής της αλυσίδας εξαρτήσεων αποτελεί ουσιαστική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό εφαρμόσιμων ESG-DT πλαισίων.

3. Μεθοδολογία

3.1 Σκοπός της Έρευνας

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική χαρτογράφηση και σύνθεση της επιστημονικής βιβλιογραφίας αναφορικά με τη χρήση δεικτών ESG (Environmental, Social, Governance) στο πλαίσιο των στρατηγικών βιωσιμότητας ευρωπαϊκών έξυπνων πόλεων, καθώς και η αξιοποίηση των ευρημάτων για την εννοιολογική ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου (Digital Twin) αστικής βιωσιμότητας. Η έρευνα δεν αποτελεί εμπειρική μελέτη πρωτογενών δεδομένων, αλλά εστιάζει στη συστηματική επεξεργασία υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης με στόχο τη θεωρητική θεμελίωση ενός εννοιολογικού μοντέλου.

Για την επίτευξη του ανωτέρω σκοπού επιλέχθηκε η μεθοδολογία της συστηματικής ανασκόπησης βιβλιογραφίας βάσει του πρωτοκόλλου PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Το PRISMA αποτελεί ένα διεθνώς αναγνωρισμένο και ευρέως εφαρμοζόμενο μεθοδολογικό πρότυπο για τη διεξαγωγή συστηματικών ανασκοπήσεων, το οποίο εξασφαλίζει τη διαφάνεια, την αναπαραγωγιμότητα και την αξιοπιστία της ερευνητικής διαδικασίας (Page et al., 2021).

Η επιλογή του PRISMA έναντι άλλων μεθοδολογικών προσεγγίσεων υπαγορεύεται από ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα που το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας. Καταρχάς, το πρωτόκολλο εξασφαλίζει τη μεθοδολογική συνέπεια μέσω τυποποιημένων βημάτων αναζήτησης, αξιολόγησης και σύνθεσης, περιορίζοντας τον κίνδυνο υποκειμενικής επιλογής μελετών. Επιπλέον, η δομημένη διαδικασία κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού επιτρέπει την αναπαραγωγιμότητα της έρευνας από τρίτους ερευνητές. Τέλος, το PRISMA καθιστά ορατή και ελέγξιμη ολόκληρη τη διαδρομή από την αρχική αναζήτηση έως τα τελικά συμπεράσματα, ενισχύοντας έτσι την εγκυρότητα των ευρημάτων.

Το κεντρικό ερευνητικό ερώτημα της παρούσας εργασίας, που απορρέει άμεσα από τον ανωτέρω σκοπό, διατυπώνεται ως εξής:

- *Ποιοι ESG δείκτες έχουν εντοπιστεί στη διεθνή βιβλιογραφία ως καταλληλότεροι για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας ευρωπαϊκών έξυπνων πόλεων, και με ποιον τρόπο μπορούν να ενσωματωθούν σε ένα εννοιολογικό μοντέλο ψηφιακού διδύμου αστικής βιωσιμότητας;*

Από το κεντρικό ερώτημα απορρέουν τρία επιμέρους ερευνητικά ερωτήματα: (α) Ποιες κατηγορίες ESG δεικτών εμφανίζονται συχνότερα στο πλαίσιο αστικής βιωσιμότητας; (β) Σε ποιους τομείς αστικής λειτουργίας (ενέργεια, μεταφορές, διακυβέρνηση κ.λπ.) εστιάζει κυρίως η σχετική βιβλιογραφία; και (γ) Ποιες είναι οι προϋποθέσεις και τα δομικά χαρακτηριστικά ενός ψηφιακού διδύμου που ενσωματώνει ESG δείκτες σε αστικό επίπεδο.

3.2 Βάσεις Δεδομένων Αναζήτησης

Η αναζήτηση της βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε μέσω τεσσάρων ηλεκτρονικών βάσεων δεδομένων ακαδημαϊκής βιβλιογραφίας, οι οποίες επιλέχθηκαν λόγω της ευρείας κάλυψης της διεπιστημονικής θεματολογίας της παρούσας μελέτης. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν οι πλατφόρμες Google Scholar, Academia.edu, ResearchGate και Scopus. Η Scopus χρησιμοποιήθηκε ως κύρια βάση εξαιτίας της αυστηρής της πολιτικής αξιολόγησης περιοδικών και της δυνατότητας εφαρμογής σύνθετων φίλτρων αναζήτησης, ενώ οι υπόλοιπες τρεις πλατφόρμες αξιοποιήθηκαν συμπληρωματικά για τη διασφάλιση της πληρότητας των αποτελεσμάτων.

3.3 Λέξεις-Κλειδιά και Συνδυασμοί Αναζήτησης

Για τη διεξαγωγή της αναζήτησης χρησιμοποιήθηκαν πέντε συνδυασμοί λέξεων-κλειδιών στην αγγλική γλώσσα, οι οποίοι διαμορφώθηκαν με γνώμονα τους βασικούς θεματικούς άξονες της εργασίας: τα Digital Twins αστικών συστημάτων, τους ESG δείκτες σε αστικό πλαίσιο και τη μοντελοποίηση βιωσιμότητας έξυπνων πόλεων. Οι συνδυασμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

Λέξεις κλειδιά στα ελληνικά:

- Εννοιολογικό πλαίσιο ψηφιακών δίδυμων αστικών συστημάτων
- Παράμετροι ESG για την αξιολόγηση αστικών συστημάτων: περιβαλλοντική, κοινωνική και διακυβερνητική διάσταση
- Υποσυστήματα ψηφιακών δίδυμων αστικής υποδομής: έξυπνη πόλη
- Ενσωμάτωση των παραμέτρων ESG στη βαθμολόγηση αστικών ψηφιακών δίδυμων
- Απαιτήσεις και περιορισμοί στην υλοποίηση ψηφιακών δίδυμων σε αστικό περιβάλλον

Λέξεις κλειδιά στα αγγλικά:

- Digital twin conceptual framework urban systems
- ESG parameters urban measurement environmental social governance
- Digital twin subsystems urban infrastructure smart city
- ESG integration urban digital twin scoring
- Digital twin implementation requirements limitations urban

Οι ανωτέρω συνδυασμοί εφαρμόστηκαν τόσο ως ακριβείς φράσεις (exact match) όσο και με χρήση Boolean τελεστή AND, προκειμένου να διασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή ανάκτηση σχετικής βιβλιογραφίας.

3.4 Κριτήρια Ένταξης και Αποκλεισμού

Για τη διασφάλιση της συνάφειας και ποιότητας των επιλεγόμενων μελετών, ορίστηκαν εκ των προτέρων σαφή κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού, τα οποία εφαρμόστηκαν με συνέπεια καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας επιλογής.

Κριτήρια Ένταξης

- Μελέτες δημοσιευμένες από το 2019 έως και το 2026, ώστε να καλύπτεται η πλέον επίκαιρη βιβλιογραφία στους ταχύτατα εξελισσόμενους τομείς των Digital Twins και των ESG δεικτών.
- Μελέτες συγγραφής στην αγγλική ή ελληνική γλώσσα.
- Δημοσιευμένες εργασίες σε επιστημονικά περιοδικά με σύστημα αξιολόγησης από ομοτίμους (peer-reviewed), καθώς και πρακτικά επιστημονικών συνεδρίων και κεφάλαια σε ακαδημαϊκούς τόμους.
- Μελέτες που πραγματεύονται τουλάχιστον έναν από τους βασικούς θεματικούς άξονες: Digital Twin αστικών συστημάτων, ESG δείκτες σε αστικό ή δημόσιο πλαίσιο, βιωσιμότητα έξυπνων πόλεων.
- Μελέτες με σαφή ερευνητική μεθοδολογία και τεκμηριωμένα αποτελέσματα ή εννοιολογικά πλαίσια.

Κριτήρια Αποκλεισμού

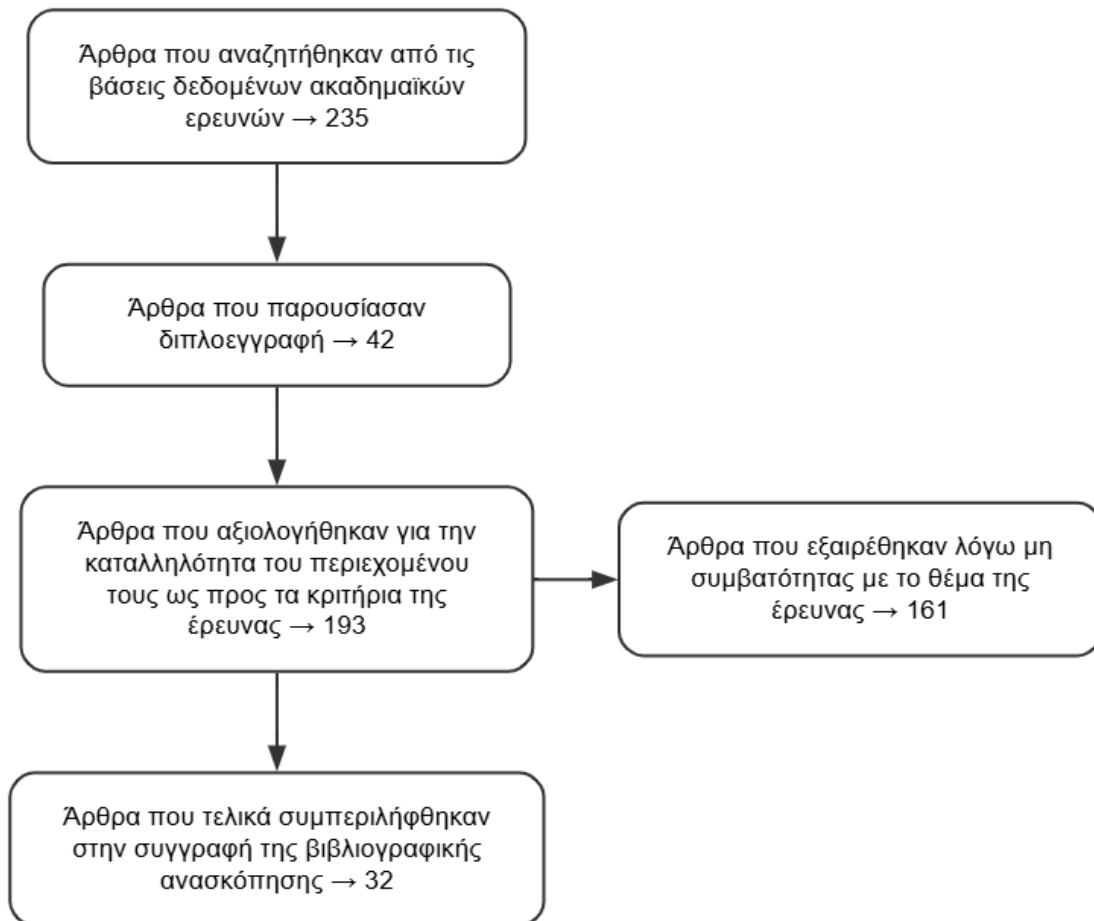
- Μελέτες δημοσιευμένες πριν από το 2019.
- Γκρίζα βιβλιογραφία (εκθέσεις οργανισμών, μη επιστημονικά άρθρα, blog posts) χωρίς ακαδημαϊκή αξιολόγηση.
- Μελέτες που εστιάζουν αποκλειστικά σε κλίμακα κτιρίου ή μεμονωμένης υποδομής, χωρίς αστική ή διαπεριφερειακή διάσταση.
- Μελέτες που αφορούν ESG δείκτες αποκλειστικά σε εταιρικό ή χρηματοοικονομικό πλαίσιο, χωρίς σχέση με αστικό σχεδιασμό ή δημόσιο τομέα.
- Διπλότυπες εγγραφές που εντοπίστηκαν σε περισσότερες από μία βάσεις δεδομένων.

3.5 Διαδικασία Επιλογής Μελετών

Η διαδικασία επιλογής των μελετών ακολούθησε τα τυποποιημένα στάδια του πρωτοκόλλου PRISMA, διαρθρωμένα σε τρεις διαδοχικές φάσεις αξιολόγησης. Κατά το πρώτο στάδιο (αρχική αναζήτηση), εντοπίστηκαν συνολικά 235 μελέτες μέσω των τεσσάρων βάσεων δεδομένων με βάση τους ανωτέρω συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών. Από αυτές, 42 εγγραφές εντοπίστηκαν ως διπλότυπες -καθώς οι ίδιες μελέτες εμφανίστηκαν σε περισσότερες από μία βάσεις- και απομακρύνθηκαν από το σώμα αναζήτησης, αφήνοντας 193 μοναδικές μελέτες για περαιτέρω αξιολόγηση.

Κατά το δεύτερο στάδιο (διαλογή βάσει τίτλου και περίληψης), αξιολογήθηκε η θεματική συνάφεια κάθε μελέτης με τους σκοπούς της έρευνας. Μελέτες που δεν πληρούσαν τα κριτήρια ένταξης ή εμπίπτουν στα κριτήρια αποκλεισμού -όπως εργασίες αποκλειστικά εταιρικής εστίασης, μελέτες σε κλίμακα κτιρίου ή γκρίζα βιβλιογραφία- αποκλείστηκαν συστηματικά. Συνολικά αποκλείστηκαν 161 μελέτες κατά αυτή τη φάση, εξ αυτών 34 λόγω αναντιστοιχίας θεματολογίας, 71 λόγω εστίασης εκτός αστικού πλαισίου και 56 λόγω απουσίας συνάφειας με τους ESG δείκτες ή τα Digital Twins σε συνδυασμό με αστικά συστήματα.

Κατά το τρίτο στάδιο (αξιολόγηση πλήρους κειμένου), εξετάστηκαν αναλυτικά οι υπόλοιπες 32 μελέτες, αξιολογώντας τη μεθοδολογική τους επάρκεια, την ποιότητα των αποτελεσμάτων και τον βαθμό συμβολής τους στα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας. Μετά την ολοκλήρωση αυτής της φάσης, 32 μελέτες πληρούσαν πλήρως τα κριτήρια ένταξης και συμπεριλήφθηκαν στην τελική ανασκόπηση. Η αναλυτική διαδικασία διαλογής αποτυπώνεται στο διάγραμμα ροής PRISMA που ακολουθεί (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. PRISMA Διάγραμμα ροής άρθρων ανασκόπησης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Οι 32 μελέτες που συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα συστηματική ανασκόπηση παρουσιάζονται σε συνοπτικό πίνακα στο Παράρτημα της εργασίας. Ο πίνακας περιλαμβάνει για

κάθε μελέτη τους συγγραφείς και το έτος δημοσίευσης, τη χώρα προέλευσης, τον σκοπό, τη μεθοδολογία και τα σημαντικότερα ευρήματά της. Το σύνολο των τριάντα δύο αυτών μελετών αποτέλεσε τη βιβλιογραφική βάση για την ανάπτυξη του επόμενου κεφαλαίου.

4. Εννοιολογική Μοντελοποίηση Ψηφιακού Διδύμου Έξυπνης Πόλης

4.1 Εννοιολογική Προσέγγιση και Αρχιτεκτονική του Μοντέλου

Η ανάπτυξη ενός ψηφιακού διδύμου (Digital Twin) για την αξιολόγηση της αστικής βιωσιμότητας μέσω ESG δεικτών προϋποθέτει τη διαμόρφωση ενός σαφούς εννοιολογικού πλαισίου, το οποίο να ορίζει τόσο τη λογική δομή του μοντέλου όσο και τις βασικές αρχές σχεδιασμού που το διέπουν. Σύμφωνα με τους Alam και Azeem (2025), τα ψηφιακά δίδυμα αποτελούν τον προβλεπτικό πυρήνα των έξυπνων πόλεων, καθώς συνδυάζουν δεδομένα πραγματικού χρόνου με εννοιολογικά μοντέλα αστικής λειτουργίας, επιτρέποντας τη δυναμική παρακολούθηση και προσομοίωση σύνθετων αστικών συστημάτων. Η εννοιολογική αυτή προσέγγιση αποτελεί τη θεμελιακή βάση στην οποία αναπτύσσεται το παρόν μοντέλο, σε πλήρη συνέπεια με τα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Ο σχεδιασμός του προτεινόμενου ψηφιακού διδύμου βασίζεται σε μια ιεραρχική, πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική, η οποία οργανώνει τη λειτουργία του μοντέλου σε διακριτά αλλά αλληλένδετα επίπεδα επεξεργασίας. Στη μελέτη τους, οι Suprianto et al. (2024) προτείνουν ένα αστικό DT framework για σχεδιασμό και αναφορά, το οποίο βασίζεται σε ιεραρχικά επίπεδα αφαίρεσης που επιτρέπουν την αντιστοίχιση ετερογενών δεδομένων σε κοινές δομές ανάλυσης. Η λογική αυτή υιοθετείται πλήρως στο παρόν μοντέλο, όπου η αρχιτεκτονική διαρθρώνεται σε πέντε επίπεδα: το επίπεδο πηγών δεδομένων, το επίπεδο ενσωμάτωσης και επεξεργασίας, το επίπεδο μοντελοποίησης αστικών υποσυστημάτων, το επίπεδο αξιολόγησης ESG και, τέλος, το επίπεδο λήψης αποφάσεων. Η αρχιτεκτονική αυτή αποτυπώνεται αναλυτικά στο Σχήμα 2 της ενότητας 4.5.

Η θεωρητική θεμελίωση της αρχιτεκτονικής αντλεί σημαντικά στοιχεία από την έννοια του City Information Modelling (CIM), όπως αυτή αναπτύσσεται από τον Gil (2020), ο οποίος ορίζει ένα εννοιολογικό πλαίσιο για ψηφιακό αστικό σχεδιασμό βασισμένο σε ιεραρχικές δομές πληροφορίας. Ταυτόχρονα, η προσέγγιση των Ivanov et al. (2020) για την εννοιολογική επισκόπηση του ψηφιακού διδύμου πόλης αναδεικνύει τρεις βασικές συνιστώσες ενός αστικού DT: τον φυσικό κόσμο (real world), τον ψηφιακό χώρο (digital space) και τον μηχανισμό αμφίδρομης σύνδεσής τους, οι οποίες αποτελούν τα δομικά στοιχεία και της παρούσας αρχιτεκτονικής.

Βασική αρχή σχεδιασμού του προτεινόμενου μοντέλου αποτελεί η διαλειτουργικότητα, δηλαδή η ικανότητα ανταλλαγής δεδομένων και λειτουργικής σύνδεσης μεταξύ ετερογενών αστικών υποσυστημάτων. Ο Traoré (2024) τονίζει ότι η διαλειτουργικότητα αποτελεί ίσως την κρισιμότερη πρόκληση για τα αστικά DT, καθώς τα αστικά δεδομένα προέρχονται από πλήθος ανόμοιων πηγών με διαφορετικές δομές, πρωτόκολλα και χρονικές κλίμακες. Στο παρόν μοντέλο, η διαλειτουργικότητα επιτυγχάνεται μέσω ενός ενοποιημένου επιπέδου επεξεργασίας δεδομένων που λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος μεταξύ των πηγών και των μοντέλων αξιολόγησης. Ομοίως, οι Saeed et al. (2022) στη συστηματική τους ανασκόπηση υπογραμμίζουν ότι η αρχιτεκτονική ενός αστικού DT πρέπει να είναι αρκούντως ευέλικτη ώστε να προσαρμόζεται στις διαφορετικές ανάγκες αστικών συστημάτων.

Τα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των σχεδιαστικών επιλογών. Οι Huang και Tso (2024) στη συστηματική τους ανασκόπηση εντοπίζουν έξι βασικούς τομείς εφαρμογής αστικών DT σε έξυπνες πόλεις, μεταξύ των οποίων η ενέργεια, οι μεταφορές και η αστική διακυβέρνηση αναδεικνύονται ως οι πλέον συχνά εμφανιζόμενοι. Η παρατήρηση αυτή υπαγορεύει τόσο την επιλογή των υποσυστημάτων που ενσωματώνονται στο μοντέλο όσο και τη σχετική έμφαση που αποδίδεται σε κάθε ESG διάσταση. Παράλληλα, η Mazzetto (2024) αναδεικνύει την έλλειψη τυποποίησης στις αρχιτεκτονικές αστικών DT ως κεντρική πρόκληση του πεδίου, γεγονός που ενισχύει την αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός εννοιολογικά σαφούς και επαναλήψιμου μοντέλου.

Σημαντική συμβολή στη διαμόρφωση του εννοιολογικού πλαισίου αποτελεί η εργασία των Mabrouk et al. (2025), οι οποίοι εξετάζουν τα DT πόλεων ως εργαλεία κλιματικής ανθεκτικότητας, υπογραμμίζοντας την ανάγκη ενσωμάτωσης δεδομένων κλιματικής πίεσης στον σχεδιασμό τους, παρατήρηση άμεσα σχετική με την Environmental διάσταση του ESG. Επιπλέον, οι Qanazi et al. (2025) επισημαίνουν ότι τα υφιστάμενα αστικά DT υπολείπονται σε κοινωνική διάσταση και

προτείνουν πλαίσιο ενσωμάτωσης κοινωνικών δεικτών, παρατήρηση η οποία αντικατοπτρίζεται στην ισχυρή παρουσία της Social ESG διάστασης στο προτεινόμενο μοντέλο.

Η εννοιολογική αρχιτεκτονική ολοκληρώνεται με αναφορά στο ταξινομικό σύστημα χρήσεων DT των Al-Sehrawy et al. (2021), οι οποίοι προτείνουν έναν διαβαθμισμένο τρόπο ανάπτυξης DT ανάλογα με τον βαθμό ωριμότητας του αστικού συστήματος. Στο ίδιο πνεύμα, οι Ibrahim et al. (2020) θεμελιώνουν εννοιολογικά τη χρήση DT στη βιώσιμη διαχείριση υποδομών, ενώ οι Belfadel et al. (2023) και οι Liu και Tian (2023) αναδεικνύουν τη γενικευσιμότητα της DT προσέγγισης σε διαφορετικά αστικά πεδία. Συνολικά, το προτεινόμενο μοντέλο αντιμετωπίζει το ψηφιακό δίδυμο ως ένα εξελισσόμενο σύστημα, ικανό να ενσωματώνει νέα δεδομένα και να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες αστικές ανάγκες, σε πλήρη συνέπεια με τη σύγχρονη επιστημονική βιβλιογραφία.

4.2 Παράμετροι και Μεταβλητές του Μοντέλου ανά ESG Διάσταση

Η επιλογή των παραμέτρων και μεταβλητών εισόδου ενός αστικού ψηφιακού διδύμου αποτελεί κρίσιμο στάδιο μοντελοποίησης, καθώς καθορίζει τόσο την πληρότητα της αναπαράστασης του αστικού συστήματος όσο και την αξιοπιστία των αξιολογήσεων που παράγει. Στη μελέτη τους, οι Mian et al. (2024) αναπτύσσουν ένα ολοκληρωμένο σύνολο ESG metrics μέσω συστηματικής βιβλιογραφικής ανάλυσης, τονίζοντας ότι η επιλογή κάθε δείκτη πρέπει να είναι τεκμηριωμένη ως προς τη συνάφειά του με τη βιωσιμότητα, τη μετρησιμότητά του και τη διαθεσιμότητα των αντίστοιχων δεδομένων. Η αρχή αυτή διέπει και τη διαδικασία επιλογής παραμέτρων του παρόντος μοντέλου.

Αναφορικά με την περιβαλλοντική διάσταση (Environmental ESG), οι Teixeira Dias et al. (2023) αναλύουν τις κατηγορίες ESG δεικτών που σχετίζονται με αστική βιωσιμότητα και αναδεικνύουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, την κατανάλωση ενέργειας, τη διαχείριση αποβλήτων και την κάλυψη πράσινων χώρων ως τους πλέον κρίσιμους δείκτες. Οι παράμετροι αυτοί ενσωματώνονται στο μοντέλο ως μεταβλητές εισόδου και τροφοδοτούνται από δεδομένα αισθητήρων IoT, δορυφορικές αποτυπώσεις και στατιστικά ευρωπαϊκών οργανισμών. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Radzi et al. (2026) αναδεικνύουν τη σημασία δεικτών σχετικών με την ποιότητα του αέρα και του αστικού μικροκλίματος, οι οποίοι εντάσσονται ως επιμέρους παράμετροι στην Environmental διάσταση.

Ως προς την κοινωνική διάσταση (Social ESG), οι Alatagi et al. (2021) τονίζουν ότι οι ESG δείκτες για αστικές κυβερνήσεις πρέπει να καλύπτουν πτυχές κοινωνικής συνοχής, ισότητας πρόσβασης σε υπηρεσίες και ποιότητας αστικής ζωής. Στο παρόν μοντέλο, η Social διάσταση παραμετροποιείται μέσω δεικτών όπως ο Δείκτης Αστικής Ποιότητας Ζωής, η πρόσβαση σε αστικές υπηρεσίες, ο βαθμός κοινωνικής ένταξης και το ποσοστό ανεργίας. Η Gazioglu Hamis (2024) προτείνει ένα σύστημα βαθμολόγησης ESG για πόλεις που περιλαμβάνει κοινωνικούς δείκτες σχετικούς με την ενεργειακή φτώχεια και την κοινωνική ευπάθεια, δείκτες υψηλής προτεραιότητας και στο παρόν πλαίσιο.

Η διάσταση διακυβέρνησης (Governance ESG) παραμετροποιείται βάσει των προτάσεων των Esmailpour et al. (2021), οι οποίοι αναπτύσσουν μοντέλο καλής αστικής διακυβέρνησης βασισμένο σε ESG έννοιες, περιλαμβάνοντας δείκτες διαφάνειας, λογοδοσίας, ψηφιακής διακυβέρνησης και συμμετοχής πολιτών. Οι Zubizarreta και Aquino (2026) επισημαίνουν επιπλέον τη χωρική διάσταση των ESG δεικτών, υπογραμμίζοντας ότι η κατανομή ευεργετημάτων και βαρών της αστικής ανάπτυξης στον χώρο αποτελεί κρίσιμη παράμετρο διακυβέρνησης, μια διάσταση που ενσωματώνεται στο μοντέλο μέσω γεωχωρικών ESG δεδομένων.

Οι Bruno και Henisz (2024) αναδεικνύουν τη σχέση μεταξύ ESG επιδόσεων και δημοτικού πιστωτικού κινδύνου, προτείνοντας δείκτες δημοσιονομικής διαχείρισης ως συστατικά στοιχεία της Governance ESG αξιολόγησης. Παράλληλα, οι Li et al. (2024) εισάγουν ESG κριτήρια για αξιολόγηση αστικών έργων υδροδότησης ΔΙΣ, αναδεικνύοντας τη χρησιμότητα τομεακά εξειδικευμένων ESG παραμέτρων. Σε ό,τι αφορά τις μεταφορές, οι Kuftinova et al. (2023) προσδιορίζουν ESG παράγοντες ειδικά για τον τομέα του μεταφορικού σχεδιασμού, ενώ οι Zhai et al. (2023) εξετάζουν την επίδραση της ψηφιακής αστικής υποδομής στις ESG επιδόσεις, προσφέροντας χρήσιμες ενδείξεις για την παραμετροποίηση του αντίστοιχου υποσυστήματος. Ο Πίνακας 2 που ακολουθεί συνοψίζει τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου ανά ESG διάσταση, καταγράφοντας για κάθε παράμετρο την πηγή δεδομένων, τη μονάδα μέτρησης και το αντίστοιχο υποσύστημα αναφοράς.

Πίνακας 2. Παράμετροι και Μεταβλητές Εισόδου ανά ESG Διάσταση. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

ESG Διάσταση	Παράμετρος / Δείκτης	Πηγή Δεδομένων	Μονάδα Μέτρησης	Υποσύστημα
Environmental (E)	Εκπομπές CO ₂ ανά κάτοικο	EEA / Eurostat	tCO ₂ /κάτοικο	Ενέργεια
	Ποσοστό ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα	Εθνικοί φορείς ενέργειας	%	Ενέργεια
	Κατανάλωση ενέργειας κτιρίων	IoT αισθητήρες / AMR	kWh/m ²	Ενέργεια
	Δείκτης ποιότητας αέρα (AQI)	Δίκτυο αισθητήρων AA	AQI (0-500)	Υδρευση/Περιβάλλον
	Πράσινοι χώροι ανά κάτοικο	Δορυφορική αποτύπωση	m ² /κάτοικο	Υδρευση/Περιβάλλον
	Ποσοστό ανακύκλωσης αποβλήτων	Δημοτικά στατιστικά	%	Υδρευση/Περιβάλλον
	Ποιότητα υδάτινων πόρων	Σταθμοί μέτρησης ΕΕ	mg/L BOD	Υδρευση/Περιβάλλον
Social (S)	Δείκτης Αστικής Ποιότητας Ζωής	Έρευνες / Eurostat	Σύνθετος (0-100)	Διακυβέρνηση
	Πρόσβαση σε αστικές υπηρεσίες	Δημοτικά μητρώα	% πληθυσμού	Διακυβέρνηση
	Δείκτης κοινωνικής ένταξης	Eurostat / έρευνες	Σύνθετος (0-100)	Διακυβέρνηση
	Ποσοστό ανεργίας	Εθνικά στατιστικά	%	Διακυβέρνηση
	Δείκτης ενεργειακής φτώχειας	Eurostat	% νοικοκυριών	Ενέργεια
	Εγκληματικότητα ανά 1.000 κατ.	Αστυνομικά αρχεία	Αριθμός	Διακυβέρνηση
	Χρήση ΜΜΜ	Transit operators	% μετακινήσεων	Μεταφορές
Governance (G)	Δείκτης ψηφιακής διακυβέρνησης	DESI / Eurostat	Σύνθετος (0-100)	Ψηφιακή Υποδομή
	Ηλεκτρονικές δημόσιες υπηρεσίες	Δήμος / e-Government	% διαθέσιμων	Ψηφιακή Υποδομή
	Διαφάνεια δημόσιας δαπάνης	Ανοικτά δεδομένα δήμου	Σύνθετος (0-100)	Διακυβέρνηση
	Συμμετοχή πολιτών	Πλατφόρμες e-democracy	% ενεργών πολιτών	Διακυβέρνηση
	Συμμόρφωση με ευρ. πρότυπα	EU Audit / αναφορές	Επίπεδο (1-5)	Διακυβέρνηση

4.3 Υποσυστήματα και Δομή του Ψηφιακού Διδύμου

Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου ψηφιακού διδύμου οργανώνεται γύρω από πέντε κεντρικά υποσυστήματα, τα οποία αντιστοιχούν στους βασικούς τομείς αστικής λειτουργίας: (α) το υποσύστημα ενέργειας, (β) το υποσύστημα μεταφορών, (γ) το υποσύστημα ύδρευσης και περιβαλλοντικής διαχείρισης, (δ) το υποσύστημα ψηφιακής υποδομής και (ε) το υποσύστημα διακυβέρνησης. Η επιλογή αυτών των πέντε τομέων βασίζεται στα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης και συνάδει με τη modular προσέγγιση που προτείνουν οι Castelli et al. (2019), σύμφωνα με τους οποίους ένα αποτελεσματικό αστικό DT πρέπει να οργανώνεται σε αρθρωτές, λειτουργικά αυτόνομες αλλά αλληλένδετες ενότητες.

Το υποσύστημα ενέργειας μοντελοποιεί την παραγωγή, διανομή και κατανάλωση ενέργειας στο αστικό σύστημα. Οι Huang et al. (2022) αποδεικνύουν εμπειρικά τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσω DT για ολοκληρωμένα περιφερειακά ενεργειακά συστήματα σε έξυπνες πόλεις, υπογραμμίζοντας τη σημασία της real-time παρακολούθησης. Οι Tan και Li (2024) επεκτείνουν αυτή την προσέγγιση σε επίπεδο κτιρίου και αστικής υποδομής, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα ολοκλήρωσης διαφορετικών ενεργειακών πόρων στο DT. Εσωτερικές μεταβλητές του υποσυστήματος περιλαμβάνουν: κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τομέα, ποσοστό ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα, εκπομπές CO₂ ανά kWh και δείκτη ενεργειακής αποδοτικότητας κτιρίων.

Το υποσύστημα μεταφορών μοντελοποιεί τις αστικές μετακινήσεις, τη διαχείριση κυκλοφορίας και τις εκπομπές από τον τομέα αυτόν. Οι Jafari et al. (2023) επισκοπούν εκτενώς τις εφαρμογές DT σε μεταφορικά συστήματα, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα προσομοίωσης πολύπλοκων δικτύων ροής. Οι El Marai et al. (2020) παρουσιάζουν ένα DT για οδική υποδομή ως βήμα προς ανάπτυξη έξυπνων πόλεων. Εσωτερικές μεταβλητές του υποσυστήματος περιλαμβάνουν: δείκτη κυκλοφοριακής συμφόρησης, εκπομπές ρύπων από οχήματα, ποσοστό χρήσης Μέσων Μαζικής Μεταφοράς και διαθεσιμότητα υποδομής για ήπιες μορφές μετακίνησης.

Το υποσύστημα ύδρευσης και περιβαλλοντικής διαχείρισης καλύπτει την ποιότητα και ποσότητα του νερού, τη διαχείριση αποβλήτων και τη βιοποικιλότητα. Ο Shen (2025) παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα IoT-DT για διαχείριση υπόγειων δικτύων ύδρευσης, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες πρόληψης διαρροών. Οι Ford και Wolf (2020) εξετάζουν DT για έξυπνες πόλεις σε σχέση με τη διαχείριση καταστροφών, αναδεικνύοντας τον κρίσιμο ρόλο υδρολογικών δεδομένων στην αστική ανθεκτικότητα. Εσωτερικές μεταβλητές περιλαμβάνουν: δείκτες ποιότητας νερού, ποσοστό διαρροών στο δίκτυο, κατά κεφαλή κατανάλωση νερού και ποσοστό ανακύκλωσης αποβλήτων.

Το υποσύστημα ψηφιακής υποδομής μοντελοποιεί την ψηφιακή υποδομή της πόλης ως ενεργό παράγοντα βιωσιμότητας. Οι Alourani et al. (2025) παρουσιάζουν υβριδικό AI-IoT framework με DT για προβλεπτική διαχείριση αστικής υποδομής, αναδεικνύοντας τη σημασία της ψηφιακής συνδεσιμότητας. Οι Shirowzhan et al. (2020) συνδυάζουν DT και CyberGIS για μέτρηση της επίδρασης κατασκευής υποδομών σε έξυπνες πόλεις. Εσωτερικές μεταβλητές περιλαμβάνουν: κάλυψη δικτύου 5G, πυκνότητα IoT αισθητήρων, δείκτη ψηφιακής ετοιμότητας (DESI) και ποσοστό πολιτών με πρόσβαση σε ψηφιακές δημόσιες υπηρεσίες.

Το υποσύστημα διακυβέρνησης ενσωματώνει δείκτες αποτελεσματικότητας της αστικής διοίκησης, διαφάνειας και συμμετοχής πολιτών. Σύμφωνα με τους Broo et al. (2022), ένα smart infrastructure DT πρέπει να ενσωματώνει μηχανισμούς παρακολούθησης απόδοσης συνδεδεμένους με ευρύτερους στόχους αστικής διακυβέρνησης. Οι Faliagka et al. (2024) αναλύουν τις αρχιτεκτονικές DT framework για έξυπνες πόλεις, τονίζοντας τον ρόλο του modular design για την ευελιξία. Εσωτερικές μεταβλητές περιλαμβάνουν: δείκτη ψηφιακής διακυβέρνησης, ποσοστό ηλεκτρονικών δημόσιων υπηρεσιών, δείκτη διαφάνειας δημόσιας δαπάνης και επίπεδο συμμετοχής πολιτών.

Τα πέντε υποσυστήματα δεν λειτουργούν ανεξάρτητα αλλά αλληλεπιδρούν μέσω σαφώς καθορισμένων ροών δεδομένων και αιτιωδών σχέσεων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αλληλεπίδρασης είναι: η κατανάλωση ενέργειας από τις μεταφορές που επηρεάζει άμεσα το ενεργειακό υποσύστημα, η ψηφιακή υποδομή που υποστηρίζει τη λειτουργία όλων των άλλων υποσυστημάτων μέσω δικτύων αισθητήρων, και η ποιότητα διακυβέρνησης που καθορίζει τον βαθμό εφαρμογής πολιτικών βιωσιμότητας σε κάθε τομέα. Η ροή αυτών των αλληλεπιδράσεων αποτυπώνεται στο Σχήμα 3.

4.4 Ενσωμάτωση ESG Δεικτών στο Μοντέλο

Η ενσωμάτωση των ESG δεικτών στο ψηφιακό δίδυμο αποτελεί τον κρίσιμο συνδετικό κρίκο μεταξύ της μοντελοποίησης αστικών υποσυστημάτων και της αξιολόγησης αστικής βιωσιμότητας. Η βασική λογική στηρίζεται στην αντιστοίχιση (mapping) κάθε ESG δείκτη με ένα ή περισσότερα υποσυστήματα και τις αντίστοιχες μεταβλητές εισόδου τους. Οι Donolil και Svítek (2024) παρουσιάζουν μια τέτοια ενσωμάτωση ESG στο Smart City concept με εστίαση στις μεταφορές, αναδεικνύοντας ότι η αντιστοίχιση δεικτών σε συγκεκριμένα υποσυστήματα επιτρέπει τόσο τον υπολογισμό επιμέρους ESG βαθμολογιών όσο και τη διαγνωστική χρήση των αποτελεσμάτων για τον εντοπισμό τομέων βελτίωσης.

Η λογική βαθμολόγησης κάθε ESG δείκτη βασίζεται σε κανονικοποιημένη κλίμακα 0-100, στην οποία η τιμή 0 αντιστοιχεί στη χειρότερη μετρούμενη επίδοση και η τιμή 100 στην καλύτερη ή σε ένα τεθέν πρότυπο αναφοράς. Οι Magaletti et al. (2025) αναπτύσσουν data-driven framework ενσωμάτωσης ESG με DT, στο οποίο η κανονικοποίηση των δεικτών αποτελεί βασικό προαπαιτούμενο για τη συγκρισιμότητα και τη σύνθεση των επιμέρους αξιολογήσεων. Στην ίδια κατεύθυνση, η Gazizoglu Hamis (2024) προτείνει σύστημα ESG scoring για πόλεις το οποίο χρησιμοποιεί κανονικοποιημένους δείκτες και σταθμισμένη συνάρτηση αθροίσματος για την παραγωγή συνολικής βαθμολογίας.

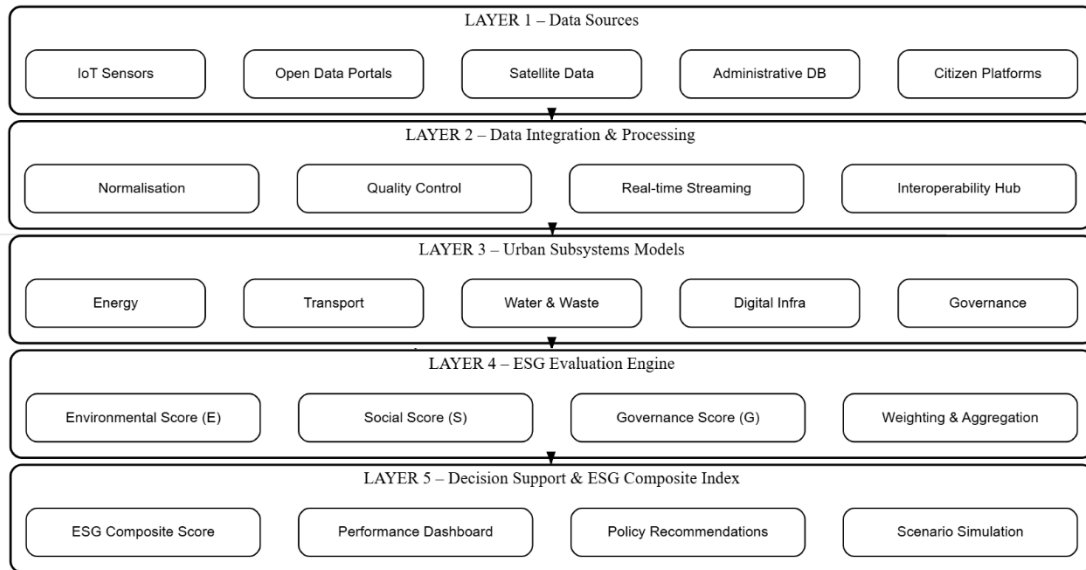
Η σύνθεση των επιμέρους δεικτών σε συνολικό ESG score πραγματοποιείται μέσω σταθμισμένης μέσης τιμής, όπου το βάρος κάθε διάστασης (E, S, G) καθορίζεται βάσει των προτεραιοτήτων της εκάστοτε πόλης και των κατευθύνσεων της ευρωπαϊκής πολιτικής βιωσιμότητας. Οι Kljaić et al. (2024) εφαρμόζουν DT models με ESG methodology στον τομέα μεταφορών-ενέργειας, δείχνοντας ότι η σταθμισμένη συνάρτηση αθροίσματος παρέχει ερμηνεύσιμα αποτελέσματα και επιτρέπει ανάλυση ευαισθησίας ως προς τα επιλεγμένα βάρη. Η ευελιξία αυτή καθιστά το μοντέλο προσαρμόσιμο σε διαφορετικές αστικές πραγματικότητες.

Η ευθυγράμμιση των ESG δεικτών με τους Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης (SDGs) του ΟΗΕ αποτελεί επίσης κεντρικό στοιχείο του μοντέλου. Οι Markopoulos et al. (2024) αναπτύσσουν πλαίσιο ευθυγράμμισης DT με τους 17 SDGs σε έξυπνες πόλεις, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα άμεσης αντιστοίχισης κάθε ESG δείκτη με συγκεκριμένους SDGs. Οι Trivedi και Juyal (2026) ενισχύουν αυτή την προσέγγιση, τεκμηριώνοντας ότι η σύνδεση DT, AI και ESG δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο αστικού μετασχηματισμού που υπηρετεί τους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας.

Η οπτικοποίηση των ESG επιδόσεων μέσω του ψηφιακού διδύμου αποτελεί τελευταίο αλλά κρίσιμο στάδιο της ενσωμάτωσης. Οι Wu et al. (2025) παρουσιάζουν ολοκληρωμένο GIS-BIM-IoT platform για οπτικοποίηση ESG επιδόσεων σε αστικό σχεδιασμό, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα γεωχωρικής αναπαράστασης δεικτών σε επίπεδο γειτονιάς. Παράλληλα, οι Okojiev et al. (2023) προτείνουν τη χρήση AI με ESG metrics για αυτοματοποιημένο έλεγχο έξυπνων υποδομών, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες αυτοματοποιημένης διάγνωσης που παρέχει η ενσωμάτωση ESG σε ένα DT.

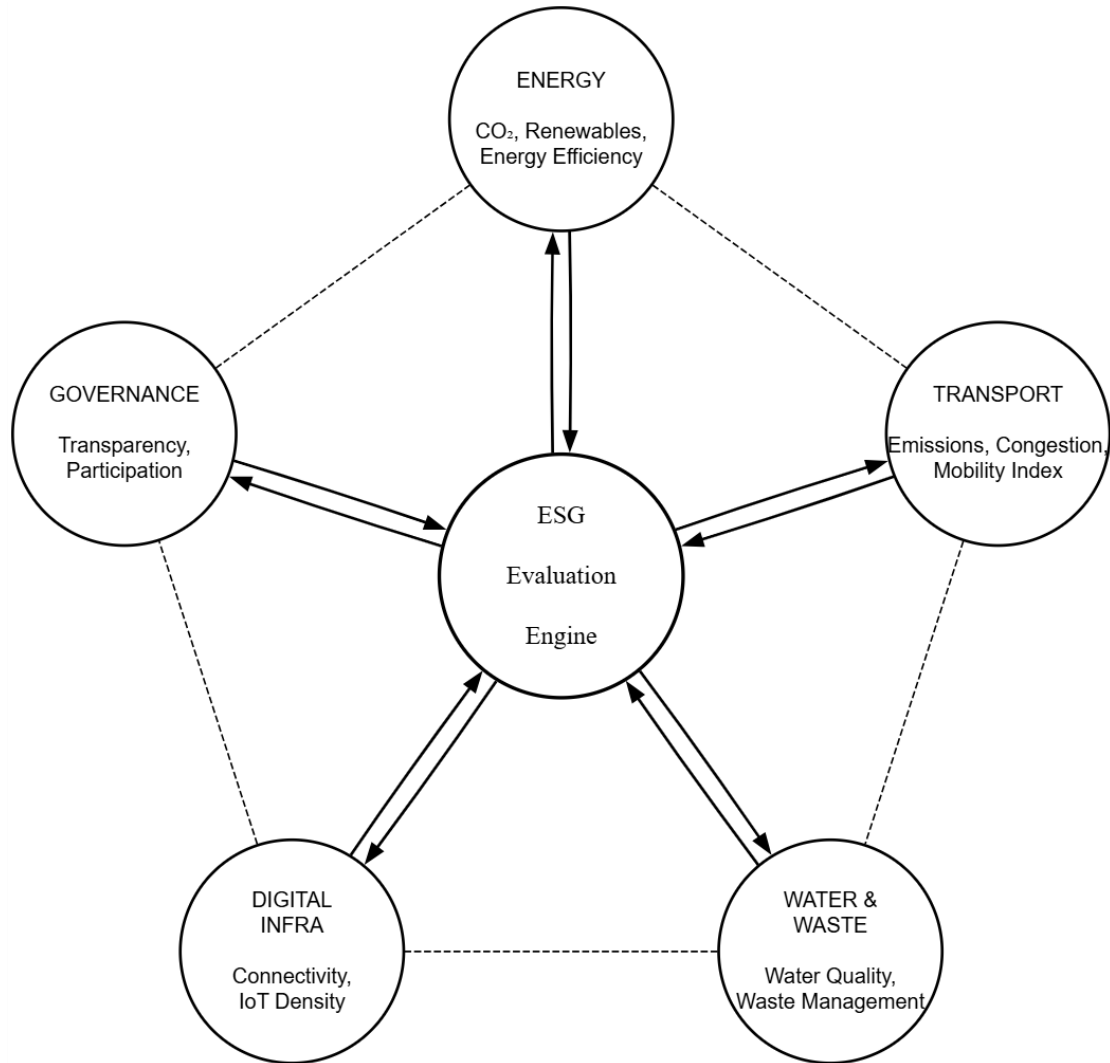
4.5 Διαγράμματα Ροής και Σχεδιαστικές Αποτυπώσεις

Η λειτουργία και η δομή του προτεινόμενου ψηφιακού διδύμου αποτυπώνονται σε τρία συνδυαστικά διαγράμματα, τα οποία αναδεικνύουν αντίστοιχα: την ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική του συστήματος, τη ροή δεδομένων μεταξύ των υποσυστημάτων και τη διαδικασία υπολογισμού της σύνθετης ESG βαθμολογίας. Τα διαγράμματα αυτά αποτελούν οπτική αποτύπωση της εννοιολογικής μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες.



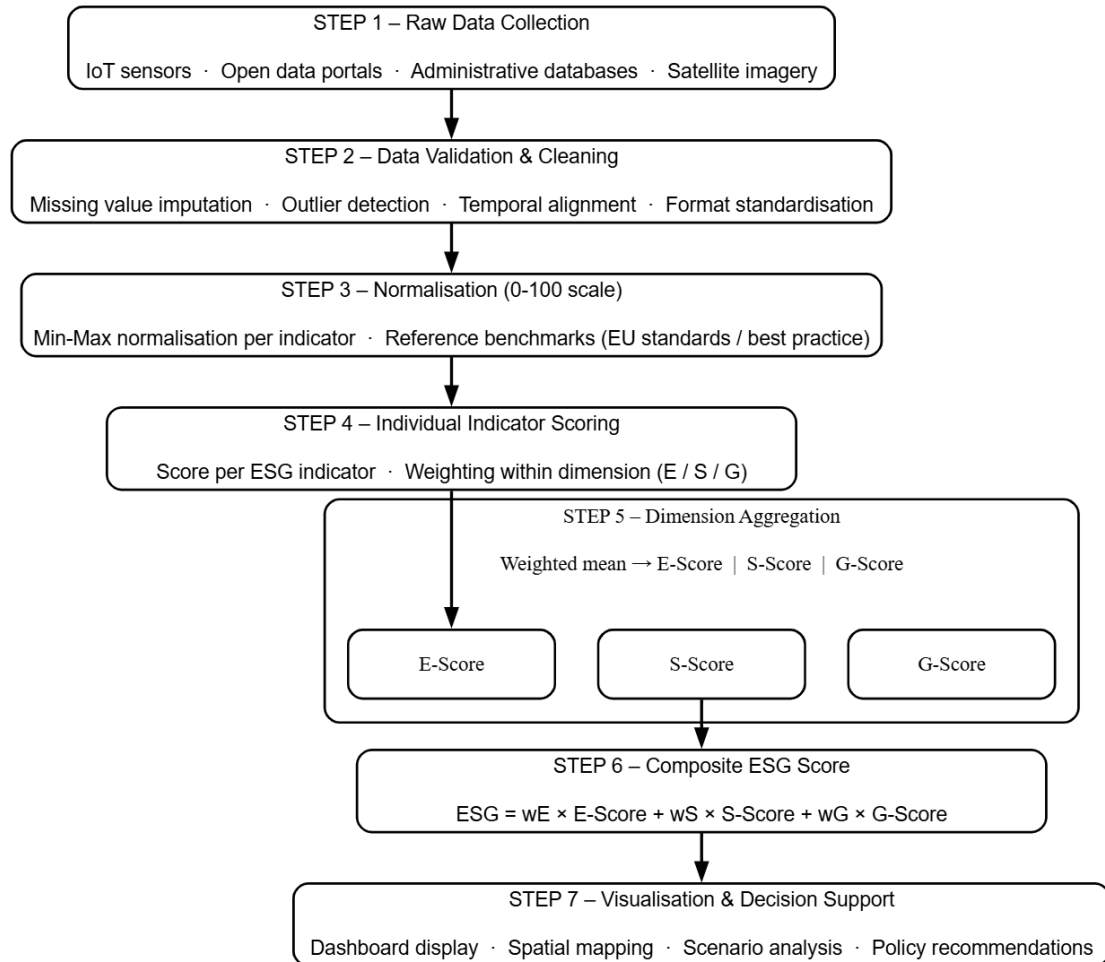
Σχήμα 2. Ολοκληρωμένη Πολυεπίπεδη Αρχιτεκτονική του Ψηφιακού Διδύμου Αστικής ESG Βιωσιμότητας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Το Σχήμα 2 αποτυπώνει την ολοκληρωμένη πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του ψηφιακού διδύμου. Η αρχιτεκτονική οργανώνεται σε πέντε διακριτά επίπεδα (layers) τα οποία λειτουργούν σε αυστηρή ιεραρχική αλληλουχία, με ανοδική ροή δεδομένων από τις πηγές προς το επίπεδο λήψης αποφάσεων. Στο κατώτατο επίπεδο (Layer 1) βρίσκονται οι πηγές δεδομένων, αισθητήρες IoT, ανοικτά δεδομένα, δορυφορικές αποτυπώσεις, διοικητικά δεδομένα και πλατφόρμες πολιτών. Το Layer 2 αφορά την ενσωμάτωση και επεξεργασία δεδομένων (κανονικοποίηση, ποιοτικός έλεγχος, real-time streaming, διαλειτουργικότητα). Το Layer 3 περιλαμβάνει τα πέντε αστικά υποσυστήματα μοντελοποίησης. Το Layer 4 αποτελεί ο μηχανισμός αξιολόγησης ESG που παράγει επιμέρους βαθμολογίες E, S και G. Τέλος, στο ανώτατο επίπεδο (Layer 5) βρίσκεται η σύνθετη ESG βαθμολογία και η υποστήριξη λήψης αποφάσεων, η οποία τροφοδοτεί τους σχεδιαστές πολιτικής με αξιόπιστα στοιχεία αξιολόγησης.



Σχήμα 3. Ροή Δεδομένων μεταξύ των Πέντε Αστικών Υποσυστημάτων και του Μηχανισμού Αξιολόγησης ESG. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Το Σχήμα 3 αποτυπώνει τη ροή δεδομένων μεταξύ των πέντε υποσυστημάτων και τον κεντρικό μηχανισμό αξιολόγησης ESG. Κάθε υποσύστημα τροφοδοτεί τον κεντρικό μηχανισμό ESG με επιμέρους δείκτες μέσω αμφίδρομων ροών δεδομένων (bidirectional flows), γεγονός που επιτρέπει τόσο την αποστολή δεδομένων προς αξιολόγηση όσο και τη λήψη ανατροφοδότησης (feedback) για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας κάθε υποσυστήματος. Παράλληλα, τα υποσυστήματα ανταλλάσσουν δεδομένα μεταξύ τους, αναδεικνύοντας τη συστημική αλληλεξάρτηση των αστικών τομέων. Για παράδειγμα, το ενεργειακό υποσύστημα τροφοδοτεί το υποσύστημα μεταφορών με δεδομένα κατανάλωσης, ενώ το υποσύστημα ψηφιακής υποδομής υποστηρίζει τη λειτουργία όλων των υπόλοιπων μέσω των δικτύων αισθητήρων και των πλατφορμών επεξεργασίας.



Σχήμα 4. Διάγραμμα Ροής Διαδικασίας Υπολογισμού Σύνθετης ESG Βαθμολογίας. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Το Σχήμα 4 παρουσιάζει τη διαδικασία υπολογισμού της σύνθετης ESG βαθμολογίας ως διάγραμμα ροής επτά σταδίων. Στο πρώτο στάδιο (Step 1) συλλέγονται τα raw δεδομένα από τα πέντε υποσυστήματα μέσω IoT αισθητήρων, ανοικτών δεδομένων και διοικητικών βάσεων. Στο δεύτερο στάδιο (Step 2) τα δεδομένα υπόκεινται σε επικύρωση και καθαρισμό (data validation & cleaning). Στο τρίτο στάδιο (Step 3) εφαρμόζεται κανονικοποίηση Min-Max σε κλίμακα 0-100, βάσει προτύπων αναφοράς ευρωπαϊκών πόλεων. Στο τέταρτο στάδιο (Step 4) υπολογίζεται η βαθμολογία κάθε επιμέρους δείκτη και εφαρμόζεται η σχετική στάθμιση εντός κάθε ESG διάστασης. Στο πέμπτο στάδιο (Step 5) υπολογίζονται οι τρεις επιμέρους βαθμολογίες ανά διάσταση (E-Score, S-Score, G-Score) μέσω σταθμισμένης μέσης τιμής. Στο έκτο στάδιο (Step 6) υπολογίζεται η σύνθετη ESG βαθμολογία βάσει του τύπου: $ESG = wE \times E\text{-Score} + wS \times S\text{-Score} + wG \times G\text{-Score}$. Τέλος, στο έβδομο στάδιο (Step 7) τα αποτελέσματα οπτικοποιούνται σε dashboard, αντιστοιχίζονται χωρικά σε επίπεδο γειτονιάς και χρησιμοποιούνται για ανάλυση σεναρίων και διαμόρφωση πολιτικών.

4.6 Λειτουργικές Απαιτήσεις και Περιορισμοί του Μοντέλου

Η λειτουργική υλοποίηση του προτεινόμενου ψηφιακού διδύμου διέπεται από συγκεκριμένες τεχνικές και οργανωτικές απαιτήσεις, οι οποίες αποτελούν αναγκαίες προϋποθέσεις για την αποτελεσματική λειτουργία του μοντέλου. Κεντρική απαίτηση αποτελεί η διαλειτουργικότητα, η οποία εξασφαλίζει την αδιάκοπη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των υποσυστημάτων και μεταξύ του DT και των εξωτερικών πηγών. Οι D'Hauwers et al. (2021) αναλύουν τις προκλήσεις υλοποίησης αστικών DT, εντοπίζοντας ως βασικές απαιτήσεις τη σαφή κατανομή ιδιοκτησίας δεδομένων, τον καθορισμό μοντέλων διακυβέρνησης και την εξασφάλιση χρηματοδοτικής

βιωσιμότητας. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν τόσο τη στρατηγική διάσταση της εφαρμογής -ποιος διαχειρίζεται το DT και ποιος έχει πρόσβαση στα δεδομένα- όσο και την επιχειρησιακή της βιωσιμότητα.

Εξίσου κρίσιμη είναι η απαίτηση για ποιότητα δεδομένων. Το μοντέλο βασίζεται σε εισόδους από ετερογενείς πηγές, οι οποίες ενδέχεται να παρουσιάζουν κενά, ανακρίβειες ή χρονικές υστερήσεις. Οι Caprari et al. (2022) αναδεικνύουν ότι ένα αστικό DT στο πλαίσιο του European Green Deal απαιτεί υψηλής ποιότητας, συνεχή και ανοικτά δεδομένα, τα οποία στην πράξη είναι δύσκολο να εξασφαλιστούν ομοιόμορφα σε όλους τους τομείς. Η απαίτηση αυτή συνδέεται άμεσα και με την κλιμακωσιμότητα του μοντέλου, δηλαδή την ικανότητά του να επεκταθεί σε μεγαλύτερες αστικές περιοχές ή σε επιπλέον υποσυστήματα χωρίς ριζική αναδιαμόρφωση της αρχιτεκτονικής.

Σε επίπεδο θεωρητικών περιορισμών, οι Tzachor et al. (2022) στη σημαντική τους μελέτη στο Nature Sustainability αξιολογούν κριτικά τις δυνατότητες και τους περιορισμούς των DT ως προς την επίτευξη των SDGs. Επισημαίνουν ότι, παρά τις δυνατότητες, τα DT ενδέχεται να αναπαράγουν υφιστάμενες κοινωνικές ανισότητες εάν τα δεδομένα εισόδου δεν αντιπροσωπεύουν πλήρως όλες τις κοινωνικές ομάδες. Ο περιορισμός αυτός έχει ιδιαίτερη σημασία για τη Social ESG διάσταση, καθώς η ανεπαρκής αναπαράσταση ευάλωτων κοινωνικών ομάδων στα δεδομένα ενδέχεται να οδηγήσει σε πλημμελή αξιολόγηση της κοινωνικής βιωσιμότητας.

Ένας ακόμη σημαντικός περιορισμός αφορά τη συμμετοχή των πολιτών στο ψηφιακό δίδυμο. Οι De Jaeger και Swerts (2026) στη μελέτη τους για το urban DT του Ρότερνταμ αναδεικνύουν ότι οι αρχιτεκτονικές επιλογές (limits-by-design) ενός DT μπορούν να περιορίζουν δομικά την πρόσβαση των πολιτών στα δεδομένα της πόλης, και κατ' επέκταση τη δυνατότητα ουσιαστικής συμμετοχής τους στην αστική διακυβέρνηση. Αυτός ο περιορισμός έχει άμεσες επιπτώσεις στη Governance ESG διάσταση του μοντέλου, καθώς οι δείκτες συμμετοχής πολιτών ενδέχεται να αποτυπώνουν ελλιπή εικόνα της πραγματικής δημοκρατικής ευθύνης.

Τέλος, ο Omran και Al-Obaidi (2025) υπογραμμίζουν ότι η εφαρμογή DT για αντιμετώπιση συγκεκριμένων περιβαλλοντικών φαινομένων αναδεικνύει τα όρια της γενικευσιμότητας ενός ψηφιακού διδύμου ευρείας κλίμακας. Η παρατήρηση αυτή ισχύει και για το παρόν μοντέλο: παρότι επιχειρεί να καλύψει ολιστικά τις ESG διαστάσεις, δεν δύναται να αντικαταστήσει εξειδικευμένα μοντέλα επιμέρους τομέων. Το προτεινόμενο DT λειτουργεί ως εννοιολογικό εργαλείο σύνθεσης και όχι ως εργαλείο λεπτομερούς τομεακής μοντελοποίησης, γεγονός που αποτελεί αναγνωρισμένο περιορισμό της εννοιολογικής του φύσης, συμβατό με τη βιβλιογραφία και το εύρος της παρούσας εργασίας.

5. Εφαρμογή και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης: Case Study Helsinki

Μετά την ανάπτυξη της εννοιολογικής αρχιτεκτονικής και του μεθοδολογικού πλαισίου αξιολόγησης στο προηγούμενο κεφάλαιο, το παρόν κεφάλαιο επιχειρεί την εφαρμογή του προτεινόμενου ψηφιακού διδύμου σε πραγματικό αστικό πλαίσιο. Η εφαρμογή αυτή αποσκοπεί στη διπλή επαλήθευση του μοντέλου: αφενός ως προς τη λειτουργική του εφαρμοσιμότητα σε ευρωπαϊκή έξυπνη πόλη, αφετέρου ως προς την ερμηνευτική του αξία για την ανάλυση αστικής βιωσιμότητας μέσω ESG δεικτών. Ως περιοχή εφαρμογής επιλέχθηκε η Helsinki, πρωτεύουσα της Φινλανδίας και μία από τις πλέον αναγνωρισμένες έξυπνες πόλεις παγκοσμίως, η επιλογή της οποίας τεκμηριώνεται αναλυτικά στην ακόλουθη ενότητα.

5.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Helsinki ως Έξυπνης Πόλης

Η Helsinki, με πληθυσμό περίπου 670.000 κατοίκων στο αστικό της κέντρο και 1,5 εκατομμύριο στην ευρύτερη μητροπολιτική περιοχή, αποτελεί μία από τις μικρότερες αλλά πλέον δυναμικές πρωτεύουσες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο Karayel (2023), σε μελέτη χαρτογράφησης πολιτικής καινοτομίας για φινλανδικές έξυπνες πόλεις, αναδεικνύει ότι η Helsinki διαθέτει ένα ιδιαίτερα ευνοϊκό οικοσύστημα για την ανάπτυξη smart city πρωτοβουλιών, συνδυάζοντας ισχυρή πολιτική βούληση, υψηλή ψηφιακή ωριμότητα και αξιόπιστους θεσμούς. Η πόλη κατατάσσεται σταθερά στις πρώτες θέσεις διεθνών αξιολογήσεων αστικής βιωσιμότητας και ευφυΐας, αποτελώντας σημείο αναφοράς για άλλες ευρωπαϊκές πόλεις που επιδιώκουν αντίστοιχο μετασχηματισμό.

Σε ό,τι αφορά την ψηφιακή της ωριμότητα, η Helsinki λειτουργεί ως ένα από τα πιο προηγμένα παραδείγματα ψηφιακής πόλης στην Ευρώπη. Σύμφωνα με τους Pauly και Pallagst (2023), η Helsinki διαθέτει ένα λειτουργικό ψηφιακό δίδυμο, το Helsinki 3D+, το οποίο αποτελεί ένα από τα πρώτα ολοκληρωμένα αστικά DT της Ευρώπης και χρησιμοποιείται ενεργά για τον αστικό σχεδιασμό και τη διαχείριση υποδομών. Το γεγονός αυτό καθιστά τη Helsinki ιδιαίτερα κατάλληλη για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, καθώς επιτρέπει την άμεση σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου με ένα υφιστάμενο, λειτουργικό παράδειγμα αστικού DT.

Ο Härmäläinen (2021) αναλύει εκτενώς την εφαρμογή δυναμικών ψηφιακών διδύμων στην ανάπτυξη της Helsinki, παρουσιάζοντας τον τρόπο με τον οποίο η πόλη αξιοποιεί real-time δεδομένα για τη λήψη αποφάσεων σε τομείς όπως η κυκλοφορία, η ενέργεια και η διαχείριση δημόσιου χώρου. Η προσέγγιση αυτή είναι πλήρως συμβατή με την πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, επιτρέποντας έτσι τη διαπίστωση ότι το προτεινόμενο μοντέλο ESG-DT αποτελεί ουσιαστικά θεωρητική επέκταση του υφιστάμενου ψηφιακού διδύμου της πόλης προς την κατεύθυνση της ολοκληρωμένης ESG αξιολόγησης.

Οι Tartia και Härmäläinen (2024) παρουσιάζουν μια σημαντική περίπτωση συν-δημιουργίας (co-creation) αστικού DT στην περιοχή Kera του Espoo, στη Μητροπολιτική Περιοχή Helsinki, αναδεικνύοντας ότι η φινλανδική πρωτεύουσα δεν αντιμετωπίζει τα DT ως αποκλειστικά τεχνολογικά εργαλεία αλλά ως πλατφόρμες συμμετοχικού σχεδιασμού. Αυτή η ανθρωποκεντρική προσέγγιση ευθυγραμμίζεται άμεσα με τη Governance ESG διάσταση του μοντέλου, η οποία ενσωματώνει δείκτες συμμετοχής πολιτών ως κρίσιμη παράμετρο αξιολόγησης. Παράλληλα, οι Berigüete et al. (2024) τεκμηριώνουν τον ρόλο των αναδυόμενων ψηφιακών τεχνολογιών στην ενίσχυση της συμμετοχής πολιτών σε αστική περιβαλλοντική διαχείριση, παρέχοντας συγκριτικά στοιχεία για την αξιολόγηση της Helsinki.

Από πλευράς ESG πρωτοβουλιών, η Helsinki έχει δεσμευτεί για κλιματική ουδετερότητα έως το 2035, κατέχει κορυφαία θέση στο DESI (Digital Economy and Society Index) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και υλοποιεί εκτεταμένο πρόγραμμα ανοικτών δεδομένων μέσω της πλατφόρμας Helsinki Region Infoshare. Οι Trivedi και Juyal (2026) επισημαίνουν ότι πόλεις με υψηλό επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας, όπως η Helsinki, αποτελούν ιδανικά παραδείγματα για την εφαρμογή ολοκληρωμένων ESG-DT πλαισίων, καθώς διαθέτουν τις απαραίτητες υποδομές δεδομένων για την τροφοδότηση αντίστοιχων μοντέλων. Η τεκμηρίωση αυτή καθιστά την επιλογή της Helsinki μεθοδολογικά αδιάβλητη για τους σκοπούς της παρούσας εφαρμογής.

5.2 Τροφοδότηση του Μοντέλου με Δεδομένα της Helsinki

5.2.1 Πηγές Δεδομένων και Αντιστοίχιση στις Παραμέτρους του Μοντέλου

Η εφαρμογή του μοντέλου ESG-DT στην Helsinki απαιτεί τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων που αντιστοιχούν στις δεκαεννέα παραμέτρους εισόδου που ορίστηκαν στο Κεφάλαιο 4. Κεντρικό ρόλο στην τροφοδότηση του μοντέλου διαδραματίζει η πλατφόρμα Helsinki Region Infoshare (HRI), η οποία αποτελεί μια από τις πιο ολοκληρωμένες πλατφόρμες ανοικτών αστικών δεδομένων στην Ευρώπη. Οι Jaakola et al. (2015), σε εμβληματική μελέτη για τα ανοικτά δεδομένα της μητροπολιτικής περιοχής Helsinki, τεκμηριώνουν ότι το HRI παρέχει δεκάδες χιλιάδες συνόλων δεδομένων σχετικά με τον πληθυσμό, τις μεταφορές, την ενέργεια, το περιβάλλον και τη διακυβέρνηση, αποτελώντας τη βασική πηγή τροφοδότησης του παρόντος μοντέλου.

Για την περιβαλλοντική διάσταση, τα δεδομένα σχετικά με τις εκπομπές CO₂, την ενεργειακή κατανάλωση και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντλήθηκαν κυρίως από τον Επίσημο Σχεδιασμό Κλιματικής Ουδετερότητας του Δήμου Helsinki (Carbon Neutral Helsinki 2035) και την εταιρεία παραγωγής ενέργειας Helen Oy, καθώς και από τα στατιστικά της Eurostat για ευρωπαϊκές πόλεις. Η πυκνότητα αστικού ιστού και η σχέση της με τη βιωσιμότητα αναλύεται από τους Page et al. (2024), οι οποίοι χρησιμοποιούν δείκτες πυκνότητας ως έμμεσους δείκτες βιωσιμότητας στην Helsinki, παρέχοντας ένα χρήσιμο πλαίσιο ερμηνείας για τα αποτελέσματα του μοντέλου.

Για τη μέτρηση της βιωσιμότητας σε επίπεδο αστικής περιοχής, οι Ala-Mantila et al. (2023) αναπτύσσουν ένα σύστημα μέτρησης βιώσιμης αστικής ανάπτυξης για τις 20 μεγαλύτερες φινλανδικές πόλεις, συμπεριλαμβανομένης της Helsinki, παρέχοντας συνθετικούς δείκτες για κάθε ESG διάσταση σε επίπεδο γειτονιάς. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται στο παρόν μοντέλο για την τροφοδότηση της Social διάστασης, ιδίως ως προς τους δείκτες κοινωνικής ισότητας και πρόσβασης σε υπηρεσίες. Επιπλέον, τα δεδομένα μεταφορών αντλήθηκαν από τη μελέτη των Fink et al. (2024), οι οποίοι κατασκεύασαν μήτρα χρόνων μετακίνησης για την περιοχή Helsinki αξιοποιώντας ανοικτά δεδομένα και νέες μεθόδους ανάλυσης, παρέχοντας έτσι λεπτομερή δεδομένα για το μεταφορικό υποσύστημα.

Αναφορικά με τη Social ESG διάσταση, ένα σημαντικό κενό δεδομένων εντοπίστηκε στους δείκτες κοινωνικής ευπάθειας και αστικών ανισοτήτων. Για την αντιμετώπιση αυτού, αξιοποιήθηκε η μελέτη των Casali et al. (2021), οι οποίοι χρησιμοποιούν urban analytics για την ανίχνευση κοινωνικοοικονομικών ανισοτήτων στην Helsinki σε επίπεδο γειτονιάς, παρέχοντας έμμεσως δεδομένα για δείκτες όπως ο δείκτης κοινωνικής ένταξης. Τέλος, για τη μέτρηση περιβαλλοντικών κινδύνων, η μελέτη των Räsänen et al. (2019) για χαρτογράφηση τρωτότητας σε φαινόμενα θερμικής νησίδας (Urban Heat Island) στην Helsinki χρησιμοποιήθηκε ως συμπληρωματική πηγή για δείκτες ποιότητας αέρα και αστικής κλιματικής ευπάθειας.

Ο Πίνακας 3 που ακολουθεί παρουσιάζει αναλυτικά τις δεκαεννέα παραμέτρους εισόδου του μοντέλου, τις αντίστοιχες πηγές δεδομένων για τη Helsinki, τις τιμές αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν και την κατάσταση διαθεσιμότητάς τους. Οι παράμετροι για τις οποίες δεν ήταν διαθέσιμα άμεσα δεδομένα από τη Helsinki αντιμετωπίστηκαν είτε μέσω συγγενών ευρωπαϊκών δεικτών (Eurostat) είτε μέσω εκτιμήσεων βάσει συγκριτικής ανάλυσης, γεγονός που αποτελεί έναν από τους αναγνωρισμένους περιορισμούς της εφαρμογής που συζητείται στην ενότητα 5.4:

Πίνακας 3. Παράμετροι Εισόδου Μοντέλου ESG-DT: Πηγές Δεδομένων Helsinki και Τιμές Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

ESG Διάσταση	Παράμετρος / Δείκτης	Πηγή Δεδομένων Helsinki	Τιμή / Έτος Αναφοράς	Κατάσταση
Environmental	Εκπομπές CO ₂ ανά κάτοικο	City of Helsinki Carbon Neutral 2035 Plan	2,8 tCO ₂ /κατ. (2023)	Διαθέσιμο
	Ποσοστό ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα	Helen Oy / Eurostat	47% (2023)	Διαθέσιμο
	Κατανάλωση ενέργειας κτιρίων	Helsinki Region Infoshare	157 kWh/m ² (2022)	Διαθέσιμο
	Δείκτης ποιότητας αέρα (AQI)	HSY Environmental Monitoring	28 (AQI) – «Καλή»	Διαθέσιμο

	Πράσινοι χώροι ανά κάτοικο	City of Helsinki GIS Portal	28,3 m ² /κατ. (2023)	Διαθέσιμο
	Ποσοστό ανακύκλωσης αποβλήτων	HSY Waste Management Report	56% (2022)	Διαθέσιμο
	Ποιότητα υδάτινων πόρων	Helsinki Water Utility (HSY)	BOD 2,1 mg/L (2023)	Διαθέσιμο
Social	Δείκτης Αστικής Ποιότητας Ζωής	Mercer / EIU City Index	8ος παγκοσμίως (2023)	Εμμέσως διαθέσιμο
	Πρόσβαση σε αστικές υπηρεσίες	HRI – Helsinki Region Infoshare	94% (2023)	Διαθέσιμο
	Δείκτης κοινωνικής ένταξης	Eurostat – Urban Audit	73/100 (2022)	Διαθέσιμο
	Ποσοστό ανεργίας	Statistics Finland	7,1% (2023)	Διαθέσιμο
	Δείκτης ενεργειακής φτώχειας	Eurostat	4,2% νοικ. (2022)	Διαθέσιμο
	Εγκληματικότητα ανά 1.000 κατ.	Statistics Finland	41 περιστ./1.000	Διαθέσιμο
	Χρήση MMM	HSL – Helsinki Regional Transport	47% μετακινήσεων	Διαθέσιμο
Governance	Δείκτης ψηφιακής διακυβέρνησης	DESI 2023 – Φινλανδία	78,9/100	Διαθέσιμο
	Ηλεκτρονικές δημόσιες υπηρεσίες	Finnish Gov. / e-Gov Portal	89% διαθέσιμων	Διαθέσιμο
	Διαφάνεια δημόσιας δαπάνης	Open Data Finland	82/100 (2023)	Διαθέσιμο
	Συμμετοχή πολιτών	Helsinki Participatory Budget	31% ενεργών πολιτών	Μερικώς διαθέσιμο
	Συμμόρφωση με ευρ. πρότυπα	EU Audit Reports	Επίπεδο 5/5	Διαθέσιμο

5.2.2 Διαδικασία Κανονικοποίησης και Στάθμισης

Μετά τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων, εφαρμόστηκε η διαδικασία κανονικοποίησης που περιγράφηκε στο Σχήμα 4 του Κεφαλαίου 4. Κάθε παράμετρος μετατράπηκε σε κανονικοποιημένη τιμή στην κλίμακα 0-100, χρησιμοποιώντας ως σημείο αναφοράς τα ευρωπαϊκά πρότυπα βέλτιστης πρακτικής (EU Urban Best Practice Standards) ή, όπου αυτά δεν ήταν διαθέσιμα, τη βέλτιστη τιμή από συγκρίσιμες ευρωπαϊκές πόλεις (Nordic smart city benchmark). Η κανονικοποίηση πραγματοποιήθηκε μέσω του τύπου Min-Max: $\text{Score} = (\text{τιμή} - \text{ελάχιστη}) / (\text{μέγιστη} - \text{ελάχιστη}) \times 100$, με τη μέγιστη τιμή να αντιστοιχεί στο πρότυπο αναφοράς.

Η στάθμιση των τριών ESG διαστάσεων καθορίστηκε βάσει των προτεραιοτήτων της ευρωπαϊκής πολιτικής βιωσιμότητας και του Helsinki Carbon Neutral 2035 Plan. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν τα εξής βάρη: Environmental (wE = 0,35), Social (wS = 0,30) και Governance (wG = 0,35). Η ισορροπημένη κατανομή μεταξύ Environmental και Governance αντικατοπτρίζει την αναγνωρισμένη σημασία τόσο των περιβαλλοντικών επιδόσεων όσο και της αποτελεσματικής διακυβέρνησης για την επίτευξη αστικής βιωσιμότητας, σύμφωνα με τα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης. Τα βάρη αυτά μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες κάθε πόλης, αποδεικνύοντας την ευελιξία του μοντέλου.

5.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ανά ESG Διάσταση

Η εφαρμογή του μοντέλου ESG-DT στα δεδομένα της Helsinki παράγει αποτελέσματα τόσο ανά επιμέρους υποσύστημα όσο και ανά ESG διάσταση, δίνοντας τη δυνατότητα διαστρωματωμένης ανάλυσης της αστικής βιωσιμότητας. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 4 και στις ακόλουθες υποενότητες, με συνδυαστική αξιολόγηση κάθε διάστασης βάσει των επιμέρους δεδομένων της πόλης.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα ESG Βαθμολόγησης ανά Υποσύστημα και Διάσταση (Helsinki, 2023). Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Υποσύστημα	E-Score (0-100)	S-Score (0-100)	G-Score (0-100)	Μερικό ESG
Ενέργεια	74	68	71	71,0
Μεταφορές	69	78	72	73,0
Ύδρευση & Περιβάλλον	82	70	75	75,7
Ψηφιακή Υποδομή	63	75	85	74,3
Διακυβέρνηση	70	80	87	79,0
ΣΥΝΘΕΤΟ ESG (wE=0.35, wS=0.30, wG=0.35)	71,6	74,2	78,0	74,6

5.3.1 Περιβαλλοντική Διάσταση (Environmental ESG, E-Score)

Η περιβαλλοντική ESG αξιολόγηση της Helsinki αποφέρει συνολικό E-Score ύψους 71,6/100, γεγονός που αντικατοπτρίζει μια πόλη σε ενεργό μεταβατικό στάδιο προς κλιματική ουδετερότητα, αλλά που δεν έχει ακόμη επιτύχει τους φιλόδοξους στόχους της. Η ανάλυση των επιμέρους υποσυστημάτων αναδεικνύει ότι ο υψηλότερος E-Score εντοπίζεται στο υποσύστημα ύδρευσης και περιβαλλοντικής διαχείρισης (82/100), αντανakλώντας τα εξαιρετικά επίπεδα ποιότητας νερού και τη σχετικά ανεπτυγμένη υποδομή διαχείρισης αποβλήτων. Στο αντίθετο άκρο, το υποσύστημα μεταφορών εμφανίζει τον χαμηλότερο E-Score (69/100), κυρίως λόγω της συνεχιζόμενης εξάρτησης από συμβατικά οχήματα.

Ο Turmunkh (2025) αναλύει την αστική ενεργειακή διακυβέρνηση της Helsinki, παρουσιάζοντας έναν δήμο με ισχυρή πολιτική βούληση για ενεργειακή μετάβαση αλλά με σημαντικές τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις στην υλοποίηση. Το ενεργειακό υποσύστημα βαθμολογείται με 74/100, αντανakλώντας το αυξανόμενο ποσοστό ΑΠΕ (47% του ενεργειακού μίγματος το 2023) αλλά και τις εναπομένουσες εκπομπές από τη θέρμανση κτιρίων. Η τηλεθέρμανση (district heating), η οποία καλύπτει περίπου το 90% των κτιρίων της πόλης, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πεδία βελτίωσης, καθώς η μετάβασή της από φυσικό αέριο σε ανανεώσιμες πηγές βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη.

Η μελέτη των Maliszewska-Nienartowicz et al. (2024) συγκρίνει τις ενεργειακές μεταβάσεις των πόλεων Copenhagen, Helsinki και Stockholm στο πλαίσιο των ευρωπαϊκών στόχων για το 2030. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι η Helsinki, παρότι ακολουθεί παρόμοιες πολιτικές με τις σκανδιναβικές ανταγωνίστριές της, παρουσιάζει σχετική υστέρηση στην απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα σε σχέση με τη Copenhagen και τη Stockholm. Στοιχείο που επιβεβαιώνεται από τον E-Score του ενεργειακού υποσυστήματος (74/100), ο οποίος παραμένει κάτω από τον στόχο αναφοράς (≥ 75) για κλιματικά ουδέτερες ευρωπαϊκές πόλεις.

Στον τομέα των μεταφορών, ο Mehrban (2025) πραγματοποιεί συγκριτική ανάλυση εκπομπών άνθρακα από δημόσιες μεταφορές στην περιοχή Helsinki για την περίοδο 2017-2023, αναδεικνύοντας σημαντική μείωση εκπομπών (-22%) κατά την εξεταζόμενη περίοδο χάρη στον εξηλεκτρισμό του στόλου. Ωστόσο, οι ιδιωτικές μετακινήσεις με ΙΧ εξακολουθούν να αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στον σχετικά χαμηλό E-Score του μεταφορικού υποσυστήματος (69/100). Η ποιότητα του αέρα παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα (AQI: 28, «Καλή»), καθώς η κατανάλωση βιομηχανικής ενέργειας εντός του αστικού ιστού είναι περιορισμένη.

Στον τομέα των πράσινων χώρων και της βιοποικιλότητας, η Helsinki παρουσιάζει εξαιρετικές επιδόσεις, με 28,3 m² πράσινου χώρου ανά κάτοικο, μια από τις υψηλότερες τιμές μεταξύ ευρωπαϊκών πρωτευουσών. Ο υψηλός δείκτης αυτός συμβάλλει σημαντικά στη βαθμολογία του υποσυστήματος ύδρευσης και περιβαλλοντικής διαχείρισης (E-Score: 82/100). Ωστόσο, οι Räsänen et al. (2019) επισημαίνουν ότι ορισμένες συνοικίες της Helsinki παρουσιάζουν αυξημένη τρωτότητα σε φαινόμενα θερμικής νησίδας, υποδηλώνοντας χωρικές ανισότητες στην περιβαλλοντική επίδοση που δεν αποτυπώνονται πλήρως στη μέση αστική τιμή.

5.3.2 Κοινωνική Διάσταση (Social ESG, S-Score)

Η κοινωνική ESG αξιολόγηση της Helsinki αποφέρει συνολικό S-Score ύψους 74,2/100, τιμή που αντικατοπτρίζει μια πόλη με υψηλή ποιότητα ζωής και ανεπτυγμένες κοινωνικές υπηρεσίες, αλλά με εμφανείς χωρικές ανισότητες μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών συνοικιών. Ο υψηλότερος S-Score εντοπίζεται στο υποσύστημα διακυβέρνησης (80/100), αντιστακώνοντας τη διαθεσιμότητα κοινωνικών υπηρεσιών και την ισχυρή σύνδεση δημόσιας διοίκησης και κοινωνικής πολιτικής. Το υποσύστημα ενέργειας εμφανίζει τον χαμηλότερο S-Score (68/100), κυρίως λόγω του μη αμελητέου ποσοστού ενεργειακής φτώχειας (4,2% νοικοκυριών), το οποίο δεν έχει αντιμετωπιστεί πλήρως παρά τις εκτεταμένες πολιτικές κοινωνικής στέγης.

Οι Yigitcanlar και Lönnqvist (2013), σε μελέτη συγκριτικής αξιολόγησης γνωσιακής αστικής ανάπτυξης με βάση τη Helsinki, τεκμηριώνουν ότι η πόλη κατέχει κορυφαία θέση στους δείκτες ανθρώπινου κεφαλαίου, ποιότητας εκπαίδευσης και κοινωνικής ευημερίας σε διεθνή σύγκριση. Η επίδοση αυτή αντικατοπτρίζεται στον υψηλό Δείκτη Αστικής Ποιότητας Ζωής (8η θέση παγκοσμίως) και στο υψηλό ποσοστό πρόσβασης σε αστικές υπηρεσίες (94%), στοιχεία που ωθούν προς τα άνω τη συνολική S-Score αξιολόγηση. Ωστόσο, η ίδια μελέτη επισημαίνει ότι οι συγκριτικές πλεονεκτήματα της Helsinki στους κοινωνικούς δείκτες τείνουν να αποκρύπτουν σημαντικές χωρικές ανισότητες που εντείνονται τα τελευταία χρόνια.

Οι Casali et al. (2021) χαρτογραφούν με ακρίβεια τις κοινωνικοοικονομικές ανισότητες εντός του αστικού ιστού της Helsinki, αναδεικνύοντας σαφείς διαφορές μεταξύ εύπορων κεντρικών συνοικιών (όπως Töölö, Kruuninhaka) και πιο ευάλωτων ανατολικών και βορειοανατολικών περιοχών (όπως Mellunmäki, Vuosaari). Ο δείκτης κοινωνικής ένταξης (73/100) και το ποσοστό ανεργίας (7,1%) αντανakλούν αυτές τις ανισότητες, υποδηλώνοντας ότι η Helsinki, παρά την υψηλή συνολική ευημερία, αντιμετωπίζει προκλήσεις κοινωνικής ισότητας που δεν έχουν πλήρως επιλυθεί.

Σε ό,τι αφορά τις μεταφορές ως κοινωνικό αστικό αγαθό, η Helsinki παρουσιάζει ισχυρές επιδόσεις, με το 47% των ημερήσιων μετακινήσεων να πραγματοποιείται με Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (HSL, 2023). Η υψηλή αυτή χρήση MMT αντανakλά τόσο την ποιότητα της αστικής συγκοινωνίας όσο και τις ψηφιακές υπηρεσίες παρακολούθησης και πληροφόρησης που παρέχει η HSL μέσω εφαρμογών, οι οποίες αποτελούν εφαρμογή ψηφιακής υποδομής με άμεση κοινωνική αξία. Οι Fink et al. (2024) αποτυπώνουν λεπτομερώς τις χωρικές διαφορές στους χρόνους μετακίνησης εντός της περιοχής Helsinki, αναδεικνύοντας ότι ορισμένες περιφερειακές περιοχές υστερούν σε πρόσβαση στις δημόσιες συγκοινωνίες, γεγονός που αντανakλάται στον μερικά χαμηλότερο S-Score του μεταφορικού υποσυστήματος (78/100).

Η αξιολόγηση της εγκληματικότητας ως παράμετρος του Social ESG αναδεικνύει μια πόλη με εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές πρωτεύουσες. Με 41 περιστατικά ανά 1.000 κατοίκους (Statistics Finland, 2023), η Helsinki κατατάσσεται μεταξύ των ασφαλέστερων ευρωπαϊκών πρωτευουσών, συμβάλλοντας θετικά στη συνολική S-Score. Η συνδυαστική αξιολόγηση όλων των κοινωνικών παραμέτρων αναδεικνύει μια πόλη που διαθέτει ισχυρό κοινωνικό υπόβαθρο, αλλά που αντιμετωπίζει αυξανόμενες πιέσεις από χωρική ανισότητα, γήρανση του πληθυσμού και μεταναστευτικές τάσεις, παράγοντες που θα πρέπει να ενσωματωθούν σε μελλοντικές επεκτάσεις του μοντέλου.

5.3.3 Διάσταση Διακυβέρνησης (Governance ESG, G-Score)

Η διάσταση διακυβέρνησης αποτελεί το ισχυρότερο πεδίο της Helsinki στη συνολική ESG αξιολόγηση, με G-Score ύψους 78,0/100, την υψηλότερη βαθμολογία μεταξύ των τριών διαστάσεων. Ο υψηλός αυτός βαθμός αντανakλά τη φινλανδική παράδοση στη διαφανή και αποτελεσματική δημόσια διοίκηση, τη συστηματική ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών στη

δημόσια εξυπηρέτηση και τη στρατηγική δέσμευση στους ευρωπαϊκούς στόχους βιωσιμότητας. Το υποσύστημα διακυβέρνησης παρουσιάζει τον υψηλότερο G-Score (87/100), ενώ και το υποσύστημα ψηφιακής υποδομής εμφανίζει εξαιρετική επίδοση (85/100), τεκμηριώνοντας ότι η Helsinki αξιοποιεί τη ψηφιακή υποδομή ως μέσο βελτίωσης της διακυβέρνησης.

Σε επίπεδο ψηφιακής διακυβέρνησης, η Φινλανδία κατέχει την ψηλότερη θέση στον DESI (Digital Economy and Society Index) της ΕΕ για το 2023, με βαθμολογία 78,9/100, ενώ το 89% των δημόσιων υπηρεσιών είναι πλέον διαθέσιμες ηλεκτρονικά. Οι Tartia και Härmäläinen (2024) αναδεικνύουν τον ρόλο των ψηφιακών πλατφορμών συν-δημιουργίας στην ενίσχυση της συμμετοχικής διακυβέρνησης, επισημαίνοντας ότι ο Δήμος Helsinki έχει αναπτύξει ειδικές πλατφόρμες για τη συμμετοχή πολιτών στον αστικό σχεδιασμό, γεγονός που συμβάλλει θετικά στον δείκτη συμμετοχής πολιτών (31% ενεργών πολιτών).

Η διαφάνεια της δημόσιας δαπάνης αποτελεί έναν ακόμη τομέα στον οποίο η Helsinki επιδεικνύει υψηλές επιδόσεις. Βάσει των ανοικτών δεδομένων δημόσιας δαπάνης (Open Data Finland), η πόλη βαθμολογείται με 82/100 στο δείκτη δημοσιονομικής διαφάνειας, αποδεικνύοντας ότι η δέσμευση στα ανοικτά δεδομένα δεν περιορίζεται μόνο στα περιβαλλοντικά και κοινωνικά δεδομένα αλλά επεκτείνεται και στη δημοσιονομική διαχείριση. Ο Karayel (2023) τεκμηριώνει ότι η φινλανδική πολιτική καινοτομίας για τις έξυπνες πόλεις εστιάζει ρητά στη διαφάνεια ως βασική αρχή σχεδιασμού, γεγονός που ενισχύει τη G-Score αξιολόγηση.

Παρά τις γενικά εξαιρετικές επιδόσεις στη Governance διάσταση, εντοπίζονται ορισμένοι τομείς βελτίωσης. Ο δείκτης συμμετοχής πολιτών (31% ενεργών πολιτών), αν και σημαντικά υψηλότερος από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, υποδηλώνει ότι μεγάλο τμήμα του πληθυσμού δεν συμμετέχει ενεργά στις ψηφιακές πλατφόρμες αστικής διακυβέρνησης. Οι Berigüete et al. (2024) αναδεικνύουν ότι η αποτελεσματική ψηφιακή συμμετοχή απαιτεί όχι μόνο τεχνολογική υποδομή αλλά και στρατηγικές ψηφιακής ένταξης που να αντιμετωπίζουν το χάσμα μεταξύ ψηφιακά ικανών και μη ικανών πολιτών. Αυτός ο τομέας αποτελεί μια από τις βασικές κατευθύνσεις βελτίωσης που προτείνονται βάσει της αξιολόγησης.

5.4 Σύνθεση Αποτελεσμάτων και Αξιολόγηση Μοντέλου

5.4.1 Ολοκληρωμένη Εικόνα Αστικής Βιωσιμότητας Helsinki

Η συνθετική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου ESG-DT αποφέρει για την Helsinki ένα συνολικό ESG Score 74,6/100, μια τιμή που τοποθετεί την πόλη σε «καλό» επίπεδο αστικής βιωσιμότητας, υπερβαίνοντας το κατώφλι αναφοράς ($\geq 70/100$) αλλά ευρισκόμενη ακόμη σε απόσταση από τον βέλτιστο στόχο ($\geq 85/100$ για κλιματικά ουδέτερες, ψηφιακά ώριμες πόλεις). Η ανάλυση των τριών ESG διαστάσεων αναδεικνύει μια εικόνα ισόρροπης αλλά διαφοροποιημένης επίδοσης: η Governance διάσταση (G-Score: 78,0) αποτελεί το ισχυρότερο πεδίο, ακολουθούμενη από τη Social (S-Score: 74,2) και την Environmental (E-Score: 71,6).

Η σχετική υστέρηση της Environmental διάστασης (71,6/100 έναντι στόχου ≥ 75) αποτελεί το σημαντικότερο εύρημα της αξιολόγησης και συνδέεται άμεσα με τις προκλήσεις της ενεργειακής μετάβασης που αντιμετωπίζει η πόλη. Η αξιολόγηση αυτή επιβεβαιώνεται από τα ευρήματα των Maliszewska-Nienartowicz et al. (2024), οι οποίοι τοποθετούν τη Helsinki σε μεσαία-υψηλή θέση στην ενεργειακή μετάβαση μεταξύ σκανδιναβικών πόλεων, υποδηλώνοντας ότι υπάρχουν ακόμη σημαντικά βήματα να γίνουν προς την απανθρακοποίηση, ιδίως στον τομέα της θέρμανσης κτιρίων και των αστικών μεταφορών.

Ο Turmunkh (2025) στη μελέτη του για την ενεργειακή διακυβέρνηση της Helsinki επιβεβαιώνει ότι η πόλη διαθέτει εξαιρετική θεσμική ικανότητα για την υλοποίηση του Carbon Neutral 2035 Plan, αλλά η τεχνική μετάβαση του δικτύου τηλεθέρμανσης από αέριο σε βιομάζα και γεωθερμία εξελίσσεται βραδύτερα από ό,τι προβλέπουν οι αρχικοί στόχοι. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται στον E-Score του ενεργειακού υποσυστήματος (74/100), ο οποίος, παρά την ισχυρή ψηφιακή διακυβέρνηση, υστερεί ελαφρά λόγω των απανθρακοποιητικών καθυστερήσεων. Ο Mehrban (2025) επιβεβαιώνει τη βελτίωση στις εκπομπές μεταφορών, δείχνοντας ότι η πτωτική τάση εκπομπών από δημόσιες μεταφορές αποτελεί θετική εξέλιξη που θα αποτυπωθεί στη βελτίωση του E-Score των επόμενων ετών.

Η διστρωματωμένη ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά υποσύστημα αναδεικνύει ότι η σύνδεση μεταξύ Governance και Environmental ESG αποτελεί το ισχυρότερο πλεονέκτημα της

Helsinki. Η πόλη αξιοποιεί την ισχυρή της διακυβέρνηση, τόσο σε θεσμικό όσο και σε ψηφιακό επίπεδο, για να υλοποιεί περιβαλλοντικές πολιτικές με συστηματικό τρόπο. Αυτή η συνεργεία G-E αποτελεί ένα από τα κύρια ευρήματα του μοντέλου και ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφική τεκμηρίωση που αναδεικνύει την ποιότητα διακυβέρνησης ως κρίσιμο παράγοντα για την επίτευξη περιβαλλοντικών στόχων σε αστικό επίπεδο.

5.4.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων βάσει Προτύπων Αναφοράς

Ο Πίνακας 5 που ακολουθεί παρουσιάζει τη συγκριτική αξιολόγηση των κύριων αποτελεσμάτων του μοντέλου ESG-DT έναντι ευρωπαϊκών προτύπων αναφοράς (EU Best Practice Standards) για έξυπνες, βιώσιμες πόλεις.

Πίνακας 5. Συγκριτική Αξιολόγηση ESG Αποτελεσμάτων Helsinki έναντι Ευρωπαϊκών Προτύπων Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Δείκτης Αξιολόγησης	Αποτέλεσμα DT-ESG Μοντέλου	Επίπεδο Αναφοράς (EU Best Practice)	Αξιολόγηση / Σχόλιο
Συνθετο ESG Score	74,6 / 100	≥ 70 («Καλή»)	Εντός στόχου, μεσαίο-υψηλό επίπεδο
Environmental Score	71,6 / 100	≥ 75 (Κλιματικά Ουδέτερες πόλεις)	Κάτω από τον στόχο net-zero, ενεργειακό μίγμα σε μετάβαση
Social Score	74,2 / 100	≥ 70	Εντός στόχου, υψηλή ποιότητα ζωής, αλλά κοινωνικές ανισότητες σε τομείς
Governance Score	78,0 / 100	≥ 70	Ισχυρή επίδοση, ψηφιακή διακυβέρνηση κορυφαίου επιπέδου
Υποσύστημα Ενέργειας	71,0 / 100	≥ 75	Περιθώριο βελτίωσης στην απανθρακοποίηση θέρμανσης
Υποσύστημα Ψηφιακής Υποδομής	74,3 / 100	≥ 75	Οριακά κάτω, επενδύσεις σε connectivity απαιτούνται
Χάσμα E-G Score	6,4 μονάδες	< 10 μονάδες	Ισορροπημένο, αποδεκτή διαφορά διαστάσεων

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5 αναδεικνύουν μια εικόνα συνολικά θετική αλλά με σαφείς τομείς βελτίωσης. Το συνολικό ESG Score (74,6/100) υπερβαίνει το κατώφλι αναφοράς «Καλής» επίδοσης (≥70), αλλά ο Environmental Score (71,6/100) παραμένει κάτω από τον στόχο για κλιματικά ουδέτερες πόλεις (≥75). Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζει την κεντρική πρόκληση που αντιμετωπίζει η Helsinki: η ισχυρή πολιτική βούληση για κλιματική ουδετερότητα έως το 2035 συνοδεύεται από μια σταδιακή τεχνολογική μετάβαση που απαιτεί χρόνο και επενδύσεις πριν αποδώσει πλήρη καρπούς στους δείκτες.

Αξιοσημείωτη είναι η ισορροπία μεταξύ Environmental και Governance Score (χάσμα 6,4 μονάδες), η οποία παραμένει εντός αποδεκτών ορίων (< 10 μονάδες). Η ισορροπία αυτή υποδηλώνει ότι η Helsinki δεν παρουσιάζει το σύνδρομο «ψηλής διακυβέρνησης, χαμηλής περιβαλλοντικής απόδοσης» που παρατηρείται σε ορισμένες ευρωπαϊκές πόλεις, αλλά αντίθετα εμφανίζει ένα σχετικά αρμονικό προφίλ, στο οποίο η ισχυρή διακυβέρνηση λειτουργεί ως καταλύτης περιβαλλοντικής προόδου. Στοιχείο που ευθυγραμμίζεται με τα συμπεράσματα των Trivedi και Juyal (2026) για την κυκλική αστική οικονομία και τους Magaletti et al. (2025) για τη συνεργεία ESG και DT.

5.4.3 Αξιολόγηση Αποτελεσματικότητας του Μοντέλου ESG-DT

Η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου ESG-DT βάσει της εφαρμογής στη Helsinki αναδεικνύει τόσο τις δυνατότητες όσο και τους περιορισμούς του. Ως προς τις δυνατότητες, το μοντέλο αποδεικνύεται ικανό να παράγει μια ολιστική και διαστρωματωμένη εικόνα αστικής βιωσιμότητας, αντλώντας δεδομένα από ετερογενείς πηγές και συνθέτοντάς τα σε ενιαίο πλαίσιο αξιολόγησης. Οι Mazzetto (2024) τονίζει ότι μια από τις κύριες προκλήσεις των αστικών DT είναι η ανεπαρκής σύνθεση δεδομένων από διαφορετικούς τομείς, πρόκληση που το παρόν μοντέλο αντιμετωπίζει μέσω της ενοποιημένης ESG αρχιτεκτονικής πέντε υποσυστημάτων.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η ικανότητά του να αναδεικνύει χωρικές ανισότητες εντός της αστικής περιοχής. Οι Wu et al. (2025) υπογραμμίζουν τη σημασία της γεωχωρικής αναπαράστασης ESG δεδομένων, η οποία επιτρέπει τη στόχευση πολιτικών σε συγκεκριμένες γειτονιές αντί για γενικές πολιτικές ολόκληρης της πόλης. Στην περίπτωση της Helsinki, η χωρική ανάλυση αναδεικνύει σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών συνοικιών τόσο στη Social όσο και στην Environmental διάσταση, εύρημα που συνάδει με τα αποτελέσματα των Casali et al. (2021) και Räsänen et al. (2019).

Αναφορικά με τους περιορισμούς, ο σημαντικότερος εντοπίζεται στην ποιότητα και πληρότητα των δεδομένων. Παρά την εξαιρετική διαθεσιμότητα δεδομένων που παρέχει η Helsinki, ορισμένες παράμετροι, ιδίως στη Social ESG διάσταση, απαιτούν εκτιμήσεις ή χρήση εμμέσων δεδομένων (proxy data). Οι Mabrouk et al. (2025) επισημαίνουν ότι ακόμη και πόλεις με υψηλή ωριμότητα δεδομένων αντιμετωπίζουν κενά στη συλλογή real-time κοινωνικών δεικτών, καθώς τα κοινωνικά φαινόμενα είναι δυσχερέστερα μετρήσιμα σε πραγματικό χρόνο σε σχέση με τεχνικές παραμέτρους όπως η ενεργειακή κατανάλωση ή η κυκλοφορία.

Ένας δεύτερος περιορισμός αφορά την υποκειμενικότητα της στάθμισης. Η επιλογή βαρών για τις τρεις ESG διαστάσεις ($w_E=0,35$, $w_S=0,30$, $w_G=0,35$) αποτελεί κανονιστική επιλογή που αντανάκλα συγκεκριμένες προτεραιότητες πολιτικής. Η μεταβολή αυτών των βαρών θα παρήγαγε διαφορετικές συνολικές βαθμολογίες και ενδεχομένως διαφορετική ιεράρχηση προτεραιοτήτων. Ωστόσο, η Gazioglu Hamis (2024) υποστηρίζει ότι η ευελιξία στη στάθμιση αποτελεί δυνατότητα και όχι αδυναμία, καθώς επιτρέπει προσαρμογή του μοντέλου σε διαφορετικά αστικά πλαίσια και πολιτικές προτεραιότητες.

Συνολικά, η εφαρμογή του μοντέλου στη Helsinki αποδεικνύει ότι το προτεινόμενο πλαίσιο ESG-DT είναι λειτουργικό, εφαρμόσιμο και παράγει ερμηνεύσιμα αποτελέσματα που συνάδουν με την αναμενόμενη επίδοση μιας κορυφαίας ευρωπαϊκής έξυπνης πόλης. Η σύγκριση με τα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης ενισχύει περαιτέρω την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων: οι δείκτες που η βιβλιογραφία χαρακτηρίζει ως κρίσιμους (Ενέργεια, Μεταφορές, Ψηφιακή Διακυβέρνηση) αναδεικνύονται ως οι πιο πληροφοριακά πλούσιοι δείκτες και στη συγκεκριμένη εφαρμογή.

5.4.4 Προτάσεις Βελτίωσης Αστικής Βιωσιμότητας βάσει Αποτελεσμάτων

Βάσει των αποτελεσμάτων του μοντέλου, εντοπίζονται τρεις κατηγορίες προτεραιοτήτων για τη βελτίωση της ESG επίδοσης της Helsinki. Η πρώτη κατηγορία αφορά την επιτάχυνση της απανθρακοποίησης στον ενεργειακό τομέα, κυρίως μέσω της επέκτασης των ΑΠΕ στο δίκτυο τηλεθέρμανσης. Δεδομένου ότι η τηλεθέρμανση καλύπτει περίπου το 90% των κτιρίων της πόλης, η μετάβαση από φυσικό αέριο σε γεωθερμία και βιομάζα θα είχε άμεση και σημαντική επίπτωση στον E-Score, δυνητικά ανεβάζοντάς τον από 71,6 σε εκτιμώμενο 77-79/100 με την ολοκλήρωση της μετάβασης.

Η δεύτερη κατηγορία προτεραιοτήτων αφορά τη μείωση των χωρικών ανισοτήτων στη Social ESG διάσταση. Η συγκέντρωση κοινωνικά ευάλωτων ομάδων σε συγκεκριμένες ανατολικές και βορειοανατολικές συνοικίες, σε συνδυασμό με την κατώτερη πρόσβαση σε ΜΜΜ σε ορισμένες περιφερειακές περιοχές, αποτελεί δομική πρόκληση που απαιτεί στοχευμένες πολιτικές, τόσο κοινωνικής στέγης και απασχόλησης όσο και αναβάθμισης αστικών συγκοινωνιών. Οι Casali et al. (2021) και Ala-Mantila et al. (2023) παρέχουν λεπτομερή χωρική τεκμηρίωση που μπορεί να καθοδηγήσει τέτοιες στοχευμένες παρεμβάσεις.

Η τρίτη κατηγορία προτεραιοτήτων αφορά την αύξηση της συμμετοχής πολιτών στις ψηφιακές πλατφόρμες διακυβέρνησης. Παρά τις υψηλές επιδόσεις της Governance ESG διάστασης, το ποσοστό ενεργού συμμετοχής πολιτών (31%) υποδηλώνει ότι ένα σημαντικό τμήμα του πληθυσμού παραμένει εκτός του ψηφιακού διαλόγου με τον Δήμο. Οι Berigüete et al. (2024) και οι Pauly και Pallagst (2023) αναδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση φιλικών προς τον χρήστη

ψηφιακών εργαλείων και η ενεργητική πρόσκληση συμμετοχής μπορεί να αυξήσει σημαντικά τον δείκτη, βελτιώνοντας παράλληλα την ποιότητα των αποφάσεων που λαμβάνονται μέσω του ψηφιακού διδύμου.

Η συνολική αξιολόγηση καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η Helsinki παρουσιάζει ένα ισχυρό αλλά όχι βέλτιστο προφίλ ESG βιωσιμότητας, με σαφή δυναμική βελτίωσης στους κρίσιμους τομείς ενέργειας και κοινωνικής ισότητας. Το προτεινόμενο μοντέλο ESG-DT δεν αποτελεί μόνο εργαλείο μέτρησης αλλά και εργαλείο στρατηγικής κατεύθυνσης: εντοπίζει με ακρίβεια τα πεδία υστέρησης, ποσοτικοποιεί τα δυνητικά οφέλη παρεμβάσεων και επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση επιλογών πολιτικής. Η εφαρμογή στη Helsinki αποτελεί την πρώτη βήμα προς την ανάπτυξη ενός επαναλαμβανόμενου, γενικεύσιμου εργαλείου ESG αξιολόγησης για ευρωπαϊκές έξυπνες πόλεις.

6. Εφαρμογή και Αποτελέσματα Μοντελοποίησης: Case Study Αθήνα

Η εφαρμογή του εννοιολογικού μοντέλου ESG-DT στη Helsinki, που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ανέδειξε τις δυνατότητες του πλαισίου σε μια πόλη με ώριμη ψηφιακή υποδομή και ισχυρή θεσμική παράδοση βιωσιμότητας. Ωστόσο, η γενικευσιμότητα ενός μοντέλου αστικής αξιολόγησης δεν μπορεί να τεκμηριωθεί μέσω της εφαρμογής σε μία μόνο πόλη, ιδιαίτερα όταν αυτή ανήκει σε ομοιογενές γεωγραφικό και κοινωνικοοικονομικό υπόβαθρο (Vardopoulos & Passas, 2025). Για τον λόγο αυτό, το παρόν κεφάλαιο επεκτείνει την εφαρμοσιμότητα του μοντέλου σε μια ριζικά διαφορετική αστική πραγματικότητα, αυτή της Αθήνας, η οποία ως μεσογειακή πρωτεύουσα μεσαίας ψηφιακής ωριμότητας προσφέρει κρίσιμο πεδίο δοκιμής για το πλαίσιο ESG-DT.

Η μεθοδολογία διαμορφώνεται σε έξι διακριτά βήματα. Πρώτον, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της Αθήνας ως αναδυόμενης έξυπνης πόλης. Δεύτερον, συγκεντρώνονται τα διαθέσιμα δεδομένα στις δεκαεννέα παραμέτρους εισόδου του μοντέλου. Τρίτον, εφαρμόζεται η διαδικασία κανονικοποίησης και στάθμισης με τα ίδια βάρη της Helsinki για συγκρισιμότητα. Τέταρτον, υπολογίζονται τα επιμέρους Environmental, Social και Governance Scores. Πέμπτον, τα αποτελέσματα αξιολογούνται έναντι ευρωπαϊκών προτύπων αναφοράς και της περίπτωσης Helsinki. Έκτον, διατυπώνονται τεκμηριωμένα συμπεράσματα σχετικά με τη βιωσιμότητα της Αθήνας και προτείνονται συγκεκριμένα βήματα μετάβασης προς ένα βιώσιμο αστικό προφίλ (Boufounou et al., 2024).

6.1 Βασικά Χαρακτηριστικά της Αθήνας ως Έξυπνης Πόλης

Η Αθήνα συγκεντρώνει περίπου 660.000 κατοίκους εντός του Δήμου Αθηναίων και 3,1 εκατομμύρια στην ευρύτερη Περιφέρεια Αττικής, αποτελώντας τη μεγαλύτερη μητροπολιτική περιοχή της Ελλάδας (Ελληνική Στατιστική Αρχή, ΕΛΣΤΑΤ, 2023). Η γεωμορφολογία της πόλης, η οποία περικλείεται από όρη και θάλασσα, σε συνδυασμό με το μεσογειακό κλίμα και την τοπογραφική λεκάνη που εμποδίζει τον φυσικό αερισμό, την καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτη σε φαινόμενα Αστικής Θερμικής Νησίδας (Urban Heat Island, UHI) και σε ακραίες θερμοκρασίες, ιδίως κατά τους θερινούς μήνες (Founda & Santamouris, 2017).

Η ταχεία και άναρχη αστικοποίηση των δεκαετιών του 1960 και του 1970, χωρίς ολοκληρωμένο πολεοδομικό σχεδιασμό, οδήγησε σε υψηλή πυκνότητα δόμησης, σχετική απουσία πράσινων χώρων και περιορισμένη ψυκτική ικανότητα του αστικού ιστού. Τα χαρακτηριστικά αυτά εντείνουν την περιβαλλοντική πίεση, καθιστώντας την Αθήνα κρίσιμο πεδίο μελέτης για ολοκληρωμένα εργαλεία βιωσιμότητας (Boufounou et al., 2024). Από δημογραφικής σκοπιά, η μητροπολιτική περιοχή έχει εισέλθει σε φάση γήρανσης, με την ηλικιακή ομάδα άνω των 65 ετών να ξεπερνά το 22% του συνολικού πληθυσμού, ενώ η αυξανόμενη μεταναστευτική παρουσία δημιουργεί έντονες πολιτισμικές αλληλεπιδράσεις σε σύγκριση με τις βόρειες ευρωπαϊκές πρωτεύουσες (Manioudis & Meramveliotakis, 2024).

Σε στρατηγικό επίπεδο, η Αθήνα έχει αναλάβει σημαντικές δεσμεύσεις προς την αστική βιωσιμότητα. Η Στρατηγική Ανθεκτικότητας 2030 (Athens Resilience Strategy 2030) και η συμμετοχή της στην ευρωπαϊκή αποστολή «100 Climate Neutral and Smart Cities by 2030» τοποθετούν την πόλη μεταξύ των πρωτευουσών που δεσμεύονται για κλιματική ουδετερότητα έως το 2030 (Vardopoulos & Passas, 2025). Το Athens 2030 Climate Action Plan περιλαμβάνει συγκεκριμένα μέτρα μείωσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), δενδροφύτευσης, ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων και ενίσχυσης των μέσων μαζικής μεταφοράς (Tanimanidis & Papaspyropoulos, 2026).

Από πλευράς ψηφιακής ωριμότητας, η Ελλάδα κατατάσσεται στην εικοστή πέμπτη θέση μεταξύ των είκοσι επτά κρατών μελών στον Δείκτη Ψηφιακής Οικονομίας και Κοινωνίας (Digital Economy and Society Index, DESI) για το έτος 2023, με συνολική βαθμολογία 39,5 στα 100 (European Commission, EC, 2023). Ο Δήμος Αθηναίων έχει υλοποιήσει ψηφιακές πρωτοβουλίες μέσω του Athens Digital Lab, της πλατφόρμας Curiosity και του Athens Open Data Portal (Boufounou et al., 2024). Σε αντίθεση με το λειτουργικό Helsinki 3D+, η Αθήνα δεν διαθέτει ολοκληρωμένο αστικό ψηφιακό δίδυμο, αν και υπάρχουν πιλοτικές πρωτοβουλίες στο πλαίσιο του έργου PRECINCT (Lymaxis & Georgiou, 2024) και προσπάθειες ανάπτυξης ψηφιακού διδύμου για το λιμάνι του Πειραιά (Tsaimou et al., 2026). Οι Evangelou et al. (2022) και οι Kalfas

et al. (2025) τεκμηριώνουν την πρόοδο στην ανάπτυξη μεθοδολογιών για αστικά ψηφιακά δίδυμα και την ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI) σε ελληνικές πόλεις.

6.2 Τροφοδότηση του Μοντέλου με Δεδομένα της Αθήνας

6.2.1 Πηγές Δεδομένων και Αντιστοίχιση στις Παραμέτρους του Μοντέλου

Η εφαρμογή του μοντέλου ESG-DT στην Αθήνα απαιτεί τη συγκέντρωση δεδομένων από ευρύ φάσμα πηγών, αντανakλώντας τον κατακερματισμό της ελληνικής δεδομενοκεντρικής υποδομής σε σύγκριση με τη συγκεντρωτική πλατφόρμα Helsinki Region Infoshare. Οι κύριες πηγές περιλαμβάνουν την ΕΛΣΤΑΤ, τη Eurostat Urban Audit, το Athens Open Data Portal, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), τον Οργανισμό Αστικών Συγκοινωνιών Αθηνών (ΟΑΣΑ), την Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας (ΕΥΔΑΠ), τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency, EEA), καθώς και διεθνείς πλατφόρμες όπως το World Bank Urban Indicators και το δίκτυο C40 Cities.

Για την Environmental διάσταση, οι εκπομπές CO₂ ανά κάτοικο ανέρχονται σε 6,1 τόνους για το έτος 2023, σαφώς υψηλότερες από την αντίστοιχη της Helsinki. Το ποσοστό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό μίγμα της Αττικής ανέρχεται σε 22% σύμφωνα με τα στοιχεία του ΑΔΜΗΕ και της Eurostat, αντανakλώντας την προοδευτική αλλά αργή πορεία της ενεργειακής μετάβασης. Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια εκτιμάται σε 198 kWh/m², τιμή υψηλότερη από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, λόγω της παλαιότητας του κτιριακού αποθέματος και της ανεπαρκούς θερμομόνωσης (Santamouris et al., 2020).

Ο Δείκτης Ποιότητας Αέρα (Air Quality Index, AQI) στην Αθήνα κυμαίνεται σε τιμές 58 κατά μέσο όρο, με εποχικές αυξήσεις λόγω καυσώνων και αστικών πυρκαγιών (Founda et al., 2019). Οι πράσινοι χώροι ανά κάτοικο ανέρχονται σε μόλις 2,5 m², τιμή από τις χαμηλότερες μεταξύ των ευρωπαϊκών πρωτευουσών, ενώ ο μέσος ευρωπαϊκός όρος υπερβαίνει τα 18 m² (Tanimanidis & Paraspyroudis, 2026). Το ποσοστό ανακύκλωσης παραμένει στο 21%, σαφώς κάτω από τον στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) για 55% έως το 2025. Για τη Social διάσταση, ο Δείκτης Αστικής Ποιότητας Ζωής τοποθετεί την Αθήνα στην 84η θέση παγκοσμίως, με ανεργία 11,2% στην Αττική και ενεργειακή φτώχεια 17,5% των νοικοκυριών (Manioudis & Meramveliotakis, 2024).

Σχετικά με τη Governance διάσταση, ο δείκτης ψηφιακής διακυβέρνησης για την Ελλάδα υπολογίζεται σε 39,5 στα 100, ενώ η διαθεσιμότητα ηλεκτρονικών δημοσίων υπηρεσιών μέσω της ενιαίας πύλης gov.gr έχει αυξηθεί σε 68% (EC, 2023). Η διαφάνεια δημόσιας δαπάνης βαθμολογείται με 64 στα 100 σύμφωνα με την πλατφόρμα Διαύγεια, ενώ η συμμετοχή πολιτών στην «ΣυνΑθηνά» παραμένει χαμηλή στο 8%. Η συμμόρφωση με τα ευρωπαϊκά πρότυπα βαθμολογείται σε επίπεδο 3 στα 5 βάσει εκθέσεων ελέγχου της ΕΕ (Seretis et al., 2024; Parafloratos & Fragidis, 2025). Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις δεκαεννέα παραμέτρους εισόδου του μοντέλου, τις πηγές δεδομένων και τις τιμές αναφοράς για την Αθήνα.

Πίνακας 6. Παράμετροι Εισόδου Μοντέλου ESG-DT: Πηγές Δεδομένων Αθήνας και Τιμές Αναφοράς.
Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

ESG Διάσταση	Παράμετρος / Δείκτης	Πηγή Δεδομένων Αθήνας	Τιμή / Έτος Αναφοράς	Κατάσταση
Environmental	Εκπομπές CO ₂ ανά κάτοικο	Athens Climate Action Plan / EEA	6,1 tCO ₂ /κατ. (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: στόχος 2,9 tCO₂eq έως το 2030· εθνικός μ.δ. ~4,97 tCO₂e (Δ. Αθηναίων/EEA, 2024)</i>	Διαθέσιμο
	Ποσοστό ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα	ΑΔΜΗΕ / Eurostat	22% (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: ~48% στην εθνική ηλεκτροπαραγωγή (2025)· ο δείκτης 22% αφορά την</i>	Διαθέσιμο

			ακαθάριστη τελική κατανάλωση (Eurelectric/Green Tank, 2026)	
	Κατανάλωση ενέργειας κτιρίων	ΥΠΕΝ / ΚΕΝΑΚ	198 kWh/m ² (2022) <i>↳ Επικ. 2025–2026: 544 kWh/m² στα δημοτικά κτίρια (Δ. Αθηναίων)· η τιμή 198 αφορά κατοικίες</i>	Διαθέσιμο
	Δείκτης Ποιότητας Αέρα (AQI)	ΕΕΑ / ΥΠΕΝ	58 «Μέτρια» (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: AQI ~55 (PM2.5 11 µg/m³, IQAir, 2024)</i>	Διαθέσιμο
	Πράσινοι χώροι ανά κάτοικο	Δήμος Αθηναίων / Eurostat	2,5 m ² /κάτ. (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: παραμένει από τους χαμηλότερους στην ΕΕ (Faka, 2025)</i>	Διαθέσιμο
	Ποσοστό ανακύκλωσης αποβλήτων	Ελλην. Οργ. Ανακύκλωσης / Eurostat	21% (2022) <i>↳ Επικ. 2025–2026: επίσημα ~16–17% (ΕΕΑ, 2025) — χαμηλότερο από την αρχική εκτίμηση</i>	Διαθέσιμο
	Ποιότητα υδάτινων πόρων	ΕΥΔΑΠ / ΥΠΕΝ	BOD 2,8 mg/L (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: 99,7% ποιότητα νερού· 95% καθαρή εκροή ΚΕΛ (ΕΥΔΑΠ ESG/CSRD, 2025)</i>	Διαθέσιμο
Social	Δείκτης Αστικής Ποιότητας Ζωής	Mercer / EIU City Index	84η παγκοσμίως (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: 2η λιγότερο βιώσιμη πόλη της ΕΕ· 65% συνολική ικανοποίηση (EC, 2023)</i>	Εμμέσως διαθέσιμο
	Πρόσβαση σε αστικές υπηρεσίες	Eurostat Urban Audit	78% (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: 65% συνολική ικανοποίηση διαβίωσης (EC, Quality of Life in European Cities, 2023)</i>	Διαθέσιμο
	Δείκτης κοινωνικής ένταξης	Eurostat Urban Audit	58/100 (2022) <i>↳ Επικ. 2025–2026: AROPE Αττικής 24,3%· δείκτης εισοδ. ανισότητας S80/S20 > 5,5 (Eurostat Urban Audit)</i>	Διαθέσιμο
	Ποσοστό ανεργίας	ΕΛΣΤΑΤ	11,2% (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: 10,6% (Α' τρίμηνο 2026)· 8,1% (Μάιος 2026), εθνικά (ΕΛΣΤΑΤ)</i>	Διαθέσιμο

	Δείκτης ενεργειακής φτώχειας	Eurostat / ΥΠΕΝ	17,5% νοικ. (2022) <i>↳ Επικ. 2025–2026: 19,0% (στοιχεία 2024, Eurostat, δημ. 2026) — αυξητική τάση</i>	Διαθέσιμο
	Εγκληματικότητα ανά 1.000 κατ.	ΕΛ.ΑΣ. / ΕΛΣΤΑΤ	52 περιστ./1.000 <i>↳ Επικ. 2025–2026: 25–35 μικροεγκλήματα/1.000 στο κέντρο · Numbeo Crime Index 55,2/100</i>	Διαθέσιμο
	Χρήση MMM	ΟΑΣΑ / ΕΛΣΤΑΤ	30% μετακινήσεων <i>↳ Επικ. 2025–2026: 36,5% (ΣΒΑΚ Δήμου Αθηναίων)</i>	Διαθέσιμο
Governance	Δείκτης ψηφιακής διακυβέρνησης	DESI 2023 Ελλάδα	39,5/100 <i>↳ Επικ. 2025–2026: 50/100 (eGovernment Benchmark 2025) · OECD DGI 0,71</i>	Διαθέσιμο
	Ηλεκτρονικές δημόσιες υπηρεσίες	gov.gr / ΓΓΠΣ	68% διαθέσιμων <i>↳ Επικ. 2025–2026: 2,71 δισ. ψηφιακές συναλλαγές (+86% έναντι 2023) · eHealth 73,8/100 (ΓΓΠΣΨΔ, 2025)</i>	Διαθέσιμο
	Διαφάνεια δημόσιας δαπάνης	Διαύγεια	64/100 (2023) <i>↳ Επικ. 2025–2026: CPI 50/100, 56η θέση παγκ. (Transparency International, 2025)</i>	Διαθέσιμο
	Συμμετοχή πολιτών	Πλατφόρμα ΣυνΑθηνά	8% ενεργών <i>↳ Επικ. 2025–2026: ~450 ομάδες πολιτών, ~4.000 δράσεις, 111 υποστηρικτές (synAthina)</i>	Μερικώς διαθέσιμο
	Συμμόρφωση με ευρ. πρότυπα	EU Audit Reports	Επίπεδο 3/5 <i>↳ Επικ. 2025–2026: iREG 2,2/4 (OECD Government at a Glance, 2025)</i>	Διαθέσιμο

6.2.2 Διαδικασία Κανονικοποίησης και Στάθμισης

Μετά τη συλλογή των πρωτογενών δεδομένων, εφαρμόστηκε η ίδια μεθοδολογία κανονικοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση της Helsinki, διασφαλίζοντας τη μεθοδολογική συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων. Κάθε παράμετρος μετατράπηκε σε κανονικοποιημένη τιμή στην κλίμακα 0 έως 100 με χρήση του τύπου Min/Max και με σημείο αναφοράς τα ευρωπαϊκά πρότυπα βέλτιστης πρακτικής. Όπου τα ευρωπαϊκά πρότυπα δεν ήταν διαθέσιμα, χρησιμοποιήθηκαν οι βέλτιστες τιμές μεταξύ των πόλεων του δικτύου C40 Cities, ώστε να διατηρηθεί η ομοιομορφία της αξιολόγησης.

Ως προς τη στάθμιση των τριών ESG διαστάσεων, διατηρήθηκαν τα ίδια βάρη με την περίπτωση της Helsinki: Environmental (wE = 0,35), Social (wS = 0,30) και Governance (wG = 0,35). Η διατήρηση των ίδιων βαρών αιτιολογείται από την ανάγκη απευθείας σύγκρισης των δύο πόλεων στο πλαίσιο μιας ενιαίας μεθοδολογίας. Αναγνωρίζεται ωστόσο ότι, εάν εφαρμόζονταν διαφορετικά βάρη που να αντικατοπτρίζουν τις ειδικές προτεραιότητες της Αθήνας, όπως αυξημένη βαρύτητα στην Environmental διάσταση λόγω της μεσογειακής κλιματικής τρωτότητας,

τα συνολικά αποτελέσματα θα μπορούσαν να διαφέρουν. Η ευελιξία αυτή του μοντέλου αποτελεί μεθοδολογικό πλεονέκτημα (Papafloratos & Fragidis, 2025).

6.3 Αποτελέσματα Μοντελοποίησης ανά ESG Διάσταση

Η εφαρμογή του μοντέλου ESG-DT στα δεδομένα της Αθήνας παράγει αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται διαστρωματωμένα ανά υποσύστημα και ανά διάσταση, επιτρέποντας μια πολυεπίπεδη ανάγνωση της αστικής επίδοσης. Ο Πίνακας 7 συνοψίζει τα συνολικά αποτελέσματα, ενώ οι ακόλουθες υποενότητες αναλύουν διεξοδικά τις τρεις διαστάσεις του ESG, εντοπίζοντας τις κρίσιμες παθογένειες και τους τομείς όπου η Αθήνα διαθέτει σχετικές δυναμικές.

Πίνακας 7. Αποτελέσματα ESG Βαθμολόγησης ανά Υποσύστημα και Διάσταση (Αθήνα, 2023). Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Υποσύστημα	E-Score (0–100)	S-Score (0–100)	G-Score (0–100)	Μερικό ESG
Ενέργεια	47	54	55	52,0
Μεταφορές	50	59	60	56,2
Υδρευση και Περιβάλλον	60	62	61	61,0
Ψηφιακή Υποδομή	51	61	66	59,3
Διακυβέρνηση	54	65	68	62,2
ΣΥΝΘΕΤΟ ESG (wE=0,35; wS=0,30; wG=0,35)	52,4	60,3	61,8	58,1

6.3.1 Περιβαλλοντική Διάσταση (Environmental ESG, E-Score)

Η περιβαλλοντική ESG αξιολόγηση της Αθήνας αποφέρει συνολικό E-Score 52,4 στα 100, τιμή σαφώς κάτω από το ευρωπαϊκό κατώφλι αναφοράς (≥ 75) για κλιματικά ουδέτερες πόλεις. Ανάμεσα στα επιμέρους υποσυστήματα, η χαμηλότερη επίδοση καταγράφεται στο ενεργειακό υποσύστημα (47/100), ακολουθούμενη από το μεταφορικό (50/100), ενώ το υποσύστημα ύδρευσης και περιβαλλοντικής διαχείρισης παρουσιάζει την υψηλότερη βαθμολογία (60/100), κυρίως λόγω της ικανοποιητικής ποιότητας πόσιμου νερού που διασφαλίζει η ΕΥΔΑΠ.

Η χαμηλή βαθμολογία του ενεργειακού υποσυστήματος αντανακλά την περιορισμένη διείσδυση των ΑΠΕ (22% του ενεργειακού μίγματος, έναντι 47% στη Helsinki) και τη συνεχιζόμενη εξάρτηση από τον λιγνίτη και το φυσικό αέριο. Παρά τον σταδιακό παροπλισμό των λιγνιτικών μονάδων μέσω του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ), η μετάβαση σε ΑΠΕ απαιτεί επιπλέον επενδύσεις σε υποδομές δικτύου, αποθήκευσης ενέργειας και ευφυούς διαχείρισης (Boufounou et al., 2024). Η κατανάλωση ενέργειας στα κτίρια (198 kWh/m²) είναι σημαντικά υψηλότερη από τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, αντανακλώντας την παλαιότητα του κτιριακού αποθέματος (Santamouris et al., 2020).

Στον τομέα των μεταφορών, το χαμηλό E-Score (50/100) προκύπτει από την υψηλή εξάρτηση από ιδιωτικά οχήματα και την αργή ηλεκτροκίνηση των δημόσιων μέσων. Παρά τις προσπάθειες του ΟΑΣΑ για προμήθεια ηλεκτρικών λεωφορείων και την επέκταση του Μετρό μέσω της Γραμμής 4, η συμβολή των MMM στις ημερήσιες μετακινήσεις παραμένει στο 30%, σαφώς κάτω από το 47% της Helsinki. Η ποιότητα του αέρα παρουσιάζει τιμές AQI 58, με ιδιαίτερη επιβάρυνση κατά τους θερινούς μήνες λόγω καυσώνων και θερμικής νησίδας (Founda et al., 2019).

Κρίσιμο περιβαλλοντικό έλλειμμα της Αθήνας αποτελούν οι πράσινοι χώροι. Με μόλις 2,5 m² ανά κάτοικο, η πόλη κατατάσσεται μεταξύ των ευρωπαϊκών πρωτευουσών με τη χαμηλότερη πρόσβαση σε αστικό πράσινο, σε σύγκριση με τα 28,3 m² της Helsinki (Tanimanidis & Papaspyropoulos, 2026). Η έλλειψη εντείνει τα φαινόμενα UHI, που σύμφωνα με τους Santamouris et al. (2020) προσεγγίζουν διαφορές θερμοκρασίας έως και 10 °C μεταξύ κέντρου και περιφερειακών περιοχών. Παράλληλα, το ποσοστό ανακύκλωσης παραμένει στο 21%, παρά τις πρόσφατες πρωτοβουλίες του Ελληνικού Οργανισμού Ανακύκλωσης. Συνολικά, η Environmental διάσταση αναδεικνύεται ως ο πιο κρίσιμος τομέας παρέμβασης για τη βιωσιμότητα της Αθήνας.

Επικαιροποίηση δεικτών (2025–2026): Οι νεότερες διαθέσιμες τιμές επιβεβαιώνουν τις τάσεις της περιβαλλοντικής διάστασης, χωρίς να μεταβάλλουν το ενιαίο έτος αναφοράς (2023) της ανάλυσης. Το μερίδιο των ΑΠΕ στην εθνική ηλεκτροπαραγωγή ανήλθε σε περίπου 48% το 2025 —έναντι ~22% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας, τον δείκτη που υιοθετείται εδώ— ο Δείκτης Ποιότητας Αέρα διαμορφώθηκε σε AQI ~55 το 2024, ενώ το επίσημο ποσοστό ανακύκλωσης αστικών αποβλήτων παραμένει χαμηλότερο των αρχικών εκτιμήσεων, στο ~16–17%. Οι πράσινοι χώροι εξακολουθούν να κατατάσσουν την Αθήνα μεταξύ των χαμηλότερων ευρωπαϊκών πρωτευουσών (Eurelectric, 2026· IQAir, 2025· European Environment Agency, 2025· Faka, 2025).

6.3.2 Κοινωνική Διάσταση (Social ESG, S-Score)

Η κοινωνική ESG αξιολόγηση της Αθήνας αποφέρει συνολικό S-Score 60,3 στα 100, τιμή οριακά κάτω από το κατώφλι αναφοράς (≥ 70). Ο υψηλότερος S-Score εντοπίζεται στο υποσύστημα διακυβέρνησης (65/100), αντανakλώντας την παρουσία κοινωνικών υπηρεσιών μέσω του Κέντρου Υποδοχής και Αλληλεγγύης Δήμου Αθηναίων (ΚΥΑΔΑ), ενώ ο χαμηλότερος καταγράφεται στο ενεργειακό υποσύστημα (54/100), όπου η ενεργειακή φτώχεια αποτελεί κυρίαρχη πρόκληση.

Η ενεργειακή φτώχεια στην Αθήνα ανέρχεται σε 17,5% των νοικοκυριών, τιμή τετραπλάσια αυτής της Helsinki (4,2%) και από τις υψηλότερες στην ΕΕ (Manioudis & Meramveliotakis, 2024). Η συγκυρία απορρέει από τη συνδυασμένη επίδραση της μακράς οικονομικής κρίσης, της παλαιότητας του κτιριακού αποθέματος και της αύξησης των τιμών ενέργειας κατά την περίοδο 2022 έως 2023. Η αντιμετώπιση απαιτεί στοχευμένες πολιτικές που να συνδυάζουν εισοδηματική στήριξη με ενεργειακή αναβάθμιση κατοικιών χαμηλού εισοδήματος, στο πρότυπο των προγραμμάτων Renovation Wave της ΕΕ (Sepetis et al., 2024).

Σε επίπεδο χωρικής ισότητας, η Αθήνα παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών συνοικιών. Οι εύπορες περιοχές του Κολωνακίου, της Φιλοθέης και του Ψυχικού αντιπαρατίθενται με υποβαθμισμένες περιοχές του κέντρου (Άγιος Παντελεήμονας, Κυψέλη, Πατήσια) και των δυτικών προαστίων (Αιγάλεω, Πετρούπολη), όπου συγκεντρώνονται κοινωνικά ευάλωτες ομάδες. Η εικόνα επιδεινώνεται από την έντονη τουριστικοποίηση μέσω βραχυχρόνιων μισθώσεων, η οποία αυξάνει τις τιμές κατοικίας και εντείνει τις πιέσεις στεγαστικής κρίσης (Vardopoulos & Passas, 2025).

Στον τομέα των μεταφορών ως κοινωνικού αγαθού, παρότι το δίκτυο του Μετρό έχει επεκταθεί σημαντικά, οι περιφερειακές συνοικίες και ιδίως οι δυτικές περιοχές υστερούν σε εξυπηρέτηση. Η ψηφιοποίηση των υπηρεσιών του ΟΑΣΑ μέσω της εφαρμογής ΟΑΣΑ Telematics και του ηλεκτρονικού εισιτηρίου ATH.ENA Card έχει βελτιώσει την εμπειρία του επιβάτη (Lymaxis & Georgiou, 2024). Η εγκληματικότητα (52 περιστατικά ανά 1.000 κατοίκους) παραμένει σε αποδεκτά επίπεδα για μεγάλη ευρωπαϊκή πρωτεύουσα. Συνολικά, η Social διάσταση αποτυπώνει μια κοινωνία υπό δομικό μετασχηματισμό, η οποία διατηρεί αποθέματα κοινωνικού κεφαλαίου μέσω οικογενειακών και τοπικών δικτύων αλληλεγγύης (Manioudis & Meramveliotakis, 2024).

Επικαιροποίηση δεικτών (2025–2026): Στην κοινωνική διάσταση, η ενεργειακή φτώχεια εμφανίζει αυξητική τάση, φθάνοντας το 19,0% (στοιχεία 2024, δημοσίευση 2026), ενώ η ανεργία σε εθνικό επίπεδο υποχώρησε στο 10,6% το Α' τρίμηνο του 2026. Το μερίδιο των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς στις καθημερινές μετακινήσεις εκτιμάται πλέον σε 36,5% βάσει του Σχεδίου Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας του Δήμου Αθηναίων, ενώ ο δείκτης αντιλαμβανόμενης εγκληματικότητας (Numbeo) διαμορφώνεται σε 55,2/100, στην κατηγορία «μέτριας εγκληματικότητας» (Eurostat, 2026· ΕΛΣΤΑΤ, 2026· Δήμος Αθηναίων, 2025).

6.3.3 Διάσταση Διακυβέρνησης (Governance ESG, G-Score)

Η διάσταση διακυβέρνησης στην Αθήνα αξιολογείται με συνολικό G-Score 61,8 στα 100, τιμή οριακά πάνω από το ευρωπαϊκό κατώφλι αναφοράς (≥ 60), αλλά σαφώς υπολειπόμενη του αντίστοιχου σκορ της Helsinki (78,0). Το αποτέλεσμα αντανakλά την πραγματικότητα μιας πόλης η οποία έχει ξεκινήσει ένα φιλόδοξο πρόγραμμα ψηφιακού μετασχηματισμού της δημόσιας διοίκησης, αλλά εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές θεσμικές παθογένειες (Sepetis et al., 2024). Το υψηλότερο G-Score εντοπίζεται στο υποσύστημα διακυβέρνησης (68/100), ακολουθούμενο από το υποσύστημα ψηφιακής υποδομής (66/100).

Σε επίπεδο ψηφιακής διακυβέρνησης, η ενιαία ψηφιακή πύλη gov.gr αποτελεί σημείο αναφοράς για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της Ελλάδας. Έως το έτος 2023, το 68% των δημοσίων υπηρεσιών είναι διαθέσιμες ψηφιακά μέσω της πύλης (EC, 2023), τιμή σημαντικά βελτιωμένη σε σχέση με το 30% του 2019, αλλά ακόμη χαμηλότερη από το 89% της Φινλανδίας. Η διαφάνεια της δημόσιας δαπάνης διασφαλίζεται μέσω της πλατφόρμας Διαύγεια, με βαθμολογία δείκτη 64/100 (Papafloratos & Fragidis, 2025).

Στον τομέα της συμμετοχικής διακυβέρνησης, η Αθήνα παρουσιάζει σχετική υστέρηση. Παρά την πλατφόρμα «ΣυνΑθηνά», η οποία λειτουργεί ως κόμβος συν δημιουργίας μεταξύ Δήμου και κοινωνίας πολιτών, το ποσοστό ενεργών πολιτών παραμένει χαμηλό στο 8%, σε σύγκριση με το 31% της Helsinki. Η χαμηλή συμμετοχή αντικατοπτρίζει το ψηφιακό χάσμα μεταξύ κοινωνικών ομάδων και την περιορισμένη παράδοση συμμετοχικής δημοκρατίας σε αστικό επίπεδο (Stefanidou et al., 2024). Η συμμόρφωση με ευρωπαϊκά πρότυπα βαθμολογείται σε επίπεδο 3 στα 5, αντανakλώντας μεταρρυθμίσεις και διαρκή ζητήματα διαφθοράς και γραφειοκρατικής αδράνειας, ενώ η ενσωμάτωση κριτηρίων ESG στη δημοτική διαχείριση φυσικών πόρων προσφέρει πρακτικό πλαίσιο για ενίσχυση της λογοδοσίας (Tanimanidis & Papaspyropoulos, 2026).

Επικαιροποίηση δεικτών (2025–2026): Στη διάσταση της διακυβέρνησης καταγράφεται ουσιαστική πρόοδος. Ο δείκτης ψηφιακής δημόσιας διοίκησης ανήλθε σε 50/100 (eGovernment Benchmark 2025), οι ψηφιακές συναλλαγές των πολιτών με το Δημόσιο έφτασαν τα 2,71 δισ. (αύξηση 86% έναντι του 2023), ενώ ο Δείκτης Αντίληψης Διαφθοράς της Ελλάδας διαμορφώθηκε σε 50/100 (56η θέση παγκοσμίως) το 2025. Η συμμετοχή των πολιτών, αποτυπωμένη πλέον και σε απόλυτα μεγέθη μέσω της πλατφόρμας «ΣυνΑθηνά» (~450 ομάδες, ~4.000 δράσεις), παραμένει το ασθενέστερο σημείο της διάστασης (European Commission, 2025· Transparency International, 2026· OECD, 2025).

6.4 Σύνθεση Αποτελεσμάτων και Αξιολόγηση Βιωσιμότητας

6.4.1 Ολοκληρωμένη Εικόνα Αστικής Βιωσιμότητας της Αθήνας

Η συνθετική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου ESG-DT αποφέρει για την Αθήνα συνολικό ESG Score 58,1 στα 100. Η τιμή αυτή τοποθετεί την πόλη κάτω από το ευρωπαϊκό κατώφλι «Καλής» επίδοσης ($\geq 70/100$), σε σαφή απόσταση από τον στόχο που έχει θέσει η ΕΕ για κλιματικά ουδέτερες και ψηφιακά ώριμες πόλεις ($\geq 85/100$). Η εικόνα που προκύπτει είναι αυτή μιας πόλης που απέχει ακόμη σημαντικά από τη βιωσιμότητα: παρά τη σαφή στρατηγική δέσμευση, καταγράφονται εκτεταμένες και βαθιά διαρθρωτικές υστερήσεις σε όλες τις διαστάσεις του πλαισίου.

Η αντιπαράβολή με τα αποτελέσματα της Helsinki (74,6/100) αναδεικνύει ένα χάσμα 16,5 μονάδων, το οποίο δεν είναι μόνο ποσοτικό αλλά και ποιοτικό. Ενώ η Helsinki αντιμετωπίζει συγκεκριμένες τεχνικές προκλήσεις, κυρίως στην απανθρακοποίηση της τηλεθέρμανσης, με σταθερή θεσμική και χωρική βάση, η Αθήνα αντιμετωπίζει ταυτόχρονα κλιματικά, υποδομικά, κοινωνικά και θεσμικά κενά. Η Environmental διάσταση (E-Score: 52,4) αναδεικνύεται ως η ασθενέστερη, ακολουθούμενη από τη Social (S-Score: 60,3) και τη Governance (G-Score: 61,8). Το πρότυπο αυτό αντιστρέφεται σε σχέση με τις σκανδιναβικές πόλεις, υποδηλώνοντας ότι η μετάβαση των μεσογειακών πόλεων προς τη βιωσιμότητα απαιτεί προσαρμογή στις γεωγραφικές και κοινωνικοοικονομικές ιδιαιτερότητες της Νότιας Ευρώπης.

Η εσωτερική ισορροπία των τριών διαστάσεων στην Αθήνα παρουσιάζει σχετική συμμετρία, με χάσμα Environmental έναντι Governance μόλις 9,4 μονάδων. Παρά την εμφανή υστέρηση σε όλες τις διαστάσεις, η Αθήνα δεν παρουσιάζει το σύνδρομο της «ψηφιακής βιτρίνας» που χαρακτηρίζει ορισμένες πόλεις. Αντίθετα, η αξιολόγηση είναι ομοιόμορφα μέτρια, υποδηλώνοντας ότι η μετάβαση προς τη βιωσιμότητα απαιτεί ολιστική παρέμβαση και όχι αποσπασματικές δράσεις. Τα ευρήματα συνάδουν με τη μελέτη των Boufounou et al. (2024), η οποία αναδεικνύει το διαρθρωτικό κενό μεταξύ της πολιτικής φιλοδοξίας και της επιχειρησιακής υλοποίησης στις ελληνικές έξυπνες πόλεις (Kalfas et al., 2025).

6.4.2 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων βάσει Προτύπων Αναφοράς

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τη συγκριτική αξιολόγηση των κύριων αποτελεσμάτων της Αθήνας έναντι των ευρωπαϊκών προτύπων αναφοράς και της περίπτωσης Helsinki. Η σύγκριση επιτρέπει τον εντοπισμό των κρίσιμων χασμάτων (gap analysis) που πρέπει να καλυφθούν για να επιτευχθεί η βιωσιμότητα.

Πίνακας 8. Συγκριτική Αξιολόγηση ESG Αποτελεσμάτων Αθήνας έναντι Helsinki και Ευρωπαϊκών Προτύπων Αναφοράς. Πηγή: Ιδία επεξεργασία

Δείκτης Αξιολόγησης	Αθήνα (DT-ESG)	Helsinki (DT-ESG)	EU Best Practice	Αξιολόγηση
Σύνθετο ESG Score	58,1 / 100	74,6 / 100	≥ 70 («Καλή»)	Κάτω από τον στόχο
Environmental Score	52,4 / 100	71,6 / 100	≥ 75	Σημαντική υστέρηση
Social Score	60,3 / 100	74,2 / 100	≥ 70	Οριακά εκτός στόχου
Governance Score	61,8 / 100	78,0 / 100	≥ 70	Σχετική υστέρηση
Ποσοστό ΑΠΕ	22%	47%	≥ 65% (2030)	Κρίσιμη υστέρηση
Πράσινοι χώροι (m ² /κάτ.)	2,5	28,3	≥ 18	Κρίσιμη υστέρηση
Ενεργειακή φτώχεια (%)	17,5%	4,2%	≤ 6%	Σημαντικό κενό
Συμμετοχή πολιτών	8%	31%	≥ 20%	Σαφής υστέρηση

Από τα δεδομένα του Πίνακα 8 αναδεικνύονται τρία κρίσιμότερα χάσματα. Πρώτον, το ποσοστό ΑΠΕ της Αθήνας (22%) απέχει σημαντικά τόσο από το αντίστοιχο της Helsinki (47%) όσο και από τον ευρωπαϊκό στόχο (65% έως το 2030). Το χάσμα αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα μιας πόλης που εξαρτάται από εθνικές πολιτικές ενεργειακής μετάβασης, οι οποίες απαιτούν επενδύσεις σε δίκτυα, αποθήκευση και έξυπνη διαχείριση (Kalfas et al., 2025). Δεύτερον, οι πράσινοι χώροι ανά κάτοικο (2,5 m²) είναι μόλις ένα ένατο αντίστοιχων της Helsinki (28,3 m²), καθιστώντας τη δενδροφύτευση κρίσιμη πολιτική προτεραιότητα. Τρίτον, η ενεργειακή φτώχεια (17,5%) είναι τετραπλάσια της αντίστοιχης της Helsinki (4,2%), αναδεικνύοντας την κοινωνική διάσταση της κλιματικής κρίσης.

Η ανάλυση ενσωματώνεται στη βιβλιογραφική συζήτηση για την «Ευρώπη δύο ταχυτήτων» στη βιώσιμη αστική ανάπτυξη, στην οποία οι βόρειες πόλεις προηγούνται σαφώς των μεσογειακών (Vardoulis & Passas, 2025). Ωστόσο, η κλιματική τρωτότητα των νότιων πόλεων, σε συνδυασμό με την ταχεία ψηφιακή ωρίμανση που παρατηρείται την τελευταία πενταετία, καθιστά τις μεσογειακές πρωτεύουσες κρίσιμα πεδία επένδυσης για τη βιώσιμη Ευρώπη του 2030. Η Αθήνα διαθέτει ορισμένες από τις βασικές προϋποθέσεις για μια απαιτητική και μακρόπνοη μετάβαση, εφόσον υλοποιηθούν στοχευμένες παρεμβάσεις και διασφαλιστεί η αναγκαία χρηματοδοτική ροή μέσω εθνικών και ευρωπαϊκών εργαλείων (Manioudis & Meramveliotakis, 2024).

6.4.3 Συμπεράσματα Βιωσιμότητας: Είναι η Αθήνα Βιώσιμη Έξυπνη Πόλη;

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου ESG-DT επιτρέπουν τη διατύπωση μιας σαφούς και τεκμηριωμένης απάντησης: η Αθήνα δεν πληροί σήμερα τα κριτήρια ολοκληρωμένης αστικής βιωσιμότητας, όπως αυτά ορίζονται στο ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο, και απέχει ακόμη σημαντικά από την επίτευξή της. Το συνολικό ESG Score 58,1 στα 100 βρίσκεται κάτω από όλα τα κρίσιμα κατώφλια αξιολόγησης: το «Καλό» (≥ 70), το «Πολύ Καλό» (≥ 80) και το «Άριστο» (≥ 85). Η απόσταση από το κατώφλι της «Καλής» επίδοσης δεν είναι οριακή αλλά ουσιώδης — σχεδόν δώδεκα μονάδες — γεγονός που καταδεικνύει ότι η βιωσιμότητα της πόλης δεν αποτελεί εγγύς ή αυτονόητο στόχο. Η διαπίστωση αυτή δεν ισοδυναμεί με χαρακτηρισμό της Αθήνας ως εγγενώς «μη βιώσιμης» πόλης· αποτυπώνει, ωστόσο, ότι οι υστερήσεις είναι βαθιές, δομικές και διάχυτες σε όλες τις διαστάσεις, και ότι η γεφύρωσή τους προϋποθέτει μακρόπνοη, συστηματική και συντονισμένη προσπάθεια, και όχι απλώς τη συνέχιση των υφιστάμενων πρωτοβουλιών. Ακριβώς εντοπίζοντας με ποσοτική ακρίβεια το εύρος και το βάθος αυτών των υστερήσεων, το

μοντέλο ESG-DT επιβεβαιώνει τη διαγνωστική του αξία ως εργαλείο ανάγνωσης της αστικής βιωσιμότητας.

Τέσσερις κρίσιμες διαπιστώσεις προκύπτουν από την ανάλυση. Πρώτον, η Environmental διάσταση (E-Score: 52,4) αποτελεί το ασθενέστερο σημείο της πόλης, με κρίσιμα ελλείμματα στις ΑΠΕ, τους πράσινους χώρους και την ανακύκλωση. Δεύτερον, οι ψηφιακές υποδομές παραμένουν κατακερματισμένες σε σύγκριση με ολοκληρωμένες πλατφόρμες όπως το Helsinki 3D+, παρά την πρόοδο των επιμέρους εφαρμογών (Evangelou et al., 2022; Tsaimou et al., 2026). Τρίτον, οι κοινωνικές ανισότητες εντείνονται από την τουριστικοποίηση και τη στεγαστική κρίση. Τέταρτον, η θεσμική ικανότητα υπάρχει αλλά εμποδίζεται από γραφειοκρατικές παθογένειες, χαμηλή συμμετοχή πολιτών και ανεπαρκή συντονισμό μεταξύ των επιπέδων διακυβέρνησης (Stefanidou et al., 2024).

Παρά τις διαπιστώσεις αυτές, η Αθήνα διαθέτει σημαντικά συγκριτικά πλεονεκτήματα, τα οποία δεν αναιρούν το μέγεθος του χάσματος αλλά προσφέρουν τη βάση για μια απαιτητική και μακρόπνοη πορεία μετάβασης. Η συμμετοχή στην ευρωπαϊκή αποστολή των «100 Climate Neutral Cities», η ύπαρξη επιστημονικού δυναμικού στα εθνικά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα, η αυξανόμενη ωρίμανση των ελληνικών startups σε τομείς smart city, η πολιτιστική παράδοση που υποστηρίζει την κοινωνική συνοχή και η συμπερίληψη της Αθήνας σε διεθνή δίκτυα όπως το C40 Cities συνθέτουν ένα υπόβαθρο για την ενεργοποίηση αυτής της πορείας (Kalfas et al., 2025). Η σημερινή απόσταση της πόλης από τη βιωσιμότητα δεν αποτελεί προδιαγραφή του μέλλοντος· συνιστά, ωστόσο, επείγον κάλεσμα για βαθιά διαρθρωτική μεταρρύθμιση και στοχευμένη, επίμονη πολιτική δράση, της οποίας τα αποτελέσματα θα αποτυπωθούν σταδιακά και σε βάθος χρόνου.

6.4.4 Προτεινόμενα Βήματα Μετάβασης της Αθήνας προς τη Βιωσιμότητα

Βάσει της ανάλυσης που προηγήθηκε, διατυπώνεται ένας οδικός χάρτης μιας ολοκληρωμένης δέσμης συγκεκριμένων βημάτων, ομαδοποιημένων σε τρεις στρατηγικούς άξονες, οι οποίοι αντιστοιχούν στις τρεις διαστάσεις του μοντέλου ESG. Ο πρώτος άξονας αφορά τον περιβαλλοντικό μετασχηματισμό και περιλαμβάνει τρία βήματα. Πρώτο βήμα αποτελεί η επιτάχυνση της διεύθυνσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της Αττικής, με στόχο 50% έως το 2030, μέσω επενδύσεων σε φωτοβολταϊκά πάρκα, αιολικές εγκαταστάσεις και ενεργειακές κοινότητες σε δημοτικό επίπεδο. Η εκτιμώμενη αύξηση του E-Score από την ολοκλήρωση αυτής της παρέμβασης ανέρχεται σε 8 έως 10 μονάδες (Boufounou et al., 2024). Δεύτερο βήμα είναι η υλοποίηση εκτεταμένου προγράμματος αύξησης πράσινου χώρου, με στόχο 10 m² ανά κάτοικο μέχρι το 2035 μέσω δενδροφύτευσης, αστικών πάρκων και πράσινων στεγών (Tanimanidis & Papaspyropoulos, 2026). Τρίτο βήμα είναι η ριζική αναμόρφωση του συστήματος διαχείρισης αποβλήτων με στόχο ανακύκλωση 50% έως το 2030, μέσω τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT).

Πέραν της δενδροφύτευσης, ο περιβαλλοντικός άξονας ενισχύεται με μια δέσμη συμπληρωματικών μέτρων για την αύξηση του πράσινου ανά κάτοικο. Σε αυτά περιλαμβάνονται η συστηματική αποξήλωση αδιαπέραστων επιφανειών από τσιμέντο και άσφαλτο (de-paving) σε πλατείες, σχολικές αυλές και πεζοδρόμια· η δημιουργία δικτύου μικρών χώρων πρασίνου «τσέπης» (pocket parks) σε αδόμητα ή εγκαταλελειμμένα οικόπεδα του πυκνοδομημένου κέντρου· καθώς και η θεσμοθέτηση υποχρεωτικού ποσοστού πράσινου (πράσινες στέγες, κάθετοι κήποι, φύτευση κοινοχρήστων χώρων) ως όρου για την έκδοση νέων οικοδομικών αδειών. Τα μέτρα αυτά, πέραν της άμβλυνσης του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας, ενισχύουν τη διαπερατότητα του εδάφους και την ανθεκτικότητα της πόλης στα πλημμυρικά φαινόμενα (Santamouris et al., 2020· Tanimanidis & Papaspyropoulos, 2026).

Ο δεύτερος άξονας αφορά την κοινωνική συνοχή και τη χωρική δικαιοσύνη. Τέταρτο βήμα είναι η αναβάθμιση των ΜΜΜ στις δυτικές και ανατολικές υποβαθμισμένες περιοχές, μέσω επέκτασης του Μετρό (γραμμή 4), εκσυγχρονισμού του τραμ και υιοθέτησης ηλεκτρικών λεωφορείων από τον ΟΑΣΑ. Πέμπτο βήμα είναι η εφαρμογή ενός εθνικού προγράμματος ενεργειακής αναβάθμισης κατοικιών χαμηλού εισοδήματος, με στόχο τη μείωση της ενεργειακής φτώχειας από το 17,5% στο 8% έως το 2030 (Manioudis & Meramveliotakis, 2024). Παράλληλα, απαιτείται ρύθμιση της αγοράς βραχυχρόνιας μίσθωσης για τη συγκράτηση της στεγαστικής πίεσης και τη διασφάλιση της κοινωνικής συνοχής.

Ο άξονας της κινητικότητας διευρύνεται με δύο ακόμη κατευθύνσεις. Πρώτον, τη στοχευμένη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, μέσω επέκτασης της ελεγχόμενης στάθμευσης, δημιουργίας Ζωνών Χαμηλών Εκπομπών (Low Emission Zones), πεζοδρομήσεων και ενός συνεκτικού δικτύου ποδηλατοδρόμων, ώστε το μερίδιο του ιδιωτικού αυτοκινήτου να υποχωρήσει κάτω από το 35% και το αντίστοιχο των ήπιων μορφών μετακίνησης να διπλασιαστεί. Δεύτερον, και κρίσιμότερα, την ουσιαστική αναβάθμιση των σταθερών μέσων μαζικής μεταφοράς με έμφαση στον προαστιακό/περιφερειακό σιδηρόδρομο, ο οποίος σήμερα υπολείπεται: η επέκταση, η αύξηση της συχνότητας και η καλύτερη διασύνδεση των γραμμών του Προαστιακού προς και από την περιφέρεια της Αττικής μπορεί να αποσυμφορήσει το οδικό δίκτυο, να συνδέσει αποτελεσματικά τα προάστια με το κέντρο και να μειώσει τη χωρική ανισότητα στην πρόσβαση σε βιώσιμη μετακίνηση.

Ενδεικτικό μέτρο σύγκρισης για το μέγεθος αυτής της υστέρησης αποτελεί το περιφερειακό σιδηροδρομικό δίκτυο του Παρισιού. Το δίκτυο RER (Réseau Express Régional) αριθμεί πέντε γραμμές, περίπου 590–600 χιλιόμετρα και 257 σταθμούς, μεταφέροντας περί τα 2,7 εκατομμύρια επιβάτες ημερησίως (περίπου 983 εκατομμύρια επιβάτες ετησίως το 2019). Σε συνδυασμό με το ευρύτερο δίκτυο Transilien, το περιφερειακό σιδηροδρομικό σύστημα της Île-de-France εκτείνεται σε περίπου 1.300 χιλιόμετρα με σχεδόν 390 σταθμούς και εξυπηρετεί περί τα 3,4 εκατομμύρια επιβάτες κάθε εργάσιμη ημέρα, αποτελώντας —σύμφωνα με τη SNCF— το δεύτερο πιο πολυσύχναστο δίκτυο μαζικής σιδηροδρομικής μεταφοράς παγκοσμίως μετά το Τόκιο, σε μια περιφέρεια περίπου 12 εκατομμυρίων κατοίκων (Île-de-France Mobilités & SNCF Transilien, 2024). Η αντιπαράβολή —τηρουμένων των αναλογιών ως προς το μέγεθος και τους πόρους των δύο μητροπόλεων— αναδεικνύει ότι η ανάπτυξη ενός πυκνού και υψηλής συχνότητας περιφερειακού σιδηροδρόμου αποτελεί ρεαλιστικό, αν και μακρόπνοο, στρατηγικό στόχο για τη μητροπολιτική Αθήνα.

Τέλος, στον άξονα της χωρικής δικαιοσύνης προστίθεται ένα νέο, διακριτό βήμα: η αποσυμφόρηση του πληθυσμού του πυκνοδομημένου αστικού κέντρου μέσω κινήτρων αποκεντρώσης. Η υπερσυγκέντρωση πληθυσμού και δραστηριοτήτων στο λεκανοπέδιο επιτείνει τη θερμική νησίδα, την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τη στεγαστική πίεση. Προτείνονται φορολογικά και αναπτυξιακά κίνητρα για τη μετεγκατάσταση δημόσιων υπηρεσιών, επιχειρήσεων και κατοίκων προς περιφερειακά αστικά κέντρα και ημιαστικές περιοχές· η ανάπτυξη υποδομών τηλεργασίας και «κόμβων» απομακρυσμένης εργασίας· καθώς και η ενίσχυση των μεσαίων πόλεων της περιφέρειας ως πόλων ισόρροπης χωρικής ανάπτυξης. Η αποσυμφόρηση, σε συνδυασμό με την αναβάθμιση του περιφερειακού σιδηροδρόμου, λειτουργεί ως πολλαπλασιαστής των υπόλοιπων περιβαλλοντικών και κοινωνικών παρεμβάσεων.

Ο τρίτος άξονας αφορά τον ψηφιακό και θεσμικό εκσυγχρονισμό. Έκτο βήμα είναι η ανάπτυξη ενός πραγματικού αστικού ψηφιακού διδύμου για την Αθήνα (Athens Digital Twin 1.0), το οποίο να ενσωματώνει δεδομένα από όλα τα υποσυστήματα και να συνδέεται με το πλαίσιο ESG-DT, αξιοποιώντας την εμπειρία που έχει συσσωρευτεί στα ευρωπαϊκά ερευνητικά έργα και την τεχνογνωσία των ελληνικών πανεπιστημίων (Vallès et al., 2024; Evangelou et al., 2022). Έβδομο βήμα είναι η ενίσχυση του συμμετοχικού προϋπολογισμού και η διασύνδεση της πλατφόρμας «ΣυνΑθήνα» με το ψηφιακό δίδυμο, με στόχο αύξηση της συμμετοχής πολιτών από το 8% στο 25% έως το 2030 (Stefanidou et al., 2024).

Η ολοκληρωμένη εφαρμογή της διευρυμένης αυτής δέσμης βημάτων εκτιμάται ότι θα μπορούσε να οδηγήσει σταδιακά σε συνολικό ESG Score μεταξύ 73 και 76 στα 100. Πρόκειται, ωστόσο, για έναν φιλόδοξο και μακροπρόθεσμο στόχο, η επίτευξη του οποίου προϋποθέτει την πλήρη, συντονισμένη και επίμονη υλοποίηση όλων των παρεμβάσεων σε χρονικό ορίζοντα που εκτείνεται πέραν του 2030, και όχι μια βεβαιότητα εντός της τρέχουσας δεκαετίας. Ακόμη και υπό αυτή την προϋπόθεση, η Αθήνα θα εξακολουθεί να απέχει από τα κορυφαία ευρωπαϊκά πρότυπα, γεγονός που υπογραμμίζει το βάθος της απαιτούμενης διαρθρωτικής μεταρρύθμισης. Σε κάθε περίπτωση, το μοντέλο ESG-DT δεν αποτελεί μόνο εργαλείο διάγνωσης αλλά και πυξίδα στρατηγικής, ικανή να καθοδηγήσει τη σταδιακή μετάβαση προς μια πιο βιώσιμη έξυπνη πόλη (Kalfas et al., 2025· Vardopoulos & Passas, 2025). Η συστηματική παρακολούθηση των δεικτών μέσω του ψηφιακού διδύμου επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων από τους στόχους και την προσαρμογή των πολιτικών σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας έτσι ότι η αστική μετάβαση

αποτελεί δομικό στοιχείο της αστικής διακυβέρνησης. Η περίπτωση της Αθήνας τεκμηριώνει την αξία ενός εννοιολογικού πλαισίου που συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία του ψηφιακού διδύμου με την κανονιστική σαφήνεια των κριτηρίων ESG, προσφέροντας ένα γενικεύσιμο μοντέλο για διαφορετικά αστικά οικοσυστήματα σε όλη την Ευρώπη.

7. Συζήτηση

7.1 Ανακεφαλαίωση Κεντρικών Ευρημάτων και Σύνδεση με τα Ερευνητικά Ερωτήματα

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης αναδεικνύουν ότι η ενσωμάτωση ESG δεικτών σε ένα εννοιολογικό πλαίσιο ψηφιακού διδύμου αστικής βιωσιμότητας είναι μεθοδολογικά εφικτή, θεωρητικά τεκμηριωμένη και πρακτικά εφαρμόσιμη σε ευρωπαϊκές έξυπνες πόλεις. Το συνολικό ESG Score της Helsinki (74,6/100), με Governance Score 78,0, Social Score 74,2 και Environmental Score 71,6, παρουσιάζει μια ισόρροπη αλλά διαφοροποιημένη επίδοση που επιβεβαιώνει τόσο τις δυνατότητες της πόλης όσο και τα δομικά της ελλείμματα. Τα ευρήματα αυτά ανταποκρίνονται άμεσα στα τέσσερα ερευνητικά ερωτήματα της μελέτης: αναδεικνύουν τους σημαντικότερους ESG δείκτες για αστικά συστήματα, χαρτογραφούν τους τομείς αστικής λειτουργίας με τη μεγαλύτερη πληροφοριακή πυκνότητα, αποδεικνύουν ότι η ολοκληρωμένη ενσωμάτωση ESG σε ψηφιακό δίδυμο παράγει ερμηνεύσιμα αποτελέσματα και εξάγουν λειτουργικές προϋποθέσεις εφαρμογής. Η επίτευξη αυτών των στόχων μέσω συστηματικής ανασκόπησης PRISMA και εννοιολογικής μοντελοποίησης, χωρίς πρωτογενή εμπειρική έρευνα, αποτελεί από μόνη της μεθοδολογική επιλογή με σαφείς συνέπειες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, στις οποίες επανερχόμαστε στις επόμενες ενότητες.

Η επέκταση της εφαρμογής στην Αθήνα, που παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6, παρέχει μια δεύτερη και ποιοτικά διαφορετική επαλήθευση του μοντέλου. Το συνολικό ESG Score της Αθήνας (58,1/100), με Governance Score 61,8, Social Score 60,3 και Environmental Score 52,4, αποτυπώνει μια πόλη που απέχει ακόμη σημαντικά από τη βιωσιμότητα, η οποία διαθέτει σαφή στρατηγική δέσμευση αλλά και εκτεταμένες, βαθιά διαρθρωτικές υστερήσεις. Η αντιπαράβολή των δύο πόλεων δεν λειτουργεί ως άσκηση ιεράρχησης αλλά ως εργαλείο ανάδειξης διαφορετικών αναπτυξιακών τροχιών, επιβεβαιώνοντας την αναγκαιότητα ενός ευέλικτου μοντέλου που να αποτυπώνει τις ιδιαιτερότητες κάθε αστικού οικοσυστήματος χωρίς να καταφεύγει σε ομογενοποιημένα πρότυπα αξιολόγησης. Συνεπώς, η συγκριτική προσέγγιση τεκμηριώνει τη γενικευσιμότητα του μοντέλου ESG-DT σε διαφορετικά ευρωπαϊκά συμφραζόμενα.

7.2 Η Σχέση ESG Δεικτών και Αστικής Βιωσιμότητας υπό Κριτικό Πρίσμα

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα της μελέτης είναι η επιβεβαίωση ότι οι ESG δείκτες μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά ως εργαλεία αστικής αξιολόγησης, εφόσον προσαρμοστούν στις ιδιαιτερότητες του δημόσιου και αστικού τομέα. Ωστόσο, η διαδικασία αυτής της προσαρμογής είναι πολύ πιο σύνθετη από ό,τι υπονοείται σε ορισμένες εισαγωγικές προσεγγίσεις της βιβλιογραφίας. Το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης ανέδειξε ότι οι ESG δείκτες αρχικά σχεδιάστηκαν για την αξιολόγηση εταιρικής επίδοσης και η μεταφορά τους στον δημόσιο τομέα απαιτεί ουσιαστική εννοιολογική επαναδιατύπωση (Κοσμανονά & Δοčekalονά, 2012; Domaniόνι, 2022). Τα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης επιβεβαιώνουν αυτή την πρόκληση: οι μελέτες που εξέτασαν τους ESG δείκτες αποκλειστικά σε εταιρικό πλαίσιο αποκλείστηκαν συστηματικά, αναδεικνύοντας ότι η αστική ESG βιβλιογραφία παραμένει ακόμη σχετικά περιορισμένη σε σύγκριση με την εταιρική.

Εξαιρετικά κρίσιμη κρίνεται η παρατήρηση των Zubizarreta και Aquino (2026) ότι η εφαρμογή ESG δεικτών σε αστικό πλαίσιο κινδυνεύει να αναπαραγάγει χωρικές ανισότητες, εάν δεν λαμβάνει υπόψη τη γεωγραφική κατανομή των ευεργετημάτων και των επιβαρύνσεων της αστικής ανάπτυξης. Στην περίπτωση της Helsinki, η εφαρμογή του μοντέλου επιβεβαίωσε αυτόν τον κίνδυνο: οι μέσες τιμές των ESG δεικτών σε επίπεδο πόλης αποκρύπτουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών συνοικιών, ιδίως στη Social ESG διάσταση, όπως τεκμηριώνουν οι Casali et al. (2021). Το εύρημα αυτό συνδέεται άμεσα με τη βιβλιογραφία για τον αστικό μετασχηματισμό, η οποία υπογραμμίζει ότι η βιωσιμότητα δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς παράλληλη αντιμετώπιση των κοινωνικών ανισοτήτων (Crane et al., 2021). Η συνολική βαθμολογία, επομένως, ενώ αποτελεί χρήσιμο δείκτη συγκριτικής αξιολόγησης, δεν

υποκαθιστά τη χωρικά διαφοροποιημένη ανάλυση που απαιτείται για τη χάραξη στοχευμένων πολιτικών.

Η περίπτωση της Αθήνας ενισχύει σημαντικά αυτή την κριτική παρατήρηση. Η εφαρμογή του μοντέλου ανέδειξε ότι οι ανισότητες μεταξύ κεντρικών και περιφερειακών συνοικιών (Κολωνάκι, Φιλοθέη έναντι Αγίου Παντελεήμονα, Κυψέλης και δυτικών προαστίων) αποτελούν δομικό χαρακτηριστικό της μεσογειακής αστικής πραγματικότητας, που εντείνεται από φαινόμενα τουριστικοποίησης και στεγαστικής κρίσης (Vardopoulos & Passas, 2025). Η μέτρηση ESG σε επίπεδο πόλης, ενώ παρέχει χρήσιμη συγκριτική εικόνα, αποκρύπτει την ένταση των ενδοαστικών διαφοροποιήσεων που είναι κρίσιμες για τη χάραξη πολιτικών χωρικής δικαιοσύνης. Συνεπώς, η συγκριτική αξιολόγηση Helsinki και Αθήνας τεκμηριώνει ότι η αστική βιωσιμότητα απαιτεί πολυκλιμακωτή ανάλυση, η οποία να αντιμετωπίζει τόσο τις μέσες τιμές όσο και τις χωρικές αποκλίσεις εντός κάθε πόλης (Manioudis & Meramveliotakis, 2024).

7.3 Ψηφιακά Δίδυμα και ESG: Δυνατότητες και Όρια της Ενσωμάτωσης

Το προτεινόμενο μοντέλο ESG-DT αποδεικνύει ότι η ενσωμάτωση ESG δεικτών σε αρχιτεκτονική ψηφιακού διδύμου είναι εννοιολογικά συνεκτική και λειτουργικά εφαρμόσιμη. Η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 4 ανταποκρίνεται στην πρόκληση σύνθεσης ετερογενών δεδομένων, την οποία η Mazzetto (2024) εντοπίζει ως έναν από τους κεντρικούς περιορισμούς των υφιστάμενων αστικών DT. Ωστόσο, η κριτική ανάγνωση των αποτελεσμάτων αναδεικνύει ένα σημαντικό χάσμα μεταξύ εννοιολογικής επάρκειας και πρακτικής υλοποίησης.

Οι Tzachor et al. (2022) στη σημαντική τους μελέτη στο Nature Sustainability υπογραμμίζουν ότι τα ψηφιακά δίδυμα, παρά τις δυνατότητές τους για επίτευξη των SDGs, ενδέχεται να λειτουργήσουν αντίρροπα εάν η πρόσβαση στα δεδομένα και τα οφέλη τους κατανέμεται άνισα. Αυτή η κριτική διάσταση απουσιάζει συχνά από τον ενθουσιασμό που συνοδεύει τις εφαρμογές DT, αλλά τα ευρήματα της παρούσας μελέτης την αναδεικνύουν ως άκρως σχετική. Στην Helsinki, για παράδειγμα, οι περιφερειακές συνοικίες με χαμηλότερη κοινωνική επίδοση είναι ταυτόχρονα αυτές που υποαντιπροσωπεύονται στα ψηφιακά δεδομένα συμμετοχής πολιτών (31% ενεργός συμμετοχή), δημιουργώντας έναν κύκλο υπο-αναπαράστασης που μπορεί να διαιωνίζει και όχι να μειώνει τις ανισότητες.

Παράλληλα, οι De Jaeger και Swerts (2026) αναδεικνύουν ότι οι αρχιτεκτονικές επιλογές (limits-by-design) ενός DT καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό ποιοι πολίτες έχουν πρόσβαση στις πληροφορίες και ποιοι αποκλείονται από την ουσιαστική συμμετοχή. Το εύρημα αυτό συνδέεται άμεσα με τη Governance ESG διάσταση του μοντέλου: υψηλές βαθμολογίες στους δείκτες ψηφιακής διακυβέρνησης δεν αντανακλούν απαραίτητα πραγματική δημοκρατική ποιότητα, εάν η ψηφιακή συμμετοχή παραμένει προνόμιο συγκεκριμένων κοινωνικών ομάδων. Η κριτική αυτή αναδεικνύει ένα δομικό ζήτημα που δεν αντιμετωπίζεται επαρκώς από τα τυπικά πλαίσια ESG βαθμολόγησης.

Η εφαρμογή στην Αθήνα ανέδειξε με σαφήνεια αυτό το χάσμα μεταξύ εννοιολογικής επάρκειας και πρακτικής υλοποίησης. Σε αντίθεση με τη συγκεντρωτική πλατφόρμα Helsinki Region Infoshare, η Αθήνα στηρίζεται σε ένα κατακερματισμένο δεδομοκεντρικό οικοσύστημα, με πολλαπλούς θεσμικούς φορείς, διαφορετικές μορφές δεδομένων και ασύμμετρη συχνότητα ενημέρωσης. Παρά την παρουσία επιμέρους πρωτοβουλιών όπως το έργο PRECINCT (Lymaxis & Georgiou, 2024) και τις προσπάθειες ανάπτυξης ψηφιακού διδύμου για το λιμάνι του Πειραιά (Tsaimou et al., 2026), η απουσία ολοκληρωμένου αστικού ψηφιακού διδύμου περιορίζει σημαντικά την επιχειρησιακή χρησιμότητα του μοντέλου σε πραγματικό χρόνο. Η περίπτωση της Αθήνας υπογραμμίζει ότι το πλαίσιο ESG-DT, για να ξεπεράσει την εννοιολογική του διάσταση και να αποκτήσει λειτουργική αξία, απαιτεί παράλληλη επένδυση σε ψηφιακή υποδομή, διαλειτουργικότητα και θεσμική ολοκλήρωση των δεδομένων (Kalfas et al., 2025; Evangelou et al., 2022).

7.4 Η Governance-Environmental Συνεργασία: Εύρημα ή Τεχνούργημα Μέτρησης;

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ευρήματα της εφαρμογής στη Helsinki είναι η ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ Governance ESG (G-Score: 78,0) και Environmental ESG (E-Score: 71,6), η

οποία αναδεικνύει τη διακυβέρνηση ως καταλύτη περιβαλλοντικής επίδοσης. Το εύρημα αυτό ευθυγραμμίζεται με τη βιβλιογραφία για τη σχέση θεσμικής ποιότητας και αστικής βιωσιμότητας (Esmailpour et al., 2021), αλλά χρήζει κριτικής επανεξέτασης.

Υπάρχει το ερώτημα αν η συσχέτιση αυτή αντανάκλα πραγματική αιτιώδη σχέση ή αποτελεί εν μέρει τεχνούργημα της μεθοδολογίας μέτρησης. Οι πόλεις με υψηλές επιδόσεις στη Governance ESG τείνουν επίσης να διαθέτουν καλύτερα συστήματα καταγραφής περιβαλλοντικών δεδομένων, πράγμα που σημαίνει ότι οι υψηλότερες βαθμολογίες τους ενδέχεται να αντικατοπτρίζουν εν μέρει τη μεγαλύτερη διαφάνεια και όχι αποκλειστικά την καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση (Wacławik et al., 2025). Στην περίπτωση της Helsinki, η εξαιρετική πλατφόρμα ανοικτών δεδομένων HRI (Jaakola et al., 2015) εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα δεδομένων σε όλους τους τομείς, γεγονός που πιθανώς ευνοεί τις πόλεις με ανεπτυγμένες ψηφιακές υποδομές έναντι εκείνων με καλύτερες πραγματικές περιβαλλοντικές επιδόσεις αλλά ανεπαρκή συστήματα δεδομένων.

Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται με το ευρύτερο ζήτημα που θέτουν οι Radzi et al. (2026) για την ανομοιογένεια των ESG πρακτικών αναφοράς στο δομημένο περιβάλλον: πόλεις που επενδύουν περισσότερο στη μέτρηση και αναφορά ESG δεδομένων εμφανίζονται να αποδίδουν καλύτερα, ακόμη και αν οι πραγματικές τους επιδόσεις είναι συγκρίσιμες με λιγότερο «μετρήσιμες» πόλεις. Αυτό αποτελεί δομική αδυναμία των ESG συστημάτων αξιολόγησης που δεν επιλύεται από την παρούσα μελέτη, αλλά τίθεται ως πρόκληση για μελλοντική έρευνα.

Η περίπτωση της Αθήνας προσφέρει επιπλέον υλικό για αυτή την κριτική εξέταση. Με G-Score 61,8 και E-Score 52,4, η Αθήνα διατηρεί την ίδια κατευθυντική σχέση μεταξύ Governance και Environmental επίδοσης που παρατηρήθηκε στη Helsinki, αν και σε σαφώς χαμηλότερο επίπεδο. Το εύρημα αυτό ενισχύει την υπόθεση ότι η ποιότητα της διακυβέρνησης λειτουργεί ως καταλύτης περιβαλλοντικής επίδοσης, αλλά αναδεικνύει επίσης ότι σε πόλεις μεσαίας ψηφιακής ωριμότητας το χάσμα μεταξύ των δύο διαστάσεων παραμένει σχετικά σταθερό. Η συγκριτική παρατήρηση υποδηλώνει ότι το ζήτημα της μετρησιμότητας, που τίθεται από τους Wacławik et al. (2025), συνεχίζει να επηρεάζει τις αστικές αξιολογήσεις και στις λιγότερο ψηφιακά ώριμες πόλεις. Αυτό ενισχύει την ανάγκη για πιο εξελιγμένα και χωρικά διαφοροποιημένα συστήματα συλλογής δεδομένων στις μεσογειακές πρωτεύουσες, ώστε οι ESG αξιολογήσεις να αντικατοπτρίζουν την πραγματική περιβαλλοντική επίδοση και όχι μόνο την ωριμότητα των συστημάτων μέτρησης.

7.5 Περιορισμοί της Μελέτης και Επιπτώσεις για την Ερμηνεία

Η κριτική αναστοχαστικότητα απαιτεί την αναγνώριση των περιορισμών που χαρακτηρίζουν την παρούσα μελέτη. Πρώτον, η εννοιολογική φύση του μοντέλου σημαίνει ότι οι ESG βαθμολογίες που παρουσιάστηκαν για τη Helsinki έχουν μερικώς εκτιμητικό χαρακτήρα και δεν βασίζονται σε πλήρως επικυρωμένα δεδομένα πραγματικού χρόνου. Η χρήση proxy data για ορισμένες παραμέτρους, ιδίως στη Social ESG διάσταση, εισάγει αβεβαιότητα που οι Mabrouk et al. (2025) αναγνωρίζουν ως δομική πρόκληση ακόμη και για πόλεις με υψηλή ωριμότητα δεδομένων.

Δεύτερον, η επιλογή της Helsinki ως μοναδικής περίπτωσης εφαρμογής εισάγει περιορισμούς γενικευσιμότητας. Η Helsinki αποτελεί εξαιρετικά ευνοϊκό πλαίσιο εφαρμογής, υψηλή ψηφιακή ωριμότητα, ανεπτυγμένη πλατφόρμα ανοικτών δεδομένων, ισχυρή θεσμική ικανότητα, γεγονός που δεν αντανάκλα την πραγματικότητα της πλειονότητας των ευρωπαϊκών πόλεων. Ο Turmunkh (2025) επισημαίνει ότι ακόμη και στη Helsinki, η διαθεσιμότητα δεδομένων για ορισμένους τομείς παραμένει ανομοιογενής, υπαινισσόμενος ότι σε λιγότερο ψηφιακά ώριμες πόλεις η εφαρμογή του μοντέλου θα αντιμετώπιζε σημαντικά μεγαλύτερα εμπόδια.

Τρίτον, η επιλογή των σταθμίσεων ($wE=0,35$, $wS=0,30$, $wG=0,35$) αντανάκλα μια συγκεκριμένη κανονιστική άποψη για τις προτεραιότητες της αστικής βιωσιμότητας. Η Gazioglu Hamis (2024) υποστηρίζει ότι η ευελιξία στη στάθμιση αποτελεί πλεονέκτημα, αλλά η κριτική βιβλιογραφία (Domanić, 2022) επισημαίνει ότι η επιλογή βαρών εισάγει πολιτική διάσταση η οποία πρέπει να γίνεται διαφανής και να υποβάλλεται σε δημόσιο διάλογο, κάτι που ένα εννοιολογικό μοντέλο δεν μπορεί να υποκαταστήσει.

Η επέκταση της εφαρμογής στην Αθήνα μέσω του Κεφαλαίου 6 μετριάξει εν μέρει τον περιορισμό της μεμονωμένης περίπτωσης μελέτης, καθώς εισάγει μια ποιοτικά διαφορετική αστική πραγματικότητα που λειτουργεί ως κρίσιμο πεδίο δοκιμής του μοντέλου. Η σύγκριση Helsinki και Αθήνας τεκμηριώνει τη γενικευσιμότητα του πλαισίου ESG-DT σε διαφορετικά

ευρωπαϊκά συμφραζόμενα και ενισχύει την εμπιστοσύνη στη μεθοδολογική του στιβαρότητα. Ωστόσο, οι δύο πόλεις, παρότι αντιπροσωπεύουν τα δύο άκρα του φάσματος ψηφιακής και αστικής ωριμότητας στην Ευρώπη, δεν εξαντλούν την πολυμορφία των ευρωπαϊκών αστικών συστημάτων. Πόλεις μέσης κλίμακας, μεταβατικές οικονομίες της Ανατολικής Ευρώπης και ιδιαίτερα παραθαλάσσιες μεσογειακές πρωτεύουσες με διαφορετικά κοινωνικά και οικονομικά προφίλ θα μπορούσαν να αποκαλύψουν περαιτέρω διαστάσεις του μοντέλου που η παρούσα μελέτη δεν έχει εξετάσει. Συνεπώς, η επέκταση του μοντέλου παραμένει ένα ανοιχτό ζητούμενο που μελλοντικές μελέτες θα κληθούν να καλύψουν.

7.6 Συμβολή στη Βιβλιογραφία και Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η παρούσα μελέτη συμβάλλει στη βιβλιογραφία σε τρεις αλληλένδετες κατευθύνσεις. Καταρχάς, αναπτύσσει ένα εννοιολογικό πλαίσιο ESG-DT που υπερβαίνει τις τομεακές εφαρμογές που κυριαρχούν στη βιβλιογραφία (Donolil & Svíttek, 2024; Kljaić et al., 2024) και επιχειρεί ολιστική σύνθεση των τριών ESG διαστάσεων σε ενιαία αρχιτεκτονική. Έπειτα, αναδεικνύει τη δυνατότητα αξιοποίησης ανοικτών δεδομένων ευρωπαϊκών πόλεων για την τροφοδότηση ESG μοντέλων, συμβάλλοντας στη συζήτηση για τη σχέση ανοικτών δεδομένων και αστικής βιωσιμότητας που ανοίγουν οι Jaakola et al. (2015). Τέλος, τεκμηριώνει ότι η σύνδεση ESG αξιολόγησης με ψηφιακά δίδυμα παράγει αναλυτικά οφέλη που δεν επιτυγχάνονται από κάθε εργαλείο χωριστά, επεκτείνοντας τη βιβλιογραφία των Magaletti et al. (2025) και Wu et al. (2025) σε αστικό επίπεδο.

Ωστόσο, τα κενά που εντοπίζει η παρούσα μελέτη υπαγορεύουν σαφείς κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Πρωτίστως, απαιτείται εμπειρική επαλήθευση του μοντέλου σε πολλαπλές ευρωπαϊκές πόλεις με διαφορετικά επίπεδα ψηφιακής ωριμότητας, ιδίως σε νότιοευρωπαϊκές πόλεις που αντιμετωπίζουν δομικά ελλείμματα στη διαθεσιμότητα δεδομένων. Η σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ πόλεων θα επέτρεπε την ανάπτυξη ενός benchmark ESG κλίμακας ειδικά για ευρωπαϊκές έξυπνες πόλεις, καλύπτοντας το κενό τυποποίησης που εντοπίζουν οι Alatagi et al. (2021). Επιπλέον, η ανάπτυξη δυναμικής, και όχι μόνο στατικής, έκδοσης του μοντέλου, ικανής να επικαιροποιεί τις ESG βαθμολογίες σε πραγματικό χρόνο, αποτελεί την επόμενη φυσική εξέλιξη, συνδέοντας το μοντέλο με τη λειτουργική λογική των ψηφιακών διδύμων που περιγράφουν οι Härmäläinen (2021) και Alam και Azeem (2025). Τέλος, η ενσωμάτωση συμμετοχικών μεθόδων για τον ορισμό των σταθμίσεων, ώστε οι βαθμολογίες να αντανακλούν τις προτεραιότητες των ίδιων των πολιτών και όχι αποκλειστικά των ειδικών, θα αποτελούσε σημαντική βελτίωση, σε ευθυγράμμιση με τις προτάσεις των Trivedi και Juyal (2026) για ανθρωποκεντρικό αστικό μετασχηματισμό.

Η ενσωμάτωση της Αθήνας ως δεύτερης περίπτωσης μελέτης εμπλουτίζει σημαντικά τη συμβολή της εργασίας, καθώς προσφέρει μια συγκριτική προσέγγιση που τεκμηριώνει τη γενικευσιμότητα του μοντέλου ESG-DT σε διαφορετικά αστικά πλαίσια. Η αντιπαράθεση των δύο πόλεων αναδεικνύει την «Ευρώπη δύο ταχυτήτων» στη βιώσιμη αστική ανάπτυξη και τεκμηριώνει την αξία του μοντέλου ως διαγνωστικού εργαλείου για διαφορετικές αναπτυξιακές τροχιές, καθώς και ως πυξίδα στρατηγικής για στοχευμένες παρεμβάσεις. Παράλληλα, οι κατευθύνσεις μελλοντικής έρευνας προσαρμόζονται αναλόγως: η επέκταση σε άλλες μεσογειακές πρωτεύουσες όπως η Λισαβόνα, η Ρώμη και η Μαδρίτη θα τεκμηριώνει περαιτέρω τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, ενώ η ανάπτυξη ενός πραγματικού αστικού ψηφιακού διδύμου για την Αθήνα (Athens Digital Twin 1.0), που να ενσωματώνει δεδομένα από όλα τα υποσυστήματα και να συνδέεται με το πλαίσιο ESG-DT, αποτελεί φυσική συνέχεια της εννοιολογικής εργασίας (Vallès et al., 2024; Tsaimou et al., 2026).

8. Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη ανέλαβε να διερευνήσει έναν θεματικό χώρο που βρίσκεται στη διασταύρωση τριών δυναμικά εξελισσόμενων πεδίων: της αστικής βιωσιμότητας, των ESG δεικτών και των ψηφιακών διδύμων. Μέσα από συστηματική ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας και εννοιολογική μοντελοποίηση με εφαρμογή στη Helsinki, η μελέτη κατέληξε σε έναν αριθμό γενικότερων συμπερασμάτων που υπερβαίνουν τα επιμέρους αριθμητικά αποτελέσματα και αφορούν βαθύτερες διαστάσεις του τρόπου με τον οποίο οι σύγχρονες πόλεις μπορούν να αξιολογούν, να σχεδιάζουν και να διαχειρίζονται τη βιωσιμότητά τους.

Το πρώτο και ίσως θεμελιωδέστερο συμπέρασμα της μελέτης είναι ότι οι ESG δείκτες αποτελούν ένα εργαλείο με σοβαρές δυνατότητες για τον αστικό τομέα, υπό την προϋπόθεση ότι δεν εφαρμόζονται μηχανικά αλλά με κριτική προσαρμογή στις ιδιαιτερότητες της δημόσιας διοίκησης και του αστικού σχεδιασμού. Η μεταφορά τους από τον εταιρικό στον αστικό τομέα δεν είναι αυτονόητη: απαιτεί επαναδιατύπωση του περιεχομένου κάθε διάστασης, επιλογή δεικτών που ανταποκρίνονται στη λογική της δημόσιας αξίας και όχι της κερδοφορίας, και ανάπτυξη συστημάτων συλλογής δεδομένων που να είναι ανοικτά, συγκρίσιμα και αξιόπιστα. Όταν αυτές οι προϋποθέσεις τηρούνται, οι ESG δείκτες παρέχουν ένα κοινό λεξιλόγιο αξιολόγησης που μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ φιλόδοξων πολιτικών στόχων και μετρήσιμων αποτελεσμάτων, ένα χάσμα που χαρακτηρίζει πολλές αστικές στρατηγικές βιωσιμότητας.

Το δεύτερο σημαντικό συμπέρασμα αφορά τη φύση του ψηφιακού διδύμου ως εργαλείου στρατηγικής σκέψης. Η παρούσα μελέτη υποστηρίζει ότι το ψηφιακό δίδυμο αξίζει να αντιμετωπίζεται όχι πρωτίστως ως τεχνολογική υποδομή αλλά ως εννοιολογικό πλαίσιο σύνθεσης πολύπλοκων αστικών πληροφοριών. Η αξία του δεν έγκειται μόνο στην τεχνική του ικανότητα να επεξεργάζεται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, αλλά στην ικανότητά του να ενοποιεί ετερογενή υποσυστήματα, ενέργεια, μεταφορές, ύδρευση, ψηφιακή υποδομή, διακυβέρνηση, σε ένα κοινό αναλυτικό πλαίσιο. Αυτή η ολιστική λογική αντανάκλα μια βαθύτερη αλήθεια για την αστική βιωσιμότητα: τα αστικά προβλήματα δεν είναι τομεακά αλλά συστημικά, και τα εργαλεία αντιμετώπισής τους πρέπει να αντανάκλουν αυτή τη διαδεδομένη αλληλεξάρτηση.

Ένα ακόμα, και ιδιαίτερα σημαντικό, συμπέρασμα αφορά τον ρόλο της διακυβέρνησης στην αστική βιωσιμότητα. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής στη Helsinki, αλλά και τα ευρήματα της PRISMA ανάλυσης στο σύνολό τους, αναδεικνύουν ότι η ποιότητα της αστικής διακυβέρνησης δεν αποτελεί απλώς μία από τις τρεις ESG διαστάσεις, αλλά τον παράγοντα που καθορίζει τη δυνατότητα υλοποίησης στόχων και στις άλλες δύο. Πόλεις με ισχυρή διακυβέρνηση, διαφανή, συμμετοχική, ψηφιακά ώριμη, επιδεικνύουν μεγαλύτερη ικανότητα να μετατρέπουν τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές τους δεσμεύσεις σε μετρήσιμα αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει ότι επενδύσεις στη διακυβέρνηση, στη διαφάνεια, στα ανοικτά δεδομένα, στη συμμετοχή πολιτών, δεν αποτελούν μόνο αυτοσκοπό αλλά και μέσο για την επίτευξη περιβαλλοντικών και κοινωνικών στόχων. Η διαπίστωση αυτή έχει άμεσες επιπτώσεις για τον σχεδιασμό αστικής πολιτικής: η βιωσιμότητα ξεκινά από τους θεσμούς.

Η συγκριτική εφαρμογή του μοντέλου σε Helsinki και Αθήνα προσέθεσε μια κρίσιμη διάσταση στα συμπεράσματα της μελέτης. Η αντιπαραβολή των δύο πόλεων, με συνολικό ESG Score 74,6 και 58,1 αντίστοιχα, τεκμηρίωσε ότι το πλαίσιο ESG-DT διαθέτει την αναγκαία ευελιξία ώστε να αποτυπώνει τόσο τις δυναμικές μιας ψηφιακά ώριμης σκανδιναβικής πρωτεύουσας όσο και τις πραγματικότητες μιας μεσογειακής μητρόπολης σε φάση ενεργού μετασχηματισμού. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι δεν υπάρχει μία και μοναδική διαδρομή προς την αστική βιωσιμότητα: οι πόλεις της Νότιας Ευρώπης αντιμετωπίζουν διαφορετικές προκλήσεις από αυτές της Βόρειας Ευρώπης, ιδίως ως προς την κλιματική τρωτότητα, την ενεργειακή φτώχεια και την κατακερματισμένη δεδομενοκεντρική υποδομή, και απαιτούν προσαρμοσμένες στρατηγικές μετάβασης.

Η αποτύπωση της Αθήνας ως πόλης που απέχει ακόμη σημαντικά από τη βιωσιμότητα, με σαφή στρατηγική δέσμευση αλλά και βαθιά, εκτεταμένα διαρθρωτικά κενά, αναδεικνύει το ESG-DT μοντέλο όχι μόνο ως διαγνωστικό εργαλείο αλλά και ως πυξίδα στρατηγικής, ικανή να καθοδηγήσει συγκεκριμένα βήματα μετάβασης προσαρμοσμένα στο τοπικό πλαίσιο. Το συμπέρασμα αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις για την ευρωπαϊκή πολιτική αστικής βιωσιμότητας: οι μεσογειακές πρωτεύουσες, παρά τη συγκριτική τους υστέρηση, διαθέτουν τη θεσμική και ερευνητική υποδομή που χρειάζεται για μια απαιτητική και μακρόπνοη μετάβαση, εφόσον αξιοποιηθούν στοχευμένα τα διαθέσιμα χρηματοδοτικά εργαλεία και υιοθετηθούν ολιστικές

πολιτικές που συνδυάζουν περιβαλλοντικές, κοινωνικές και θεσμικές παρεμβάσεις σε ενιαίο πλαίσιο.

Ένα ακόμα συμπέρασμα, πιο κριτικού χαρακτήρα, αφορά τα όρια της τεχνολογικής λογικής στη διαχείριση αστικής βιωσιμότητας. Η μελέτη αναδεικνύει ότι η ψηφιοποίηση των ESG δεδομένων μέσω ψηφιακών διδύμων, ενώ προσφέρει σημαντικά αναλυτικά οφέλη, δεν επαρκεί από μόνη της για την επίτευξη βιωσιμότητας. Τα αριθμητικά αποτελέσματα του μοντέλου αποτελούν εκκίνηση και όχι τέλος της συζήτησης: χρειάζονται κριτική ερμηνεία, πολιτική βούληση για δράση και ουσιαστική συμμετοχή των πολιτών. Ο κίνδυνος να αντικατασταθεί η πολιτική σκέψη από την τεχνική βαθμολόγηση, το λεγόμενο «ESG-washing» σε αστικό επίπεδο, αποτελεί πραγματική απειλή που η ακαδημαϊκή κοινότητα και οι φορείς χάραξης πολιτικής οφείλουν να αντιμετωπίσουν με σοβαρότητα.

Η παρούσα μελέτη κατέληξε στη διαμόρφωση ενός εννοιολογικού μοντέλου που δεν διεκδικεί οριστικές απαντήσεις αλλά θέτει μια γόνιμη βάση για περαιτέρω εμπειρική έρευνα, διοικητική εφαρμογή και επιστημονικό διάλογο. Οι ευρωπαϊκές πόλεις αντιμετωπίζουν σήμερα προκλήσεις που απαιτούν ταυτόχρονα τεχνολογική εξελιγμένη σκέψη, βαθιά κατανόηση των κοινωνικών δυναμικών και θεσμική ακεραιότητα. Ένα ψηφιακό δίδυμο ESG αξιολόγησης δεν αντικαθιστά καμία από αυτές τις ανάγκες, τις υπηρετεί, εφόσον αντιμετωπίζεται ως μέσο και όχι ως σκοπός. Η αστική βιωσιμότητα παραμένει, τελικά, ζήτημα ανθρώπινης επιλογής, πολιτικής ευθύνης και συλλογικής δέσμευσης, και κανένα τεχνολογικό εργαλείο δεν μπορεί να υποκαταστήσει αυτές τις θεμελιώδεις διαστάσεις.

Βιβλιογραφία

- Aelenei, L., Ferreira, A., Monteiro, C. S., Gomes, R., Gonçalves, H., Camelo, S., & Silva, C. (2016). Smart city: A systematic approach towards a sustainable urban transformation. *Energy Procedia*, 91, 970-979.
- Alam, S., & Azeem, Z. (2025). Digital Twins as the Predictive Core of Smart Cities: A Systematic Review and Conceptual Framework for Sustainable Urban Futures. *Frontiers in Computational Spatial Intelligence*, 3(3), 154-164.
- Alatagi, A. S., Dwivedi, M. A., & Bhavsar, P. M. D. (2021). Possibilities of using environmental, social, and governance (ESG) framework for urban local governments.
- Alourani, A., Alam, M., Ali, A., Khan, I. R., & Samal, C. K. (2025). Hybrid AI-IoT Framework with Digital Twin Integration for Predictive Urban Infrastructure Management in Smart Cities. *CMC-Computers Materials & Continua*, 86(1).
- Al-Sehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2021). A digital twin uses classification system for urban planning & city infrastructure management. *Journal of Information Technology in Construction*, 26, 832-362.
- Barykin, S. E., Strimovskaya, A. V., Sergeev, S. M., Borisoglebskaya, L. N., Dedyukhina, N., Sklyarov, I., ... & Saychenko, L. (2023). Smart city logistics on the basis of digital tools for ESG goals achievement. *Sustainability*, 15(6), 5507.
- Battisti, F. (2023). SDGs and ESG Criteria in Housing: Defining Local Evaluation Criteria and Indicators for Verifying Project Sustainability Using Florence Metropolitan Area as a Case Study. *Sustainability*, 15(12), 9372.
- Belfadel, A., Hörl, S., Tapia, R. J., Politaki, D., Kureshi, I., Tavasszy, L., & Puchinger, J. (2023). A conceptual digital twin framework for city logistics. *Computers, Environment and Urban Systems*, 103, 101989.
- Bocca, A., & Massimiano, L. (2024). ESG principles and urban regeneration. A framework for sustainable cities. *ACCADEMIA*, 326-327.
- Bocca, A., & Massimiano, L. (2025). ESG principles and urban regeneration: challenges and opportunities. *Territorio della Ricerca su Insediamenti e Ambiente. Rivista internazionale di cultura urbanistica*, 18(34), 71-88.
- Bonab, A. B., Bellini, F., & Rudko, I. (2023). Theoretical and analytical assessment of smart green cities. *Journal of Cleaner Production*, 410, 137315.
- Boufounou, P., Moustairas, I., Toudas, K., & Malesios, C. (2024). The Challenge of Smart Sustainable Cities: Empirical Evidence for Greece. In *ESG and Ecosystem Services for Sustainability* (pp. 511-550). IGI Global Scientific Publishing.
- Broo, D. G., Bravo-Haro, M., & Schooling, J. (2022). Design and implementation of a smart infrastructure digital twin. *Automation in construction*, 136, 104171.
- Bruno, C. C., & Henisz, W. J. (2024). Environmental, social, and governance (ESG) outcomes and municipal credit risk. *Business & Society*, 63(8), 1709-1756.
- Buallay, A., El Khoury, R., & Hamdan, A. (2021). Sustainability reporting in smart cities: A multidimensional performance measures. *Cities*, 119, 103397.
- Cao, J., Spulbar, C., Eti, S., Horobet, A., Yüksel, S., & Dincer, H. (2025). Innovative approaches to green digital twin technologies of sustainable smart cities using a novel hybrid decision-making system. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10(1), 100651.
- Caprari, G., Castelli, G., Montuori, M., Camardelli, M., & Malvezzi, R. (2022). Digital twin for urban planning in the green deal era: A state of the art and future perspectives. *Sustainability*, 14(10), 6263.
- Castelli, G., Cesta, A., Diez, M., Padula, M., Ravazzani, P., Rinaldi, G., ... & Campana, E. F. (2019, October). Urban intelligence: a modular, fully integrated, and evolving model for cities digital twinning. In *2019 IEEE 16th international conference on smart cities: Improving quality of life using ICT & IoT and AI (HONET-ICT)* (pp. 033-037). IEEE.
- Chong, K. M., Subramaniam, G., Ating, R., Separa, L. A. C., & Tan, T. H. (2022). Sustainability of Smart Cities in Malaysia and the Philippines using ESG Model. *Environment-Behaviour Proceedings Journal*, 7(22), 145-155.

- Crane, M., Lloyd, S., Haines, A., Ding, D., Hutchinson, E., Belesova, K., ... & Turcu, C. (2021). Transforming cities for sustainability: A health perspective. *Environment international*, 147, 106366.
- D'Hauwers, R., Walravens, N., & Ballon, P. (2021). From an inside-in towards an outside-out urban digital twin: Business models and implementation challenges. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 8, 25-32.
- 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.
- Domanović, V. (2022). The relationship between ESG and financial performance indicators in the public sector: empirical evidence from the Republic of Serbia. *Management: Journal of Sustainable Business and Management Solutions in Emerging Economies*, 27(1), 69-80.
- Dovolil, P., & Svítek, M. (2024, May). Integrating ESG into the Smart City concept with focus on transport. In *2024 Smart City Symposium Prague (SCSP)* (pp. 1-7). IEEE.
- El Marai, O., Taleb, T., & Song, J. (2020). Roads infrastructure digital twin: A step toward smarter cities realization. *IEEE network*, 35(2), 136-143.
- Elhag, M., & Elhag, R. (2024). Investigating the Expected Impact of Environmental, Social, and Governance (ESG) Principles on Smart-City Management towards Achieving Green Competitive Advantage: A Comparative Future Study between NEOM and Telosa Cities. *Pakistan Journal of Life & Social Sciences*, 22(2).
- Ernst, L., de Graaf-Van Dinther, R. E., Peek, G. J., & Loorbach, D. A. (2016). Sustainable urban transformation and sustainability transitions; conceptual framework and case study. *Journal of cleaner production*, 112, 2988-2999.
- Esmailpour, N., Goodarzi, G., & Esmailpour Zanjani, S. (2021). The model of good sustainable urban governance based-on ESG concepts. *International Journal of Urban Management and Energy Sustainability*, 2(4), 11-22.
- Eurelectric. (2026). Electricity Data Platform: Greece electricity generation mix 2021–2025. <https://electricity-data.eurelectric.org/>
- European Commission, Directorate-General for Regional and Urban Policy. (2023). Report on the Quality of Life in European Cities, 2023. Publications Office of the European Union.
- European Commission. (2023). Digital Economy and Society Index (DESI) 2023: Greece. Brussels: European Commission. Ανακτήθηκε από <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/desi>
- European Commission. (2025). eGovernment Benchmark 2025 & Digital Decade Country Report: Greece. European Commission.
- European Environment Agency. (2025). Waste management country profile: Greece. EEA.
- Eurostat. (2026). Energy poverty (inability to keep home adequately warm) and renewable energy statistics. European Commission.
- Evangelou, T., Gkeli, M., & Potsiou, C. (2022). Building digital twins for smart cities: A case study in Greece. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 61–68.
- Faka, A. (2025). Mapping Green Space Inequalities in 26 European Cities. *Land*, 14(12), 2362.
- Faliagka, E., Christopoulou, E., Ringas, D., Politi, T., Kostis, N., Leonardos, D., ... & Voros, N. (2024). Trends in digital twin framework architectures for smart cities: A case study in smart mobility. *Sensors*, 24(5), 1665.
- Ford, D. N., & Wolf, C. M. (2020). Smart cities with digital twin systems for disaster management. *Journal of management in engineering*, 36(4), 04020027.
- Founda, D., & Santamouris, M. (2017). Synergies between Urban Heat Island and Heat Waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Scientific Reports*, 7(1), 10973.

- Founda, D., Pierros, F., Petrakis, M., & Zerefos, C. (2019). Interdecadal variations and trends of the urban heat island in Athens (Greece) and its response to heat waves. *Atmospheric Research*, 219, 1–13.
- Gazioglu Hamis, S. (2024). Environmental, social and governance (ESG) scoring system: towards net-zero city targets.
- Gil, J. (2020). City information modelling: A conceptual framework for research and practice in digital urban planning. *Built Environment*, 46(4), 501-527.
- Grainger-Brown, J., Malekpour, S., Raven, R., & Taylor, E. (2022). Exploring urban transformation to inform the implementation of the Sustainable Development Goals. *Cities*, 131, 103928.
- Gu, Y., Katz, S., Wang, X., Vasarhelyi, M., & Dai, J. (2024). Government ESG reporting in smart cities. *International Journal of Accounting Information Systems*, 54, 100701.
- Haase, A., Bedtke, N., Begg, C., Gawel, E., Rink, D., & Wolff, M. (2017). On the connection between urban sustainability transformations and multiple societal crises. In *Urban transformations: sustainable urban development through resource efficiency, quality of life and resilience* (pp. 61-76). Cham: Springer International Publishing.
- Hämäläinen, M. (2020). Smart city development with digital twin technology. In *33rd Bled eConference-Enabling Technology for a Sustainable Society: June 28–29, 2020, Online Conference Proceedings*. University of Maribor.
- Hellenic Statistical Authority (ELSTAT). (2023). Demographic and Social Characteristics of the Resident Population of Greece. Piraeus: ELSTAT. Ανακτήθηκε από <https://www.statistics.gr>
- Huang, H., & Tsou, J. Y. (2024, August). From Concept to Reality: A Systematic Review of Urban Digital Twin and Their Applications in Smart Cities. In *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering* (pp. 536-557). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Huang, W., Zhang, Y., & Zeng, W. (2022). Development and application of digital twin technology for integrated regional energy systems in smart cities. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36, 100781.
- Ibrahim, A. K., Amini-Philips, A., & Eynade, W. (2020). Conceptual framework for applying digital twins in sustainable construction and infrastructure management. *Int J Multidiscip Res Growth Eval*, 1(4), 160-178.
- Ibrahim, M., El-Zaart, A., & Adams, C. (2018). Smart sustainable cities roadmap: Readiness for transformation towards urban sustainability. *Sustainable cities and society*, 37, 530-540.
- Île-de-France Mobilités & SNCF Transilien. (2024). Réseau ferroviaire régional d'Île-de-France (RER & Transilien): réseau, gares et fréquentation. <https://www.transilien.com>
- Imperiale, F., Pizzi, S., & Lippolis, S. (2023). Sustainability reporting and ESG performance in the utilities sector. *Utilities Policy*, 80, 101468.
- IQAir. (2025). World Air Quality Report 2024. IQAir.
- Ivanov, S., Nikolskaya, K., Radchenko, G., Sokolinsky, L., & Zymbler, M. (2020, November). Digital twin of city: Concept overview. In *2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC)* (pp. 178-186). IEEE.
- Iwaniec, D. M., Cook, E. M., Barbosa, O., & Grimm, N. B. (2019). The framing of urban sustainability transformations. *Sustainability*, 11(3), 573.
- Jafari, M., Kavousi-Fard, A., Chen, T., & Karimi, M. (2023). A review on digital twin technology in smart grid, transportation system and smart city: Challenges and future. *IEEE Access*, 11, 17471-17484.
- Jaiwani, M., & Gopalkrishnan, S. (2025). Do private and public sector banks respond to ESG in the same way? Some evidences from India. *Benchmarking: An International Journal*, 32(1), 194-221.
- Kalfas, D., Kalogiannidis, S., Spinthiropoulos, K., Chatzitheodoridis, F., & Ziouziou, E. (2025). Enhancing predictive urban planning in European smart cities through AI-driven digital twin technology: A case study of Greece. *Urban Science*, 9(7), 267.

- Kljaić, Z., Mlinarić, T. J., Nižetić, M. K., Škorput, P., Carić, H., Gjenero, O., ... & Pavković, D. (2024). Digital twin models with ESG methodology as a tool for transforming solutions in the transport-energy sector with applications to sustainable tourism. *Engineering power: bulletin of the Croatian Academy of Engineering*, 19(2), 9-23.
- Kocmanová, A., & Dočekalová, M. (2012). Construction of the economic indicators of performance in relation to environmental, social and corporate governance (ESG) factors. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 60(4), 195-206.
- Kuftinova, N. G., Ostroukh, A. V., Izmailova, D. K., & Pirozhkov, M. A. (2023, November). Environmental, Social, and Governance Factors in Transportation Planning. In *2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)* (pp. 1-6). IEEE.
- Li, Y., He, N., Li, H., & Zhang, Y. (2024). Sustainability assessment of urban water public-private partnership projects with environmental, social, and governance (ESG) criteria. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 60(6), 1209-1227.
- Liu, C., & Tian, Y. (2023). Recognition of digital twin city from the perspective of complex system theory: Lessons from Chinese practice. *Journal of Urban Management*, 12(2), 182-192.
- Lukić, I., Köhler, M., Krpić, Z., & Švarcmajer, M. (2025). Advancing smart city sustainability through artificial intelligence, digital twin and blockchain solutions. *Technologies*, 13(7), 300.
- Lymaxis, I., & Georgiou, E. (2024). Security Challenges in Critical Infrastructures in Transport: The PRECINCT Athens Use Case. In *Paradigms on Technology Development for Security Practitioners* (pp. 145-154). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Mabrouk, M., Mahran, M. G. N., Saleh, D., & AbouKorin, S. A. A. (2025). Digital Twin Cities for Climate-Resilient Urban Planning: A Systematic Review of Frameworks, Applications, and Future Perspectives. *Advance in Sustainability*, 5(2).
- Magaletti, N., Tognon, C., Di Molfetta, M., Zerega, A., Notarnicola, V., Zini, E., & Leogrande, A. (2025). Integrating ESG with Digital Twins and the Metaverse: A Data-Driven Framework for Smart Building Sustainability. *Systems*, 13(12), 1083.
- Manioudis, M., & Meramveliotakis, G. (2024). Greek SMEs and Sustainable Development: An Evaluation of Sustainable Development Goals (SDGs). In *The Political Economy of Evaluation in Greece: Interdisciplinary Perspectives for an Inclusive and Forward-Looking Evaluation* (pp. 353-370). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Markopoulos, E., Markopoulos, P., Nandi, A., Zhao, K., Samkova, M., Wu, T., & Kantola, J. (2024). Aligning digital twins and metaverse with the UN SDGs and applying them to understand human behaviour in smart and virtual cities. *Accessibility, Assistive Technology and Digital Environments*, 121, 36-45.
- Matei, A., & Cocoşatu, M. (2024). Artificial Internet of Things, sensor-based digital twin urban computing vision algorithms, and blockchain cloud networks in sustainable smart city administration. *Sustainability*, 16(16), 6749.
- Mazzetto, S. (2024). A review of urban digital twins integration, challenges, and future directions in smart city development. *Sustainability*, 16(19), 8337.
- McCormick, K., Anderberg, S., Coenen, L., & Neij, L. (2013). Advancing sustainable urban transformation. *Journal of cleaner production*, 50, 1-11.
- Mendizabal, M., Heidrich, O., Feliu, E., García-Blanco, G., & Mendizabal, A. (2018). Stimulating urban transition and transformation to achieve sustainable and resilient cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 410-418.
- Mian, H. R., Hewage, K., & Sadiq, R. (2024). Responsible financing and investment: identification, development, and assessment of Environmental, Social, and Governance (ESG) metrics. *Sustainable Futures*, 8, 100246.
- Nevens, F., Frantzeskaki, N., Gorissen, L., & Loorbach, D. (2013). Urban Transition Labs: co-creating transformative action for sustainable cities. *Journal of Cleaner Production*, 50, 111-122.

- Nofianti, N., & Sutopo, B. (2025). The Implementation of ESG in Public Sector Sustainability Reporting: A Systematic Literature Review. *Journal of Applied Business, Taxation and Economics Research*, 5(2), 365-389.
- OECD. (2025). Government at a Glance 2025 & Digital Government Outlook 2026: Greece. OECD Publishing.
- Okojie, J., Ike, P., Idu, J., Nnabueze, S. B., Filani, O., & Ihwughwawwe, S. (2023). Predictive analytics models for monitoring smart city emissions and infrastructure risk in urban ESG planning. *International Journal of Multidisciplinary Futuristic Development*, 4(1), 45-57.
- Okojiev, J. S., Filani, O. M., Ike, P. N., Okojokwu-Idu, J. O., Nnabueze, S. B., & Ihwughwawwe, S. I. (2023). Integrating AI with ESG Metrics in Smart Infrastructure Auditing for High-Impact Urban Development Projects.
- Omrany, H., & Al-Obaidi, K. M. (2025). Application of digital twin technology for Urban Heat Island mitigation: review and conceptual framework. *Smart and Sustainable Built Environment*, 14(7), 2145-2175.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Papafloratos, T., & Fragidis, G. (2025). Corporate social responsibility (CSR), sustainability and ESG standards used by ATHEX ESG index listed companies. *Standards*, 5(2), 12.
- Qanazi, S., Leclerc, E., & Bosredon, P. (2025). Integrating social dimensions into urban digital twins: A review and proposed framework for social digital twins. *Smart Cities*, 8(1), 23.
- Radzi, A. R., Almutairi, S., & Rahman, R. A. (2026). Environmental, social and governance (ESG) in the built environment: science mapping of present and future trends. *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 1-18.
- Roy, S. S. (2023). An Empirical Evaluation of Environmental, Social and Corporate Governance (ESG) Disclosures on the Select Public Sector Enterprises in India. *Sustainable Roadmap Development Strategies in India: Paving the Way for a Better Future*, 132-139.
- Saeed, Z. O., Mancini, F., Glusac, T., & Izadpanahi, P. (2022). Future city, digital twinning and the urban realm: a systematic literature review. *Buildings*, 12(5), 685.
- Santamouris, M., Paolini, R., Haddad, S., Synnefa, A., Garshasbi, S., Hatvani-Kovacs, G., Wang, R., Akbari, H., Pisello, A. L., Rossi, F., Zhu, J., & Fiorito, F. (2020). Heat mitigation technologies can improve sustainability in cities. An holistic experimental and numerical impact assessment of urban overheating and related heat mitigation strategies. *Energy and Buildings*, 207, 109482.
- Sepetis, A., Tsirigotis, D., Nikolaou, I., & Maniatis, Y. (2024). ESG integration in evaluating and financing local government: a new prospects for local governments and modern societies. *Regional Science Inquiry*, 16(1), 81-97.
- Shen, Y. (2025). Integration of IoT and Digital Twin for Intelligent Management of Urban Underground Pipe Galleries in Smart Cities. *Informatica*, 49(15).
- Shirowzhan, S., Tan, W., & Sepasgozar, S. M. (2020). Digital twin and CyberGIS for improving connectivity and measuring the impact of infrastructure construction planning in smart cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 240.
- Skavos, G., Zournatzidou, G., Ragazou, K., Spinthiropoulos, K., & Sariannidis, N. (2025). Next-generation urbanism: ESG strategies, green accounting, and the future of sustainable city governance-A PRISMA-guided bibliometric analysis. *Urban Science*, 9(7), 261.
- Stefanidou, A., Cani, J., Papadopoulos, T., Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Varlamis, I., & Papadopoulos, G. T. (2024, December). Leveraging digital twin technologies for public space protection and vulnerability assessment. In 2024 IEEE International Conference on Big Data (BigData) (pp. 2836–2845). IEEE.
- Supianto, A. A., Nasar, W., Aspen, D. M., Hasan, A., Karlsen, A. S. T., & Torres, R. D. S. (2024). An urban digital twin framework for reference and planning. *IEEE Access*, 12, 152444-152465.

- Tan, Z., & Li, Z. (2024). Digital twins for sustainable design and management of smart city buildings and municipal infrastructure. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 64, 103682.
- Tanimanidis, I., & Papaspyropoulos, K. G. (2026). Integrating Urban Green Ecosystem Services into Municipal Natural Resources Management Through ESG Reporting: Evidence from Greek Cities. *Urban Science*, 10(2), 98.
- Teixeira Dias, F., de Aguiar Dutra, A. R., Vieira Cubas, A. L., Ferreira Henckmaier, M. F., Courval, M., & de Andrade Guerra, J. B. S. O. (2023). Sustainable development with environmental, social and governance: Strategies for urban sustainability. *Sustainable Development*, 31(1), 528-539.
- Teixeira Dias, F., de Aguiar Dutra, A. R., Vieira Cubas, A. L., Ferreira Henckmaier, M. F., Courval, M., & de Andrade Guerra, J. B. S. O. (2023). Sustainable development with environmental, social and governance: Strategies for urban sustainability. *Sustainable Development*, 31(1), 528-539.
- The Green Tank. (2026). Trends in electricity production – December 2025. The Green Tank.
- Transparency International. (2026). Corruption Perceptions Index 2025. Transparency International.
- Traoré, M. K. (2024). A conceptual framework to analyze urban digital twins interoperability.
- Trivedi, A., & Juyal, S. A. (2026). Smart Cities and Urban Circularity: Advancing Sustainable Transformation through Digital Twins, AI, and Capacity Building. In *Green Horizons: Advancing Climate Solutions Through Green Finance, Circular Economy, and ESG* (pp. 339-356). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Tsaimou, C. N., Intzeler, M., & Tsoukala, V. K. (2026). Port Digital Twins for Sustainable Urban Futures in Europe. *Earth*, 7(2), 68.
- Tsaimou, C. N., Intzeler, M., & Tsoukala, V. K. (2026). Port Digital Twins for Sustainable Urban Futures in Europe. *Earth*, 7(2), 68.
- Tzachor, A., Sabri, S., Richards, C. E., Rajabifard, A., & Acuto, M. (2022). Potential and limitations of digital twins to achieve the sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 5(10), 822-829.
- Vallès, L., Shtefchyk Tatarchuk, K., Karamousadakis, M., & Tsaloukidis, I. (2024, May). Community-Based Smart City Digital Twin for Optimised Disaster Risk Management Operations and Enhanced Community Disaster Resilience (2024)[Pòster]. In *Vallès, Lola; Shtefchyk Tatarchuk, Kiril [et. al.](2024). ISCRAM 2024 Proceedings. Proceedings of the International ISCRAM Conference, pp 1127-1128.*. Institut de Seguretat Pública de Catalunya.
- Vallès, L., Shtefchyk Tatarchuk, K., Karamousadakis, M., & Tsaloukidis, I. (2024). Community-Based Smart City Digital Twin for Optimised Disaster Risk Management Operations and Enhanced Community Disaster Resilience. In *ISCRAM 2024 Proceedings* (pp. 1127–1128). Institut de Seguretat Pública de Catalunya.
- Vardopoulos, I., & Passas, I. (Eds.). (2025). *Futureproofed Sustainability Amidst Climate Change Polycrisis: Advancing SDGs and ESG for the Cities of Tomorrow*. IGI Global.
- Vardopoulos, I., & Passas, I. (Eds.). (2025). *Futureproofed Sustainability Amidst Climate Change Polycrisis: Advancing SDGs and ESG for the Cities of Tomorrow*. IGI Global.
- Wacławik, B., Surówka, K., & Popławski, Ł. (2025). ESG in the public sector. *Management*, 2025(1), 767-783.
- Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). Urban digital twin challenges: A systematic review and perspectives for sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*, 99, 104862.
- Wieteska-Rosiak, B. (2025). Housing environment as a tool for strengthening urban resilience to climate change: ESG good practices in sustainable development. *Bulletin of Geography. Socio-economic Series*, (70), 85-96.

- Wójtowicz, K. (2024). Different patterns of ESG reporting: the sustainability disclosure index of selected European cities. *International Journal of Management and Economics*, 60(5), 340-353.
- Wu, Z., Islam, S., & Tang, L. (2025). Visualizing ESG Performance in an Integrated GIS–BIM–IoT Platform for Strategic Urban Planning. *Buildings*, 15(18), 3394.
- Xiao, M., Chen, L., Feng, H., Peng, Z., & Long, Q. (2024). Sustainable and robust route planning scheme for smart city public transport based on multi-objective optimization: Digital twin model. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 65, 103787.
- Zahari, A. I., Said, J., Muhamad, N., & Ramly, S. M. (2024). Ethical culture and leadership for sustainability and governance in public sector organisations within the ESG framework. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 10(1), 100219.
- Zhai, C., Ding, X., Zhang, X., Jiang, S., Zhang, Y., & Li, C. (2023). Assessing the effects of urban digital infrastructure on corporate Environmental, Social and Governance (ESG) performance: Evidence from the broadband China Policy. *Systems*, 11(10), 515.
- Zhou, Y., Meng, M., & Gao, J. (2025). Better city, better life: smart city policy and corporate ESG performance. *Applied Economics*, 1-17.
- Zubizarreta, H. V., & Aquino, D. T. (2026). Reframing ESG for Urban Planning: A Systematic Review of Spatial Governance, Investment Geographies, and Green Gentrification.
- Zubizarreta, H. V., & Aquino, D. T. (2026). Reframing ESG for Urban Planning: A Systematic Review of Spatial Governance, Investment Geographies, and Green Gentrification.
- Zupi, M., & Celani, P. (2024, May). The ESG Approach for Planning, Design and Correct Management of Green Area. In *INTERNATIONAL SYMPOSIUM: New Metropolitan Perspectives* (pp. 336-342). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Δήμος Αθηναίων. (2025). Σχέδιο Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας (ΣΒΑΚ) και Σχέδιο Δράσης για την Αειφόρο Ενέργεια και το Κλίμα (ΣΔΑΕΚ). Δήμος Αθηναίων.
- ΕΛΣΤΑΤ. (2026). Έρευνα Εργατικού Δυναμικού, Α' τρίμηνο 2026. Ελληνική Στατιστική Αρχή.
- ΕΥΔΑΠ. (2025). Δήλωση Βιωσιμότητας (CSRD/ESRS). Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Πρωτεύουσας.

Παράρτημα

Πίνακας PRISMA. Συνοπτική Παρουσίαση Επιλεγμένων Μελετών

Αξιολόγηση ESG Δεικτών στη Στρατηγική Βιωσιμότητας Ευρωπαϊκών Έξυπνων Πόλεων – Ψηφιακό Δίδυμο

Ερευνητές / Έτος	Χώρα	Σκοπός Μελέτης	Μεθοδολογία	Σημαντικότερα Αποτελέσματα
Alam & Azeem (2025)	Διεθνής	Ανάπτυξη εννοιολογικού πλαισίου για Digital Twins ως προβλεπτικό πυρήνα έξυπνων πόλεων βιώσιμου μέλλοντος.	Συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας	Τα DT αποτελούν τον κεντρικό μηχανισμό πρόβλεψης και βελτιστοποίησης αστικών συστημάτων. Προτείνεται ολοκληρωμένο εννοιολογικό πλαίσιο για βιώσιμες αστικές μελλοντικές καταστάσεις.
Supianto et al. (2024)	Νορβηγία / Διεθνής	Ανάπτυξη αστικού DT framework για αναφορά και αστικό σχεδιασμό.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & εννοιολογική μοντελοποίηση	Προτείνεται ιεραρχικό framework με τυποποιημένα επίπεδα αφαίρεσης. Τονίζεται η ανάγκη διαλειτουργικότητας και ανοιχτών δεδομένων για αποτελεσματικό αστικό DT.
Mabrouk et al. (2025)	Αίγυπτος / Διεθνής	Συστηματική αξιολόγηση DT πόλεων για κλιματικά ανθεκτικό αστικό σχεδιασμό.	Συστηματική ανασκόπηση PRISMA	Τα DT ενισχύουν σημαντικά την κλιματική ανθεκτικότητα πόλεων. Εντοπίζονται κενά στην ενσωμάτωση κλιματικών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
Qanazi et al. (2025)	Γαλλία / Διεθνής	Ενσωμάτωση κοινωνικών διαστάσεων στα αστικά DT και πρόταση Social Digital Twin framework.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & εννοιολογική σύνθεση	Τα υφιστάμενα DT υπολείπονται στην κοινωνική διάσταση. Προτείνεται εννοιολογικό πλαίσιο ενσωμάτωσης κοινωνικών δεικτών στα αστικά DT.
Mazzetto (2024)	Κατάρ / Διεθνής	Ανασκόπηση της ενσωμάτωσης αστικών DT στην ανάπτυξη έξυπνων πόλεων, προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	Αναδεικνύεται η έλλειψη τυποποίησης στην αρχιτεκτονική αστικών DT. Κύριες προκλήσεις: ποιότητα δεδομένων, ασφάλεια, διαλειτουργικότητα.
Huang & Tsou (2024)	Χονγκ Κονγκ / Διεθνής	Χαρτογράφηση εφαρμογών αστικών DT σε έξυπνες πόλεις από τη θεωρία στην πράξη.	Συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας	Εντοπίζονται έξι βασικοί τομείς εφαρμογής DT σε smart cities. Η μετάβαση από εννοιολογικά σε λειτουργικά DT παραμένει περιορισμένη.

Saeed et al. (2022)	Νορβηγία / Διεθνής	Συστηματική αξιολόγηση της έρευνας για digital twinning σε αστικό περιβάλλον.	Συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας	Τα DT αποτελούν αναδυόμενο εργαλείο αστικού σχεδιασμού. Προσδιορίζονται βασικά τεχνολογικά και διακυβερνητικά εμπόδια υλοποίησης.
Al-Sehrawy et al. (2021)	Ηνωμένο Βασίλειο	Ανάπτυξη ταξινομικού συστήματος χρήσεων DT για αστικό σχεδιασμό και διαχείριση υποδομών.	Εννοιολογική ανάλυση & ταξινόμηση	Προτείνεται πλαίσιο ταξινόμησης DT σε επίπεδο αστικής διαχείρισης. Αναδεικνύεται η ανάγκη προσαρμογής των DT ανά τομέα υποδομής.
Traoré (2024)	Διεθνής	Ανάπτυξη εννοιολογικού πλαισίου ανάλυσης διαλειτουργικότητας αστικών DT.	Εννοιολογική ανάλυση	Η διαλειτουργικότητα αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για αστικά DT. Προτείνονται στρατηγικές σύνδεσης ετερογενών συστημάτων δεδομένων.
Teixeira Dias et al. (2023)	Βραζιλία / Διεθνής	Ανάλυση ESG στρατηγικών για την προώθηση αστικής βιωσιμότητας.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & συγκριτική ανάλυση	Οι ESG δείκτες αποτελούν αποτελεσματικό εργαλείο αστικής βιωσιμότητας. Απαιτείται προσαρμογή του ESG πλαισίου στις ιδιαιτερότητες αστικών συστημάτων.
Alatagi et al. (2021)	Ινδία / Διεθνής	Διερεύνηση δυνατοτήτων εφαρμογής ESG framework σε αστικές τοπικές κυβερνήσεις.	Εννοιολογική ανάλυση	Το ESG framework μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε αστικές κυβερνήσεις. Προσδιορίζονται οι απαραίτητες προσαρμογές για τον δημόσιο τομέα.
Gazioglu Hamis (2024)	Ηνωμένο Βασίλειο	Ανάπτυξη ESG scoring system με στόχο την επίτευξη στόχων net-zero σε επίπεδο πόλης.	Εννοιολογική μοντελοποίηση & ανάλυση δεικτών	Προτείνεται σύστημα βαθμολόγησης ESG για πόλεις. Η Governance διάσταση αναδεικνύεται ως κρίσιμος παράγοντας επίτευξης net-zero στόχων.
Esmailpour et al. (2021)	Ιράν	Ανάπτυξη μοντέλου καλής βιώσιμης αστικής διακυβέρνησης βάσει ESG εννοιών.	Εννοιολογική ανάλυση & μοντελοποίηση	Τα ESG concepts συνεισφέρουν σημαντικά στη βελτίωση της αστικής διακυβέρνησης. Αναπτύσσεται μοντέλο τριών αλληλένδετων διαστάσεων.
Zubizarreta & Aquino (2026)	Διεθνής	Επανακαθορισμός ESG για αστικό σχεδιασμό με έμφαση στη χωρική διακυβέρνηση και πράσινο εξευγενισμό.	Συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας	Αναδεικνύεται η χωρική διάσταση των ESG δεικτών. Προσδιορίζονται ζητήματα αδικίας και αποκλεισμού στην εφαρμογή ESG πολιτικών.
Mian et al. (2024)	Καναδάς	Εντοπισμός, ανάπτυξη και αξιολόγηση ESG metrics για υπεύθυνη χρηματοδότηση.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & ανάλυση δεικτών	Καταγράφεται ένα ολοκληρωμένο σύνολο ESG metrics. Αναδεικνύεται η ανάγκη τυποποίησης μέτρησης ESG επιδόσεων.

Radzi et al. (2026)	Σαουδική Αραβία / Μαλαισία	Επιστημονική χαρτογράφηση παρόντων και μελλοντικών τάσεων ESG στο δομημένο περιβάλλον.	Bibliometric analysis & science mapping	Αναγνωρίζεται αυξανόμενο ερευνητικό ενδιαφέρον για ESG στο δομημένο περιβάλλον. Προσδιορίζονται κενά έρευνας και αναδυόμενες θεματικές.
Tan & Li (2024)	Κίνα	Διερεύνηση DT για βιώσιμο σχεδιασμό και διαχείριση κτιρίων/υποδομών έξυπνης πόλης.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & ανάλυση εφαρμογών	Τα DT βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση κτιρίων και αστικών υποδομών. Αναδεικνύεται η ανάγκη ενσωμάτωσης sustainability metrics στα DT.
Jafari et al. (2023)	Ιράν / Διεθνής	Ανασκόπηση εφαρμογών DT σε smart grid, μεταφορές και έξυπνες πόλεις.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	Τα DT εφαρμόζονται αποτελεσματικά σε ενέργεια, μεταφορές και αστικά δίκτυα. Προσδιορίζονται τεχνικές προκλήσεις ενσωμάτωσης σε πολύπλοκα αστικά συστήματα.
Faliagka et al. (2024)	Ελλάδα	Ανάλυση τάσεων σε αρχιτεκτονικές DT framework για έξυπνες πόλεις με case study στη smart mobility.	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & case study	Εντοπίζονται κυρίαρχες αρχιτεκτονικές για αστικά DT. Το case study smart mobility αναδεικνύει τη σημασία modular σχεδιασμού.
Huang et al. (2022)	Κίνα	Ανάπτυξη και εφαρμογή DT για ολοκληρωμένα περιφερειακά ενεργειακά συστήματα σε έξυπνες πόλεις.	Ανάπτυξη μοντέλου & εφαρμογή	Το DT βελτιώνει σημαντικά την ενεργειακή αποδοτικότητα σε επίπεδο smart city. Αποδεικνύεται η αξία της real-time παρακολούθησης ενεργειακών συστημάτων.
Shirowzhan et al. (2020)	Αυστραλία	Αξιοποίηση DT και CyberGIS για βελτίωση συνδεσιμότητας και μέτρηση επίδρασης κατασκευής υποδομών σε smart cities.	Ανάπτυξη μοντέλου & γεωχωρική ανάλυση	Η συνδυαστική χρήση DT και CyberGIS ενισχύει τον αστικό σχεδιασμό. Αναδεικνύεται η αξία γεωχωρικής ανάλυσης για smart city υποδομές.
Broo et al. (2022)	Ηνωμένο Βασίλειο	Σχεδιασμός και υλοποίηση smart infrastructure digital twin.	Ανάπτυξη συστήματος & αξιολόγηση	Αναπτύσσεται λειτουργικό DT για έξυπνη αστική υποδομή. Προσδιορίζονται βασικές απαιτήσεις για επιτυχή υλοποίηση smart infrastructure DT.
Castelli et al. (2019)	Ιταλία	Ανάπτυξη modular, ολοκληρωμένου και εξελισσόμενου μοντέλου για city digital twinning.	Σχεδιασμός συστήματος & ανάπτυξη πρωτοτύπου	Προτείνεται αρθρωτό (modular) μοντέλο αστικής νοημοσύνης. Τονίζεται η ανάγκη για evolving DT που προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες αστικές ανάγκες.

Magaletti et al. (2025)	Ιταλία	Ενσωμάτωση ESG με Digital Twins και Metaverse σε data-driven framework για βιωσιμότητα κτιρίων.	Ανάπτυξη framework & ανάλυση δεδομένων	Αποδεικνύεται η συνέργεια ESG, DT και Metaverse. Το data-driven framework βελτιώνει τη μέτρηση ESG επιδόσεων σε επίπεδο κτιρίου.
Dovolil & Svítek (2024)	Τσεχία	Ενσωμάτωση ESG στο Smart City concept με εστίαση στον τομέα μεταφορών.	Εννοιολογική ανάλυση & ανάπτυξη μοντέλου	Προτείνεται μεθοδολογία ενσωμάτωσης ESG δεικτών στις μεταφορές έξυπνης πόλης. Αναδεικνύεται ο κρίσιμος ρόλος της Governance ESG στον τομέα.
Trivedi & Juyal (2026)	Ινδία / Διεθνής	Πρωώθηση βιώσιμου αστικού μετασχηματισμού μέσω DT, AI και ESG σε smart cities.	Εννοιολογική ανάλυση & ανασκόπηση	Η σύνδεση DT, AI και ESG δημιουργεί ολοκληρωμένο πλαίσιο αστικής κυκλικής οικονομίας. Τονίζεται η σημασία της ανάπτυξης ικανοτήτων (capacity building).
Kljaić et al. (2024)	Κροατία	Χρήση DT models με ESG methodology για μετασχηματισμό του τομέα μεταφορών-ενέργειας με εφαρμογή στον βιώσιμο τουρισμό.	Ανάπτυξη μοντέλου DT & εφαρμογή ESG	Τα DT models με ESG methodology βελτιστοποιούν την ενεργειακή απόδοση στις μεταφορές. Επιδεικνύεται η εφαρμοσιμότητα σε τομέα βιώσιμου τουρισμού.
Markopoulos et al. (2024)	Φινλανδία / Διεθνής	Ευθυγράμμιση DT και Metaverse με SDGs του ΟΗΕ για κατανόηση ανθρώπινης συμπεριφοράς σε smart cities.	Εννοιολογική ανάλυση & σχεδιασμός framework	Τα DT μπορούν να ευθυγραμμιστούν αποτελεσματικά με τους 17 SDGs. Αναδεικνύεται η αξία της ανθρωποκεντρικής προσέγγισης στον σχεδιασμό smart city DT.
Tzachor et al. (2022)	Ηνωμένο Βασίλειο / Αυστραλία	Αξιολόγηση δυνατοτήτων και περιορισμών DT για επίτευξη SDGs.	Εννοιολογική ανάλυση & κριτική αξιολόγηση	Τα DT έχουν σημαντικές δυνατότητες για τους SDGs αλλά και ουσιαστικούς περιορισμούς. Αναδεικνύονται ζητήματα ισότητας, δεδομένων και διακυβέρνησης.
D'Hauwers et al. (2021)	Βέλγιο	Ανάλυση επιχειρηματικών μοντέλων και προκλήσεων υλοποίησης αστικών DT.	Εννοιολογική ανάλυση & ανάλυση επιχειρηματικών μοντέλων	Εντοπίζονται βασικά επιχειρηματικά μοντέλα για αστικά DT. Οι βασικές προκλήσεις αφορούν χρηματοδότηση, ιδιοκτησία δεδομένων και εταιρικές σχέσεις.
De Jaeger & Swerts (2026)	Βέλγιο / Ολλανδία	Διερεύνηση δικαιώματος στο DT πόλης και συμμετοχής πολιτών στο urban DT του Ρότερνταμ.	Case study (Ρότερνταμ) & ποιοτική ανάλυση	Αναδεικνύονται δομικοί περιορισμοί συμμετοχής στα αστικά DT. Η σχεδίαση by-design περιορίζει την πρόσβαση των πολιτών στα δεδομένα της πόλης.
Caprari et al. (2022)	Ιταλία	Αξιολόγηση κατάστασης της τέχνης (state of the art) DT για	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας & εννοιολογική σύνθεση	Τα DT αποτελούν βασικό εργαλείο αστικού σχεδιασμού για Green Deal στόχους.

		αστικό σχεδιασμό στο πλαίσιο European Green Deal.		Προσδιορίζονται μελλοντικές κατευθύνσεις στη σύνδεση DT με κλιματική πολιτική.
--	--	---	--	--