ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Συσκευές Μηδενικής Ενέργειας (Zero Energy Devices) και η Εφαρμογή τους στην Ανάπτυξη Βιώσιμων Έξυπνων Πόλεων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΜΑΝΩΛΑ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ & ΒΕΛΚΟΥ ΠΕΤΡΟΥ

Επιβλέπων : Δημήτριος Σκούτας, Αν. Καθηγητής

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Κορμέντζας Γεώργιος, Καθηγητής
Σκιάνης Χαράλαμπος, Καθηγητής

Σάμος, Μάρτιος 2026

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πρόλογος και ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια ερευνητική μελέτη που πραγματοποιήθηκε κατά το χειμερινό εξάμηνο του ακαδημαϊκού έτους 2025-2026 από τους προπτυχιακούς φοιτητές Μανώλα Δημήτριου και Βέλκου Πέτρου, στο πλαίσιο απόκτησης διπλώματος του Τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Η εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Σκούτα Δημήτριου του τμήματος Μ.Π.Ε.Σ.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό να αναλύσει τον ρόλο και τις δυνατότητες των **σ**υσκευών μηδενικής ενέργειας (Zero Energy Devices) στην ανάπτυξη βιώσιμων και "έξυπνων" πόλεων. Αναλυτικότερα, η εργασία εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο οι συγκεκριμένες τεχνολογίες μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, στην αύξηση της αποδοτικότητας των αστικών υποδομών και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι τεχνολογικές αρχές και μέθοδοι που επιτρέπουν τη λειτουργία αυτών των συσκευών χωρίς εξωτερική πηγή ενέργειας, αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές όπως η ηλιακή, θερμική και κινητική ενέργεια. Παράλληλα, διερευνώνται οι δυνατότητες ενσωμάτωσης των συσκευών μηδενικής ενέργειας σε δίκτυα IoT (Internet of Things) και οι εφαρμογές τους σε τομείς όπως η διαχείριση ενέργειας, οι "έξυπνες" μεταφορές, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και τα "πράσινα" κτίρια.

Τέλος, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον Καθηγητή Σκούτα Δημήτριο, με τον οποίο συνεργαστήκαμε για να συγγράψουμε τη διπλωματική μας. Τον ευχαριστούμε θερμά για την άψογη συνεργασία μας και την πολύτιμη βοήθεια στις δυσκολίες που αντιμετωπίσαμε κατά την διάρκεια της εκπόνησης καθώς επίσης και για την ευκαιρία που μας έδωσε να εκπονήσουμε υπό την καθοδήγηση του αυτή την εργασία.

© 2026

των

ΜΑΝΩΛΑ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ & ΒΕΛΚΟΥ ΠΕΤΡΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.

Πίνακας περιεχομένων

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Γενική Παρουσίαση του Θέματος 1

1.2 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας 3

1.3 Μεθοδολογία της Έρευνας 4

1.4 Δομή της Εργασίας 5

2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 8

2.1 Ορισμός Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας 8

2.2 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας 10

2.3 Βιώσιμες Πόλεις: Ορισμός και Στρατηγικές 11

2.4 Σχέση Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας με τις Βιώσιμες Πόλεις 13

2.5 Δείκτες Αξιολόγησης Βιωσιμότητας σε Έξυπνες Πόλεις 15

3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 18

3.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα 20

3.2 Αιολική Ενέργεια 22

3.3 Γεωθερμική Ενέργεια 23

3.4 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας 25

3.5 Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών 27

3.6 Τεχνολογίες Συλλογής και Ανάκτησης Ενέργειας 29

3.7 Μικροδίκτυα και Ενεργειακή Αυτονομία 31

3.8 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Systems) 34

3.8.1 Smart Grids και ψηφιακή διαχείριση ενέργειας 34

3.8.2 Ενεργειακός έλεγχος και βελτιστοποίηση λειτουργίας 35

3.8.3 Διαχείριση φορτίου και εξισορρόπηση ζήτησης 35

3.8.4 Ρόλος των EMS στις βιώσιμες και έξυπνες πόλεις 36

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΠΟΛΕΙΣ 37

4.1 Στρατηγικές Ενσωμάτωσης Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας 37

4.2 Μελέτες Περίπτωσης Επιτυχημένων Εφαρμογών 39

4.2.1 Κοπεγχάγη 39

4.2.2 Παρίσι 40

4.2.3 Αμβούργο 41

4.2.4 Ποσοτική και ποιοτική σύγκριση 41

4.3 Προκλήσεις και Ευκαιρίες 42
4.4 Ρόλος των Ψηφιακών Τεχνολογιών στις Βιώσιμες Πόλεις 44
4.4.1 Internet of Things (IoT) στις έξυπνες πόλεις 44
4.4.2 Αισθητήρες περιβάλλοντος 45
4.4.3 Συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων 46
4.4.4 Σύνδεση ψηφιακών τεχνολογιών με τις συσκευές μηδενικής ενέργειας 47
4.5 Ενεργειακά Αυτόνομες Αστικές Υποδομές 47
5 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 54
5.1 Ανάλυση Κόστους και Οφέλους 54
5.2 Οικονομικές Στρατηγικές για Βιώσιμες Πόλεις 56
5.3 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση 57
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 60
6.1 Σύνοψη Ευρημάτων 60
6.1.1 Εννοιολογική και τεχνολογική αποτίμηση των συσκευών μηδενικής ενέργειας 60
6.1.2 Εφαρμογή στις βιώσιμες πόλεις και οικονομικο-περιβαλλοντική διάσταση 61
6.1.3 Κύριες δυσκολίες και συνολική αποτίμηση 62
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα 63
6.2.1 Τεχνολογικές κατευθύνσεις και βελτιστοποίηση συστημάτων 63
6.2.2 Διαλειτουργικότητα, ασφάλεια και εμπειρική αξιολόγηση 63
6.2.3 Συνεργατικά μοντέλα και προοπτικές εφαρμογή 64
6.3 Εφαρμογές Πολιτικής και Στρατηγικές Ανάπτυξης 65
6.3.1 Στρατηγικές κλιμάκωσης και μοντέλο ωρίμανσης έργων 65
6.3.2 Ο ρόλος των κυβερνήσεων: ρυθμιστικά και χρηματοδοτικά εργαλεία 66
6.3.3 Διεθνείς οργανισμοί, διακυβέρνηση δεδομένων και εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα 66
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ 68

Πίνακας Αρκτικόλεξων

Ελληνικά Αρκτικόλεξα:

Αρκτικόλεξο	Επεξήγηση
Α.Π.Ε.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Α.Ε.Π.	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν

Ξενόγλωσσα Αρκτικόλεξα:

Αρκτικόλεξο	Επεξήγηση
IoT	Internet of Things – Διαδίκτυο των Πραγμάτων
nZEB	Nearly Zero Energy Building – Κτίριο Σχεδόν Μηδενικής Ενεργειακής Κατανάλωσης
ZEB	Zero Energy Building – Κτίριο Μηδενικής Ενέργειας
EMS	Energy Management Systems – Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας
LED	Light Emitting Diode – Δίοδος Εκπομπής Φωτός
NPV	Net Present Value – Καθαρή Παρούσα Αξία
IRR	Internal Rate of Return – Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης
LCA	Life Cycle Assessment – Ανάλυση Κύκλου Ζωής
TCO	Total Cost of Ownership – Συνολικό Κόστος Ιδιοκτησίας
KPI/KPIs	Key Performance Indicators – Δείκτες Απόδοσης
ISO	International Organization for Standardization – Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών
CAES	Compressed Air Energy Storage – Αποθήκευση Ενέργειας μέσω Συμπιεσμένου Αέρα
COP	Coefficient of Performance – Συντελεστής Απόδοσης
SECAP	Sustainable Energy and Climate Action Plan – Σχέδιο Δράσης για τη Βιώσιμη Ενέργεια και το Κλίμα
SDGs	Sustainable Development Goals – Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης
SSC	Smart Sustainable Cities – Έξυπνες Βιώσιμες Πόλεις
ITU	International Telecommunication Union – Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών

UNECE	United Nations Economic Commission for Europe – Οικονομική Επιτροπή των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη
UN	United Nations – Ηνωμένα Έθνη
NREL	National Renewable Energy Laboratory – Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΗΠΑ)
USCM	Unified Smart City Model – Ενοποιημένο Μοντέλο Έξυπνης Πόλης
DC	Direct Current – Συνεχές Ρεύμα (στο κείμενο: μετατροπείς DC-DC)
CO_2	Carbon Dioxide – Διοξείδιο του Άνθρακα
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network – Δίκτυο Ευρείας Περιοχής Μεγάλης Εμβέλειας

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση μορφών ενέργειας....28
Πίνακας 2: Σύγκριση Τεχνολογιών Αποθήκευσης....29
Πίνακας 3: Ποσοτική και ποιοτική σύγκριση....41
Πίνακας 4: Αποτύπωση δομής κόστους....55
Πίνακας 5: Σύνοψη βασικών ευρημάτων εργασίας....63
Πίνακας 6: Σύνοψη προτάσεων για μελλοντική έρευνα....65
Πίνακας 7: Σύνοψη εφαρμογών πολιτικής και στρατηγικών ανάπτυξης....67

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Πυλώνες μιας βιώσιμης πόλης 12

Εικόνα 2: Παράδειγμα πλαισίου δεικτών αξιολόγησης βιωσιμότητας σε έξυπνες πόλεις, το οποίο περιλαμβάνει περιβαλλοντικούς, ενεργειακούς, κοινωνικούς και οικονομικούς δείκτες 16

Εικόνα 3: Παράδειγμα ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών και αιολικής ενέργειας σε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας 19

Εικόνα 4: Παράδειγμα δομής φωτοβολταϊκού συστήματος 20

Εικόνα 5: Δομή και βασικά μέρη ανεμογεννήτριας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 22

Εικόνα 6: Διάγραμμα λειτουργίας γεωθερμικού συστήματος αξιοποίησης θερμικής ενέργειας από το υπέδαφος 24

Εικόνα 7: Κατηγορίες τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας 26

Εικόνα 8: Ενδεικτική αρχιτεκτονική μικροδικτύου που συνδυάζει κατανεμημένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης και τοπικά φορτία, με δυνατότητα λειτουργίας είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο είτε αυτόνομα 33

Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική Έξυπνης Πόλης 38

Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική IoT σε έξυπνη πόλη 45

Εικόνα 11: Δίκτυο αισθητήρων περιβάλλοντος και συλλογή δεδομένων 46

Εικόνα 12: Παράδειγμα συστήματος έξυπνου φωτισμού δρόμων που λειτουργεί με φωτοβολταϊκά πάνελ, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και αισθητήρες για δυναμική ρύθμιση φωτεινότητας 48

Εικόνα 13: Έξυπνος ιστός φωτισμού που ενσωματώνει φωτισμό LED, αισθητήρες περιβάλλοντος και συστήματα επικοινωνίας για αστικές υπηρεσίες 49

Εικόνα 14: Δίκτυο αισθητήρων ποιότητας αέρα σε αστικό περιβάλλον για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με ατμοσφαιρικούς ρύπους και περιβαλλοντικές συνθήκες 50

Εικόνα 15: Ενεργειακά αυτόνομη στάση λεωφορείου 51

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Συσκευές Μηδενικής Ενέργειας (Zero Energy Devices) και η Εφαρμογή τους στην Ανάπτυξη Βιώσιμων Έξυπνων Πόλεων» εξετάζει τον ρόλο των τεχνολογιών μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης στη μετάβαση προς ένα βιώσιμο και ψηφιακά αναβαθμισμένο αστικό περιβάλλον. Στο πλαίσιο της παγκόσμιας ενεργειακής κρίσης, της κλιματικής αλλαγής και της αυξανόμενης αστικοποίησης, οι πόλεις καλούνται να υιοθετήσουν καινοτόμες λύσεις που μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, διατηρώντας παράλληλα υψηλό επίπεδο ποιότητας ζωής. Η εργασία ξεκινά με την ανάλυση του θεωρητικού πλαισίου που αφορά τις έννοιες των συσκευών μηδενικής ενέργειας, των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης (nZEB - Nearly Zero Energy Building), της ενεργειακής αποδοτικότητας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των βιώσιμων και έξυπνων πόλεων, καθώς και οι διεθνείς δείκτες και πρότυπα αξιολόγησης της βιωσιμότητάς τους. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη διασύνδεση ενεργειακών συστημάτων, ψηφιακών τεχνολογιών και υποδομών, που συνθέτουν το σύγχρονο οικοσύστημα μιας έξυπνης πόλης.

Στη συνέχεια, αναλύονται οι βασικές τεχνολογίες που υποστηρίζουν την ανάπτυξη συσκευών και συστημάτων μηδενικής ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, οι μικρές ανεμογεννήτριες, τα γεωθερμικά συστήματα, οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας και οι εφαρμογές ενεργειακής συγκομιδής (energy harvesting) για ασύρματες συσκευές και αισθητήρες IoT (Internet of Things). Εξετάζεται η ενσωμάτωσή τους σε αστικό περιβάλλον, με έμφαση σε εφαρμογές όπως ο έξυπνος δημόσιος φωτισμός, τα ενεργειακά αυτόνομα κτίρια και τα αποκεντρωμένα ενεργειακά δίκτυα. Η έρευνα περιλαμβάνει επίσης ανάλυση μελετών περίπτωσης από ευρωπαϊκές πόλεις που εφαρμόζουν στρατηγικές κλιματικής ουδετερότητας και έξυπνης ενεργειακής διαχείρισης, αναδεικνύοντας βέλτιστες πρακτικές και προκλήσεις. Επιπλέον, πραγματοποιείται αξιολόγηση των οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω εργαλείων όπως η ανάλυση κόστους-οφέλους και η ανάλυση κύκλου ζωής, προκειμένου να αποτιμηθεί η βιωσιμότητα των τεχνολογικών λύσεων.

Συμπερασματικά, η εργασία καταδεικνύει ότι οι συσκευές μηδενικής ενέργειας μπορούν να αποτελέσουν βασικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης των πόλεων, συμβάλλοντας στη μείωση της ενεργειακής ζήτησης, στην αποκέντρωση της παραγωγής και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των αστικών συστημάτων. Παρά τις τεχνολογικές και θεσμικές προκλήσεις, η συνδυασμένη αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ψηφιακών υποδομών και έξυπνων δικτύων δημιουργεί τις προϋποθέσεις για ένα βιώσιμο, κλιματικά ουδέτερο και τεχνολογικά εξελιγμένο αστικό μέλλον.

Λέξεις Κλειδιά: *Συσκευές Μηδενικής Ενέργειας, Έξυπνες Πόλεις, Βιώσιμη Αστική Ανάπτυξη*

Abstract

This thesis, entitled "Zero Energy Devices and Their Application in the Development of Sustainable Smart Cities," examines the role of zero-energy technologies in the transition toward a sustainable and digitally enhanced urban environment. In the context of the global energy crisis, climate change, and rapid urbanization, cities are required to adopt innovative solutions that reduce energy consumption and greenhouse gas emissions while maintaining a high quality of life. The study begins with an analysis of the theoretical framework concerning zero energy devices, nearly Zero Energy Buildings (nZEB - Nearly Zero Energy Building), energy efficiency, and renewable energy sources. It also presents the fundamental characteristics of sustainable and smart cities, along with international indicators and standards used to assess urban sustainability. Emphasis is placed on the integration of energy systems, digital technologies, and infrastructure, which together form the modern ecosystem of a smart city.

Subsequently, the thesis analyzes the core technologies that support the development of zero energy devices and systems, including photovoltaic systems, small-scale wind turbines, geothermal technologies, energy storage systems, and energy harvesting applications for wireless devices and IoT (Internet of Things_ sensors. Their integration into the urban environment is examined, with special focus on applications such as smart public lighting, energy-autonomous buildings, and decentralized energy networks. The research further includes an analysis of case studies from European cities that implement climate neutrality and smart energy management strategies, highlighting best practices as well as existing challenges. In addition, the economic and environmental impacts of these technologies are evaluated through tools such as cost–benefit analysis and life cycle assessment, to determine their overall sustainability and feasibility.

In conclusion, the thesis demonstrates that zero energy devices can serve as a key pillar in the energy transition of cities, contributing to reduced energy demand, decentralized energy production, and enhanced resilience of urban systems. Despite technological, economic, and institutional challenges, the combined utilization of renewable energy sources, digital infrastructures, and smart grids creates the necessary conditions for a sustainable, climate-neutral, and technologically advanced urban future.

Keywords: *Zero Energy Devices, Smart Cities, Sustainable Urban Development*

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενική Παρουσίαση του Θέματος

Τα τελευταία χρόνια, η ταχεία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και η συνεχής μετακίνηση ανθρώπων προς τα αστικά κέντρα έχουν οδηγήσει σε έντονη αστικοποίηση. Οι πόλεις εξελίσσονται σε βασικούς πυρήνες οικονομικής ανάπτυξης, κοινωνικής δραστηριότητας και τεχνολογικής προόδου, ωστόσο ταυτόχρονα αποτελούν και τις περιοχές με τη μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας και παραγωγή ρύπων. Η λειτουργία των αστικών υποδομών (κτίρια, μεταφορές, δημόσιος φωτισμός, δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης, υπηρεσίες) απαιτεί τεράστιες ποσότητες ενέργειας, γεγονός που αυξάνει την πίεση στα ενεργειακά συστήματα και συμβάλλει σημαντικά στην κλιματική αλλαγή.

Επομένως, η έννοια της βιωσιμότητας αποκτά καθοριστική σημασία για τη σύγχρονη αστική ανάπτυξη. Μια βιώσιμη πόλη στοχεύει στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων, στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών και στη δημιουργία ανθεκτικών υποδομών που μπορούν να ανταπεξέλθουν σε μελλοντικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις. Η ανάγκη για ενεργειακή αποδοτικότητα και μετάβαση σε καθαρότερες μορφές ενέργειας αποτελεί βασικό άξονα αυτής της στρατηγικής.

Παράλληλα με τη βιώσιμη ανάπτυξη, οι πόλεις καλούνται να προσαρμοστούν και στις απαιτήσεις της ψηφιακής εποχής. Έτσι, αναδύεται η έννοια της έξυπνης πόλης (Smart City), η οποία βασίζεται στη χρήση τεχνολογιών πληροφορικής, αισθητήρων, δικτύων επικοινωνίας και ανάλυσης δεδομένων, ώστε να επιτυγχάνεται πιο αποτελεσματική διαχείριση των αστικών λειτουργιών. Για παράδειγμα, συστήματα "έξυπνου φωτισμού" μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προσαρμόζοντας τη φωτεινότητα ανάλογα με την κίνηση, ενώ "έξυπνα" δίκτυα ενέργειας (smart grids) μπορούν να βελτιώσουν την κατανομή φορτίου και να ενσωματώσουν μεγαλύτερο ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η σύνδεση της έξυπνης πόλης με τη βιωσιμότητα δημιουργεί τον όρο βιώσιμη έξυπνη πόλη, όπου η τεχνολογία δεν εφαρμόζεται απλώς για ευκολία ή αυτοματοποίηση, αλλά με στόχο την περιβαλλοντική προστασία και την ορθολογική χρήση της ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο εντάσσεται και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας: οι συσκευές μηδενικής ενέργειας (Zero Energy Devices) και η εφαρμογή τους στις βιώσιμες έξυπνες πόλεις. Οι συσκευές αυτές περιλαμβάνουν τεχνολογίες ή συστήματα που μπορούν να λειτουργούν με ελάχιστη ή μηδενική εξωτερική κατανάλωση ενέργειας, αξιοποιώντας είτε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε μηχανισμούς συλλογής και ανάκτησης ενέργειας από το περιβάλλον. Με άλλα λόγια, πρόκειται για λύσεις που μπορούν να αυτοτροφοδοτούνται ή να καλύπτουν μεγάλο μέρος των ενεργειακών τους αναγκών χωρίς συνεχή εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Η έννοια "μηδενικής ενέργειας" δεν σημαίνει απαραίτητα ότι μια συσκευή δεν καταναλώνει καθόλου ενέργεια, αλλά ότι μπορεί να επιτυγχάνει ενεργειακή ισορροπία, δηλαδή η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία της να καλύπτεται από ενέργεια που παράγεται τοπικά ή συλλέγεται από το περιβάλλον. Τέτοιες συσκευές μπορεί να περιλαμβάνουν μικρά φωτοβολταϊκά πάνελ για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ανεμογεννήτριες μικρής κλίμακας, συστήματα αποθήκευσης (μπαταρίες) ή τεχνολογίες ενεργειακής συλλογής (energy harvesting), όπως αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας, της θερμότητας ή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η σημασία των συσκευών μηδενικής ενέργειας στις πόλεις είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλούς τομείς της αστικής ζωής. Για παράδειγμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε:

- Δημόσιο φωτισμό με αυτόνομα φωτοβολταϊκά φωτιστικά σώματα, μειώνοντας την κατανάλωση του δικτύου.
- Αισθητήρες περιβάλλοντος (π.χ. ποιότητας αέρα, θορύβου, θερμοκρασίας) που λειτουργούν χωρίς ανάγκη συχνής αντικατάστασης μπαταριών.
- Συστήματα έξυπνης στάθμευσης και υποδομές IoT (Internet of Things) που απαιτούν συνεχή λειτουργία και επικοινωνία.
- Έξυπνες στάσεις λεωφορείων, οθόνες ενημέρωσης και συστήματα πληροφόρησης πολιτών, με ενσωμάτωση Α.Π.Ε..
- Κτίρια και κατοικίες, μέσω ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων και εφαρμογών εξοικονόμησης ενέργειας.

Η εφαρμογή τέτοιων λύσεων μπορεί να οδηγήσει σε πολλαπλά οφέλη. Αρχικά, μειώνει τη συνολική ενεργειακή κατανάλωση της πόλης και συνεπώς το κόστος λειτουργίας των υποδομών. Επιπλέον, περιορίζει τις εκπομπές ρύπων, συμβάλλοντας στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και την ανθεκτικότητα των πόλεων, καθώς η ύπαρξη αποκεντρωμένων και αυτόνομων συστημάτων μειώνει την εξάρτηση από κεντρικά δίκτυα που μπορεί να παρουσιάσουν βλάβες ή υπερφόρτωση.

Συνολικά, η μετάβαση προς βιώσιμες έξυπνες πόλεις απαιτεί τόσο την ανάπτυξη "έξυπνων" τεχνολογιών όσο και τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας. Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας αποτελούν μια από τις πιο υποσχόμενες λύσεις σε αυτή τη μετάβαση, καθώς συνδυάζουν την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών, τη μείωση της κατανάλωσης και την τεχνολογική καινοτομία. Η μελέτη τους είναι κρίσιμη για τη διαμόρφωση των πόλεων του μέλλοντος, οι οποίες θα είναι ταυτόχρονα λειτουργικές, έξυπνες, ανθεκτικές και περιβαλλοντικά υπεύθυνες.

1.2 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των συσκευών μηδενικής ενέργειας (Zero Energy Devices) και στον τρόπο με τον οποίο αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν ως τεχνολογικά εργαλεία για την υποστήριξη της μετάβασης προς τις βιώσιμες έξυπνες πόλεις. Η έντονη ενεργειακή κατανάλωση των αστικών κέντρων, σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές πιέσεις που προκύπτουν από την κλιματική αλλαγή, καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη και εφαρμογή λύσεων που μειώνουν την εξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας και ενισχύουν τη χρήση ανανεώσιμων πηγών.

Σκοπός της εργασίας είναι να εξεταστεί σε βάθος η έννοια των συσκευών μηδενικής ενέργειας, να αναλυθούν οι βασικές τεχνολογίες που τις υποστηρίζουν, καθώς και να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής τους σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα. Η έρευνα αποσκοπεί επίσης στην κατανόηση των προϋποθέσεων που απαιτούνται ώστε οι τεχνολογίες αυτές να ενσωματωθούν με επιτυχία στις υποδομές μιας πόλης, λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, οικονομικούς και θεσμικούς παράγοντες.

Επιπλέον, στόχος είναι να αναδειχθεί η συμβολή των συσκευών μηδενικής ενέργειας στην επίτευξη των βασικών χαρακτηριστικών μιας βιώσιμης πόλης, όπως είναι η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, η ενίσχυση της ενεργειακής αυτονομίας και η προώθηση "πράσινων" τεχνολογιών σε κτιριακό και αστικό επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία επιχειρεί να συνδέσει τη θεωρητική διάσταση των τεχνολογιών μηδενικής ενέργειας με τις πρακτικές απαιτήσεις και ανάγκες που προκύπτουν από την πραγματικότητα των σύγχρονων πόλεων.

Οι βασικοί στόχοι της εργασίας μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:

1. **Κατανόηση και οριοθέτηση της έννοιας των συσκευών μηδενικής ενέργειας**: Αρχικά, επιδιώκεται να δοθεί σαφής ορισμός του όρου "μηδενική ενέργεια", να παρουσιαστούν τα βασικά χαρακτηριστικά τέτοιων συσκευών και να γίνει διάκριση ανάμεσα σε έννοιες όπως "χαμηλής κατανάλωσης", "ενεργειακά αυτόνομες" και "ενεργειακά ουδέτερες" εφαρμογές.

2. **Παρουσίαση και ανάλυση βασικών τεχνολογιών που συνδέονται με μηδενική ενεργειακή λειτουργία**: Η εργασία στοχεύει στην αναλυτική παρουσίαση τεχνολογιών όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά συστήματα μικρής κλίμακας, γεωθερμικές εφαρμογές, αλλά και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Η ανάλυση περιλαμβάνει τόσο τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και τη λειτουργική τους αξιοποίηση στο αστικό περιβάλλον.

3. **Διερεύνηση των δυνατοτήτων ενσωμάτωσης σε αστικές υποδομές και υπηρεσίες**: Ένας σημαντικός στόχος είναι να εξεταστεί πώς οι συσκευές μηδενικής ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν σε τομείς όπως ο δημόσιος φωτισμός, οι αισθητήρες IoT, οι μεταφορές, οι έξυπνες υποδομές, αλλά και σε κτιριακές εγκαταστάσεις. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη δυνατότητα αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας και στη μείωση του φορτίου των κεντρικών δικτύων.

4. **Αξιολόγηση πλεονεκτημάτων και περιορισμών εφαρμογής**: Στο πλαίσιο της εργασίας εξετάζονται οι θετικές επιδράσεις από τη χρήση τέτοιων συσκευών, όπως η εξοικονόμηση

ενέργειας και η περιβαλλοντική προστασία, αλλά και οι περιορισμοί που ενδέχεται να εμφανιστούν. Αυτοί μπορεί να σχετίζονται με το κόστος, τη συντήρηση, τις τεχνικές δυσκολίες, τη μεταβλητότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή και την ανάγκη για κατάλληλο θεσμικό και ρυθμιστικό πλαίσιο.

5. **Μελέτη παραδειγμάτων και εφαρμογών σε πόλεις (μελέτες περίπτωσης)**: Η εργασία στοχεύει στην παρουσίαση παραδειγμάτων πόλεων που έχουν υλοποιήσει ή προωθήσει έργα και πολιτικές σχετικές με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες μηδενικής κατανάλωσης. Μέσα από τις μελέτες περίπτωσης γίνεται αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των δράσεων και των δυσκολιών που αντιμετωπίστηκαν.

6. **Οικονομική και περιβαλλοντική αποτίμηση**: Ένας ακόμη βασικός στόχος είναι η εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων από την εγκατάσταση και λειτουργία συσκευών μηδενικής ενέργειας, καθώς και η περιβαλλοντική αξιολόγηση μέσω παραμέτρων όπως η μείωση εκπομπών CO_2 και η εξοικονόμηση φυσικών πόρων. Η ανάλυση αυτή βοηθά στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη βιωσιμότητα των επενδύσεων και την αξία τους για τις πόλεις.

Με βάση τα παραπάνω, τα κεντρικά ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας διαμορφώνονται ως εξής:

- Ποιες κατηγορίες συσκευών μηδενικής ενέργειας μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά σε αστικά περιβάλλοντα;
- Ποιες τεχνολογίες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη δυνατότητα αξιοποίησης στις έξυπνες πόλεις, λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα και το κόστος;
- Ποιες είναι οι βασικές τεχνικές, οικονομικές και θεσμικές προκλήσεις για την υλοποίηση λύσεων μηδενικής ενέργειας σε επίπεδο πόλης;
- Ποια είναι τα αναμενόμενα περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη από την ευρεία εφαρμογή τέτοιων τεχνολογιών;

1.3 Μεθοδολογία της Έρευνας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία βασίζεται κυρίως σε θεωρητική και ερευνητική προσέγγιση, με στόχο τη διερεύνηση των συσκευών μηδενικής ενέργειας και της συμβολής τους στην ανάπτυξη βιώσιμων έξυπνων πόλεων. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στηρίζεται στη συλλογή και ανάλυση πληροφοριών από επιστημονικές και τεχνικές πηγές, καθώς και στη μελέτη παραδειγμάτων εφαρμογής αντίστοιχων τεχνολογιών σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα. Η επιλογή αυτής της μεθοδολογίας κρίνεται κατάλληλη, καθώς το θέμα της εργασίας απαιτεί συνδυασμό θεωρητικής κατανόησης των τεχνολογιών και αξιολόγηση της πρακτικής τους χρησιμότητας στο πλαίσιο της σύγχρονης αστικής ανάπτυξης.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό τη συγκέντρωση δεδομένων σχετικά με τον ορισμό των συσκευών μηδενικής ενέργειας, τις βασικές κατηγορίες τεχνολογιών που τις υποστηρίζουν, καθώς και τη σύνδεσή τους με τις αρχές της βιωσιμότητας και της ενεργειακής αποδοτικότητας. Η ανασκόπηση περιλάμβανε επιστημονικά άρθρα, δημοσιευμένες

έρευνες, τεχνικές αναφορές, μελέτες οργανισμών και φορέων, καθώς και σχετικές πηγές που αναφέρονται σε εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και έξυπνων ενεργειακών συστημάτων [1] – [5]. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε σε πηγές που εξετάζουν τη χρήση ανανεώσιμων τεχνολογιών σε αστικά περιβάλλοντα, καθώς και σε εργασίες που παρουσιάζουν συγκριτικά στοιχεία για την αποδοτικότητα, το κόστος και τους περιορισμούς κάθε τεχνολογίας.

Στη συνέχεια, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν οργανώθηκαν και αναλύθηκαν με τρόπο που να επιτρέπει την κατανόηση των βασικών τεχνολογικών λύσεων που σχετίζονται με τις συσκευές μηδενικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τεχνολογίες όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα αιολικά συστήματα μικρής ή μεγάλης κλίμακας, οι γεωθερμικές εφαρμογές και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Για κάθε κατηγορία τεχνολογίας πραγματοποιήθηκε περιγραφική ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών, των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων, καθώς και της δυνατότητας ενσωμάτωσης σε υποδομές πόλεων. Η ανάλυση αυτή συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας πιο ολοκληρωμένης εικόνας για το πώς μπορούν να εφαρμοστούν οι συγκεκριμένες λύσεις στην πράξη και ποιοι παράγοντες επηρεάζουν την απόδοσή τους.

Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση της ανάλυσης μελετών περίπτωσης, προκειμένου να διερευνηθεί πώς συγκεκριμένες πόλεις έχουν υλοποιήσει στρατηγικές βιώσιμης ανάπτυξης και ενεργειακής μετάβασης. Μέσα από την εξέταση επιλεγμένων παραδειγμάτων, έγινε προσπάθεια να αναδειχθούν επιτυχημένες πρακτικές, καθώς και τα εμπόδια που συναντήθηκαν κατά την εφαρμογή τεχνολογιών μηδενικής ενέργειας ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αστικά περιβάλλοντα. Οι μελέτες περίπτωσης λειτουργούν ως πρακτική τεκμηρίωση της θεωρίας, καθώς προσφέρουν πραγματικά δεδομένα και εμπειρίες που μπορούν να αξιοποιηθούν για τη διαμόρφωση συμπερασμάτων και προτάσεων.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε συγκριτική αξιολόγηση των τεχνολογιών μηδενικής ενέργειας με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, όπως η ενεργειακή αποδοτικότητα, η αξιοπιστία, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, η δυνατότητα κλιμάκωσης σε επίπεδο πόλης και η περιβαλλοντική επίδραση. Η συγκριτική αυτή προσέγγιση επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση του ποια τεχνολογία μπορεί να είναι καταλληλότερη ανά περίπτωση, καθώς οι ανάγκες και οι περιορισμοί διαφέρουν από πόλη σε πόλη, ανάλογα με τη γεωγραφική θέση, τις κλιματικές συνθήκες, την υφιστάμενη υποδομή και τους διαθέσιμους πόρους.

Τέλος, τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, της ανάλυσης τεχνολογιών και των μελετών περίπτωσης συνδυάστηκαν, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη συνολική συμβολή των συσκευών μηδενικής ενέργειας στη βιώσιμη ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων. Μέσα από αυτή τη μεθοδολογική διαδικασία επιδιώκεται να δοθεί μια ολοκληρωμένη επιστημονική προσέγγιση, η οποία δεν περιορίζεται μόνο στη θεωρητική περιγραφή, αλλά προχωρά και σε αξιολόγηση της εφαρμοσιμότητας και της πρακτικής αξίας των τεχνολογιών στο αστικό περιβάλλον.

1.4 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία είναι δομημένη με τρόπο ώστε να παρέχει μια ολοκληρωμένη και συστηματική προσέγγιση του θέματος των συσκευών μηδενικής ενέργειας και της συμβολής τους στη δημιουργία και ανάπτυξη βιώσιμων έξυπνων πόλεων. Η διάρθρωση της εργασίας ακολουθεί

μια λογική πορεία, η οποία ξεκινά από τη θεωρητική κατανόηση των βασικών εννοιών και καταλήγει στην ανάλυση εφαρμογών, στην αξιολόγηση αποτελεσμάτων και στη διατύπωση συμπερασμάτων και προτάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, επιδιώκεται να επιτευχθεί σαφήνεια, συνοχή και επιστημονική τεκμηρίωση σε κάθε στάδιο της μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή) παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της εργασίας, με αναφορά στις βασικές έννοιες που σχετίζονται με τις συσκευές μηδενικής ενέργειας και την ανάγκη ενεργειακής αποδοτικότητας στις σύγχρονες πόλεις. Παράλληλα, προσδιορίζονται ο σκοπός και οι στόχοι της έρευνας, καθώς και τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που καθοδηγούν τη μελέτη. Επίσης, περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η συνολική δομή της εργασίας, ώστε να υπάρχει μια σαφής εικόνα της πορείας που θα ακολουθηθεί.

Στο Κεφάλαιο 2 (Θεωρητικό Υπόβαθρο) αναπτύσσεται το επιστημονικό και τεχνολογικό υπόβαθρο που είναι απαραίτητο για την κατανόηση του θέματος. Ειδικότερα, παρουσιάζεται ο ορισμός και τα βασικά χαρακτηριστικά των συσκευών μηδενικής ενέργειας, καθώς και η σύνδεσή τους με την έννοια της ενεργειακής αποδοτικότητας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στη συνέχεια, εξετάζεται η έννοια της βιώσιμης πόλης, τα βασικά της χαρακτηριστικά και οι στρατηγικές που ακολουθούνται διεθνώς για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάλυση της σχέσης μεταξύ συσκευών μηδενικής ενέργειας και βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, προετοιμάζοντας το έδαφος για την παρουσίαση των επιμέρους τεχνολογιών.

Στο Κεφάλαιο 3 (Τεχνολογίες Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας) γίνεται αναλυτική παρουσίαση των βασικών τεχνολογιών που μπορούν να υποστηρίξουν ή να αποτελέσουν συστήματα μηδενικής ενέργειας. Περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας, οι εφαρμογές, καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τεχνολογιών όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα, η αιολική ενέργεια, η γεωθερμία και τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, πραγματοποιείται συγκριτική ανάλυση των τεχνολογιών με βάση κριτήρια όπως η αποδοτικότητα, το κόστος και η καταλληλότητα εφαρμογής σε αστικό περιβάλλον, ώστε να προκύψει μια πιο σαφής εικόνα για τις πιο εφαρμόσιμες λύσεις.

Στο Κεφάλαιο 4 (Εφαρμογή σε Βιώσιμες Πόλεις) εξετάζεται η πρακτική διάσταση του θέματος, δηλαδή πώς οι τεχνολογίες μηδενικής ενέργειας μπορούν να ενσωματωθούν στον αστικό σχεδιασμό και στις λειτουργίες μιας πόλης. Αρχικά παρουσιάζονται στρατηγικές και πολιτικές ενσωμάτωσης, όπως η χρήση χρηματοδοτικών εργαλείων, η ανάπτυξη θεσμικών πλαισίων και η συνεργασία μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα. Στη συνέχεια, αναλύονται μελέτες περίπτωσης πόλεων που έχουν υλοποιήσει επιτυχημένες εφαρμογές βιώσιμων ενεργειακών λύσεων, με σκοπό να αναδειχθούν καλές πρακτικές αλλά και τα βασικά εμπόδια που αντιμετωπίζονται στην πράξη. Τέλος, γίνεται ανάλυση των προκλήσεων και των ευκαιριών που προκύπτουν από την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα.

Στο Κεφάλαιο 5 (Οικονομική και Περιβαλλοντική Αξιολόγηση) πραγματοποιείται αξιολόγηση της εφαρμογής συσκευών μηδενικής ενέργειας από δύο βασικές οπτικές: την οικονομική και την περιβαλλοντική. Αναλύονται το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και τα οικονομικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν σε βάθος χρόνου, όπως η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και η αξιοποίηση κινήτρων ή επιδοτήσεων. Παράλληλα, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με έμφαση στη μείωση εκπομπών CO_2, στην εξοικονόμηση φυσικών

πόρων και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Το κεφάλαιο αυτό συμβάλλει στη συνολική αποτίμηση της βιωσιμότητας των τεχνολογιών μηδενικής ενέργειας, όχι μόνο ως τεχνικές λύσεις αλλά και ως επενδυτικές επιλογές για τις πόλεις.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 (Συμπεράσματα και Προτάσεις) παρουσιάζεται η συνολική σύνοψη των ευρημάτων της εργασίας και εξάγονται τα βασικά συμπεράσματα σχετικά με τον ρόλο των συσκευών μηδενικής ενέργειας στη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Επιπλέον, προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και τεχνολογική εξέλιξη, καθώς και προτάσεις πολιτικής που θα μπορούσαν να ενισχύσουν την εφαρμογή τέτοιων λύσεων σε μεγαλύτερη κλίμακα. Με αυτόν τον τρόπο, η εργασία ολοκληρώνεται προσφέροντας τόσο επιστημονική τεκμηρίωση όσο και πρακτικές προτάσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν σε επίπεδο στρατηγικού σχεδιασμού και ανάπτυξης πόλεων.

2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 Ορισμός Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας

Στη διεθνή βιβλιογραφία, ο όρος "μηδενικής ενέργειας" χρησιμοποιείται σε δύο συμπληρωματικές κλίμακες: (α) σε επίπεδο συσκευής, όπου αναφέρεται σε αισθητήρες και κόμβους IoT που λειτουργούν με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση και τροφοδοτούνται από ενέργεια που συλλέγεται από το περιβάλλον (energy harvesting), επιτυγχάνοντας ενεργειακή ουδετερότητα χωρίς ανάγκη τακτικής αντικατάστασης μπαταριών, και (β) σε επίπεδο συστήματος ή υποδομής, όπου η συνολική κατανάλωση εξισορροπείται από τοπικά παραγόμενη ενέργεια από Α.Π.Ε.. Στην παρούσα εργασία, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας εξετάζονται κυρίως ως τεχνολογίες device-level για εφαρμογές έξυπνης πόλης, ενώ παράλληλα αναλύεται η διασύνδεσή τους με ενεργειακά αυτόνομες αστικές μικρο-υποδομές [6].

Η έννοια των συσκευών μηδενικής ενέργειας (Zero Energy Devices) εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της ενεργειακής μετάβασης και της προσπάθειας για περιορισμό της κατανάλωσης συμβατικών ενεργειακών πόρων. Οι σύγχρονες κοινωνίες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ηλεκτρική ενέργεια και στα ορυκτά καύσιμα για τη λειτουργία των υποδομών τους, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, οι τεχνολογίες που επιτρέπουν τη λειτουργία συστημάτων με ελάχιστη ή μηδενική εξάρτηση από το κεντρικό ενεργειακό δίκτυο αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, ειδικά όταν εφαρμόζονται σε αστικά περιβάλλοντα με υψηλές απαιτήσεις ενέργειας.

Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας μπορούν να οριστούν ως τεχνολογικά συστήματα ή εφαρμογές που έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργούν με μηδενική ή σχεδόν μηδενική καθαρή κατανάλωση ενέργειας από εξωτερικές πηγές [7]. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία τους καλύπτεται από τοπικά παραγόμενη ενέργεια, κυρίως μέσω ανανεώσιμων πηγών, ή από ενέργεια που συλλέγεται και ανακτάται από το περιβάλλον (energy harvesting). Ο στόχος δεν είναι απαραίτητα η πλήρης απουσία κατανάλωσης, αλλά η επίτευξη μιας ενεργειακής ισορροπίας, όπου η συσκευή παράγει ή συλλέγει αρκετή ενέργεια ώστε να καλύπτει τις ανάγκες της, μειώνοντας στο ελάχιστο την ανάγκη για συνεχή τροφοδοσία.

Σημαντικό στοιχείο στον ορισμό των συσκευών μηδενικής ενέργειας είναι η έννοια της καθαρής κατανάλωσης. Μια συσκευή μπορεί να καταναλώνει ενέργεια κατά τη λειτουργία της, όμως αν παράγει ή εξασφαλίζει ισοδύναμη ποσότητα ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ή μηχανισμούς ανάκτησης, τότε μπορεί να θεωρηθεί "μηδενικής ενέργειας" σε επίπεδο συνολικού ισοζυγίου. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν εξετάζονται εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες, όπου η ενεργειακή ζήτηση μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τη χρήση, το περιβάλλον ή τις καιρικές συνθήκες.

Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας δεν αποτελούν μια ενιαία κατηγορία τεχνολογιών, αλλά περιλαμβάνουν πολλές διαφορετικές μορφές και εφαρμογές. Μπορούν να ταξινομηθούν σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η ενεργειακή τους αυτονομία [8]:

1. **Συσκευές που βασίζονται στην τοπική παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε.:** Πρόκειται για συσκευές που ενσωματώνουν μικρής ή μεσαίας κλίμακας συστήματα παραγωγής ενέργειας, όπως φωτοβολταϊκά πάνελ ή μικρές ανεμογεννήτριες. Για παράδειγμα, ένα αυτόνομο φωτιστικό δρόμου με φωτοβολταϊκό πάνελ και μπαταρία μπορεί να λειτουργεί χωρίς σύνδεση στο δίκτυο, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και χρησιμοποιώντας την αποθηκευμένη ενέργεια τη νύχτα.

2. **Συσκευές που αξιοποιούν μηχανισμούς συλλογής/ανάκτησης ενέργειας (energy harvesting):** Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συσκευές που συλλέγουν μικρές ποσότητες ενέργειας από το περιβάλλον, όπως από την κίνηση, τις δονήσεις, τη θερμότητα ή την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τέτοιες τεχνολογίες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για αισθητήρες και συστήματα Internet of Things (IoT), όπου απαιτείται συνεχής λειτουργία με πολύ χαμηλή κατανάλωση.

3. **Συσκευές που βασίζονται σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας:** Η αποθήκευση αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη λειτουργία μηδενικής ενέργειας, ειδικά σε εφαρμογές όπου η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές δεν είναι σταθερή. Οι μπαταρίες, τα συστήματα υπερπυκνωτών (supercapacitors) ή άλλες τεχνολογίες αποθήκευσης επιτρέπουν τη χρήση της παραγόμενης ενέργειας σε χρόνο διαφορετικό από αυτόν που παράγεται.

Επιπλέον, ένα βασικό χαρακτηριστικό των συσκευών μηδενικής ενέργειας είναι ότι συνήθως ενσωματώνουν τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας, ώστε να μειώνουν την κατανάλωση στο ελάχιστο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρονικών χαμηλής ισχύος, αποδοτικών αισθητήρων, "έξυπνων" συστημάτων ελέγχου και αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας ποιότητας αέρα μπορεί να λειτουργεί σε κατάσταση "sleep mode" για μεγάλο χρονικό διάστημα και να ενεργοποιείται μόνο όταν απαιτείται λήψη μετρήσεων ή αποστολή δεδομένων [9]. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η συνολική ενεργειακή κατανάλωση και γίνεται πιο ρεαλιστική η λειτουργία του με ανανεώσιμη ή ανακτημένη ενέργεια.

Επιπλέον, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας συνδέονται άμεσα με τη φιλοσοφία της αποκεντρωμένης ενέργειας. Σε αντίθεση με το παραδοσιακό μοντέλο όπου η ενέργεια παράγεται κεντρικά και διανέμεται στους καταναλωτές, οι συσκευές αυτές επιτρέπουν την παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας σε τοπικό επίπεδο. Αυτό μπορεί να μειώσει τις απώλειες μεταφοράς, να αυξήσει την ανθεκτικότητα των υποδομών και να ενισχύσει την ενεργειακή αυτονομία σε μικροκλίμακα, όπως σε γειτονιές, κτίρια ή επιμέρους αστικές εγκαταστάσεις [10].

Ωστόσο, η υλοποίηση συσκευών μηδενικής ενέργειας δεν είναι πάντα απλή. Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα της ανανεώσιμης ενέργειας (π.χ. ηλιακή ακτινοβολία, άνεμος), οι κλιματικές συνθήκες, οι ανάγκες της εφαρμογής, αλλά και το κόστος των τεχνολογιών αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών Α.Π.Ε., των συστημάτων αποθήκευσης και των έξυπνων συστημάτων ελέγχου δημιουργεί προοπτικές για ευρύτερη εφαρμογή τους, ιδιαίτερα σε πόλεις που επιδιώκουν να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και να επιτύχουν στόχους ενεργειακής ουδετερότητας.

2.2 Ενεργειακή Αποδοτικότητα και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη χρήση ορυκτών καυσίμων, έχει οδηγήσει σε διεθνείς προσπάθειες για περιορισμό της ενεργειακής σπατάλης και για μετάβαση σε πιο αποδοτικά ενεργειακά συστήματα. Η ενεργειακή αποδοτικότητα δεν αφορά μόνο τη μείωση της κατανάλωσης, αλλά κυρίως τη βελτίωση του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιείται η ενέργεια, ώστε να επιτυγχάνονται τα ίδια ή και καλύτερα αποτελέσματα με μικρότερη ενεργειακή δαπάνη.

Συγκεκριμένα, ως ενεργειακή αποδοτικότητα ορίζεται η αναλογία της ωφέλιμης ενέργειας που αξιοποιείται προς την ενέργεια που καταναλώνεται για την εκτέλεση μιας λειτουργίας. Για παράδειγμα, μια αποδοτική συσκευή θέρμανσης μετατρέπει μεγαλύτερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας σε θερμότητα, μειώνοντας τις απώλειες [11]. Αντίστοιχα, ένας λαμπτήρας LED (Light Emitting Diode) παρέχει την ίδια φωτεινότητα με σημαντικά μικρότερη κατανάλωση σε σχέση με έναν συμβατικό λαμπτήρα. Επομένως, η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε επίπεδο συσκευών και εξοπλισμού όσο και σε επίπεδο κτιρίων, βιομηχανίας και ολόκληρων πόλεων.

Η σημασία της ενεργειακής αποδοτικότητας είναι ιδιαίτερα μεγάλη στα αστικά περιβάλλοντα, καθώς οι πόλεις καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, μεταφορές και λειτουργία υποδομών. Η βελτίωση της αποδοτικότητας σε αυτούς τους τομείς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της συνολικής ενεργειακής ζήτησης, μειώνοντας παράλληλα το κόστος λειτουργίας και τις εκπομπές ρύπων. Επιπλέον, η ενεργειακή αποδοτικότητα θεωρείται συχνά το πρώτο και πιο άμεσο βήμα προς τη βιωσιμότητα, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να απαιτείται απαραίτητα ριζική αλλαγή στο ενεργειακό σύστημα, αλλά μέσω αναβάθμισης τεχνολογιών και βελτιστοποίησης της χρήσης. Έτσι, η ενεργειακή αποδοτικότητα συνδέεται άμεσα με την έννοια των συσκευών μηδενικής ενέργειας. Για να μπορέσει μια συσκευή να λειτουργήσει με μηδενικό ή σχεδόν μηδενικό ενεργειακό ισοζύγιο, είναι απαραίτητο να καταναλώνει όσο το δυνατόν λιγότερη ενέργεια. Έτσι, η χρήση αποδοτικών εξαρτημάτων, η εφαρμογή έξυπνων αλγορίθμων διαχείρισης ενέργειας και η ελαχιστοποίηση των απωλειών αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων. Με άλλα λόγια, η ενεργειακή αποδοτικότητα δεν είναι απλώς συμπληρωματική, αλλά αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα για την επίτευξη μηδενικής ενεργειακής λειτουργίας.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) αποτελούν τον δεύτερο βασικό πυλώνα για τη δημιουργία ενός βιώσιμου ενεργειακού μοντέλου. Οι Α.Π.Ε. περιλαμβάνουν πηγές ενέργειας που ανανεώνονται φυσικά και μπορούν να αξιοποιηθούν χωρίς να

εξαντλούνται, όπως η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η γεωθερμική και η ενέργεια από βιομάζα [12]. Η βασική διαφορά τους από τα ορυκτά καύσιμα είναι ότι κατά τη λειτουργία τους παράγουν πολύ μικρότερες ή και μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που τις καθιστά απαραίτητες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η ενσωμάτωση των Α.Π.Ε. σε αστικά περιβάλλοντα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς οι πόλεις διαθέτουν περιορισμένο χώρο και υψηλές ενεργειακές ανάγκες. Ωστόσο, τεχνολογίες όπως τα φωτοβολταϊκά σε στέγες και προσόψεις κτιρίων, οι μικρές ανεμογεννήτριες, τα γεωθερμικά συστήματα και τα δίκτυα τηλεθέρμανσης μπορούν να προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες τοπικής παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, οι Α.Π.Ε. επιτρέπουν την αποκεντρωμένη παραγωγή, γεγονός που ενισχύει την ενεργειακή ανθεκτικότητα των πόλεων και μειώνει την εξάρτηση από κεντρικούς σταθμούς παραγωγής.

Η σχέση μεταξύ ενεργειακής αποδοτικότητας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ιδιαίτερα στενή και αλληλοσυμπληρούμενη. Από τη μία πλευρά, η ενεργειακή αποδοτικότητα μειώνει τη συνολική ζήτηση ενέργειας, κάνοντας πιο εφικτή την κάλυψή της από Α.Π.Ε.. Από την άλλη πλευρά, η χρήση ανανεώσιμων πηγών μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ενέργειας που εξακολουθεί να απαιτείται. Έτσι, η επίτευξη ενός βιώσιμου ενεργειακού συστήματος βασίζεται σε έναν συνδυασμό: πρώτα μειώνεται η κατανάλωση μέσω αποδοτικότητας και στη συνέχεια καλύπτεται το υπόλοιπο μέσω καθαρών πηγών ενέργειας.

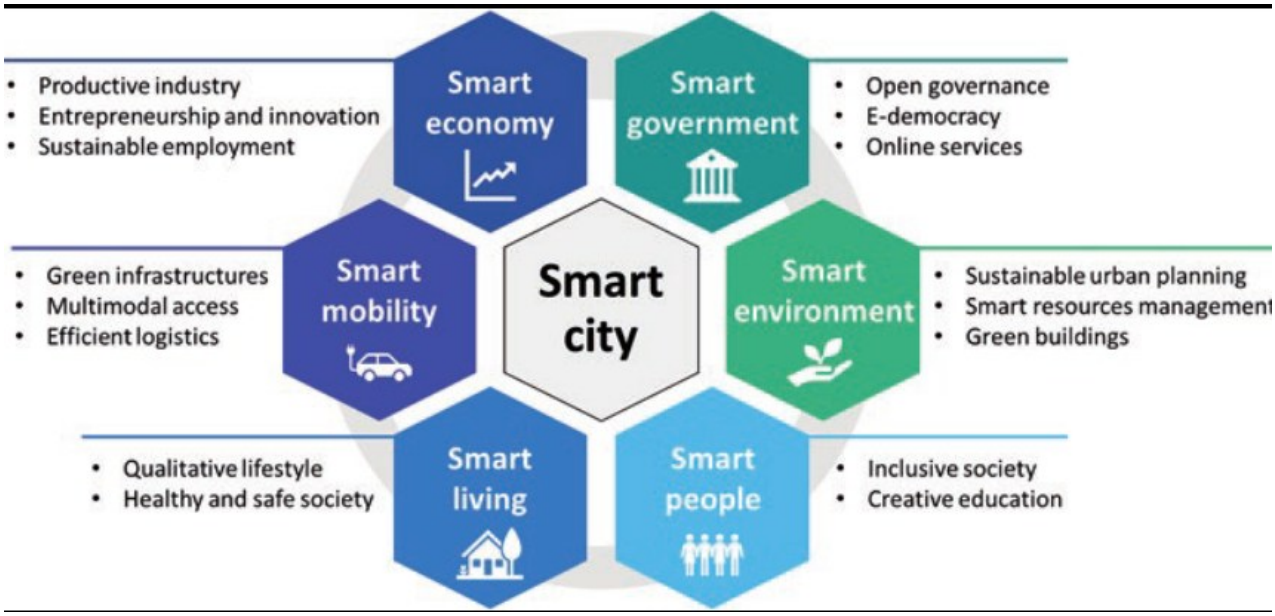
Οι έξυπνες πόλεις αξιοποιούν τεχνολογίες ψηφιακής διαχείρισης και αυτοματισμών, ώστε να μειώνουν τη σπατάλη ενέργειας και να βελτιστοποιούν τη χρήση της. Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών περιλαμβάνουν τα "έξυπνα" δίκτυα (smart grids), τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης κτιρίων (Building Energy Management Systems) και τις εφαρμογές έξυπνου φωτισμού [13]. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την παρακολούθηση της κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο και την προσαρμογή της λειτουργίας συσκευών και υποδομών, ανάλογα με τις ανάγκες και τις συνθήκες.

Επιπλέον, η ανάπτυξη συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας ενισχύει ακόμη περισσότερο τη σύνδεση μεταξύ ενεργειακής αποδοτικότητας και Α.Π.Ε.. Επειδή η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές δεν είναι πάντα σταθερή (π.χ. η ηλιακή ενέργεια εξαρτάται από την ηλιοφάνεια και η αιολική από την ένταση του ανέμου), η αποθήκευση επιτρέπει την εξισορρόπηση παραγωγής και κατανάλωσης. Έτσι, μια πόλη μπορεί να αξιοποιεί καλύτερα την ενέργεια που παράγεται από Α.Π.Ε., μειώνοντας τις απώλειες και αυξάνοντας τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος.

2.3 Βιώσιμες Πόλεις: Ορισμός και Στρατηγικές

Η βιώσιμη πόλη συνιστά ένα ολοκληρωμένο αστικό σύστημα που οργανώνεται με τρόπο ώστε να εξασφαλίζει υψηλή ποιότητα ζωής για τους κατοίκους του, διατηρώντας ταυτόχρονα την οικολογική ισορροπία και τη μακροπρόθεσμη οικονομική σταθερότητα. Ο όρος δεν περιορίζεται στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, αλλά περιλαμβάνει ένα ευρύτερο πλαίσιο αρχών που αφορούν τη διαχείριση φυσικών πόρων, τη χωρική οργάνωση, την κοινωνική συνοχή και τη θεσμική διακυβέρνηση. Σε διεθνές επίπεδο, η έννοια της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης έχει ενσωματωθεί στους στόχους της United Nations μέσω της Ατζέντας 2030 και ειδικότερα του Στόχου 11 για βιώσιμες πόλεις και κοινότητες, ενώ οργανισμοί όπως η International

Telecommunication Union έχουν αναπτύξει πλαίσια αξιολόγησης που συνδέουν την τεχνολογική καινοτομία με μετρήσιμους δείκτες βιωσιμότητας [14].



Εικόνα 1: Πυλώνες μιας βιώσιμης πόλης

(Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/374367415_Smart_Cities_Initiatives_and_Perspectives_in_the_MENA_Region_and_Saudi_Arabia/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic)

Χαρακτηριστικό γνώρισμα μιας βιώσιμης πόλης είναι η συστηματική επιδίωξη ισορροπίας ανάμεσα στις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές παραμέτρους ανάπτυξης. Αυτό μεταφράζεται σε ορθολογική χρήση ενέργειας και νερού, σε περιορισμό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, σε ενίσχυση πράσινων και δημόσιων χώρων, καθώς και σε διασφάλιση ίσης πρόσβασης σε βασικές υπηρεσίες. Παράλληλα, η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών επιτρέπει την παρακολούθηση κρίσιμων μεγεθών σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων και τη βελτίωση της αποδοτικότητας των αστικών λειτουργιών [15]. Συνεπώς, η βιωσιμότητα δεν αντιμετωπίζεται ως αποσπασματική περιβαλλοντική πολιτική, αλλά ως στρατηγικό μοντέλο σχεδιασμού που επηρεάζει το σύνολο των δημοτικών υποδομών και υπηρεσιών.

Οι σύγχρονες πόλεις εφαρμόζουν ένα πολυεπίπεδο πλέγμα στρατηγικών με στόχο τον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας και τη συρρίκνωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Κεντρική κατεύθυνση αποτελεί η αναβάθμιση του κτιριακού αποθέματος, δεδομένου ότι τα κτίρια αντιπροσωπεύουν σημαντικό ποσοστό της συνολικής αστικής κατανάλωσης. Μέσω παρεμβάσεων όπως η βελτίωση της θερμομόνωσης, η αντικατάσταση ενεργοβόρων συστημάτων θέρμανσης και ψύξης, καθώς και η εφαρμογή προηγμένων συστημάτων διαχείρισης κτιρίων, επιτυγχάνεται ουσιαστική μείωση των ενεργειακών αναγκών [16]. Παράλληλα, η σταδιακή μετάβαση σε κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενισχύει τη δυνατότητα τοπικής παραγωγής ενέργειας και περιορίζει την εξάρτηση από συμβατικά καύσιμα.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε αστικές υποδομές, όπως φωτοβολταϊκά σε στέγες και δημόσιους χώρους ή μικρής κλίμακας αιολικά συστήματα, συμβάλλει στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος και στη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η λειτουργία έξυπνων δικτύων επιτρέπει την καλύτερη εξισορρόπηση παραγωγής και ζήτησης, ενώ οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενισχύουν τη σταθερότητα του συστήματος [17], [18]. Παράλληλα, η προώθηση βιώσιμων μεταφορών, η ενίσχυση των δημόσιων συγκοινωνιών και η ανάπτυξη υποδομών ηλεκτροκίνησης μειώνουν τη χρήση ιδιωτικών οχημάτων και περιορίζουν τη ρύπανση.

Τέλος, η αξιοποίηση ψηφιακών συστημάτων παρακολούθησης και ανάλυσης δεδομένων επιτρέπει την ακριβή καταγραφή ενεργειακών ροών και περιβαλλοντικών δεικτών, καθιστώντας δυνατή τη συνεχή βελτιστοποίηση των πολιτικών που εφαρμόζονται [19], [20]. Η συνδυαστική εφαρμογή τεχνολογικών, χωρικών και θεσμικών παρεμβάσεων δημιουργεί τις προϋποθέσεις για έναν αστικό μετασχηματισμό που δεν περιορίζεται σε επιμέρους δράσεις, αλλά διαμορφώνει ένα συνεκτικό και μακροπρόθεσμα βιώσιμο αναπτυξιακό πρότυπο.

2.4 Σχέση Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας με τις Βιώσιμες Πόλεις

Η ενσωμάτωση συσκευών μηδενικής ενέργειας στο σύγχρονο αστικό περιβάλλον αποτελεί μία από τις πλέον καινοτόμες και στρατηγικά κρίσιμες κατευθύνσεις για τη μετάβαση των πόλεων προς πιο βιώσιμα, ανθεκτικά και ενεργειακά αποδοτικά μοντέλα λειτουργίας. Οι πόλεις, ως σύνθετα και δυναμικά συστήματα με αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις και υψηλή συγκέντρωση πληθυσμού, αντιμετωπίζουν ολοένα και εντονότερες περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προκλήσεις. Η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η βελτίωση της ποιότητας ζωής, η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και η ενίσχυση της ανθεκτικότητας απέναντι σε κρίσεις καθιστούν επιτακτική την υιοθέτηση τεχνολογικών λύσεων που συνδυάζουν αποδοτικότητα, αυτονομία και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας αναδεικνύονται ως βασικός πυλώνας του σύγχρονου βιώσιμου αστικού μετασχηματισμού [19].

Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να λειτουργούν με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ισχύος, αξιοποιώντας παράλληλα τεχνολογίες συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον (energy harvesting). Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν τη μετατροπή φυσικών φαινομένων, όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι θερμικές διαφορές μεταξύ επιφανειών, οι μηχανικές δονήσεις που προκαλούνται από την κυκλοφορία οχημάτων ή πεζών, καθώς και τα ραδιοκύματα που εκπέμπονται από υφιστάμενες ασύρματες υποδομές, σε ηλεκτρική ενέργεια ικανή να τροφοδοτήσει αισθητήρες και συστήματα επικοινωνίας χαμηλής ισχύος. Με τον τρόπο αυτό, οι συσκευές επιτυγχάνουν ενεργειακή ουδετερότητα σε επίπεδο λειτουργίας, δηλαδή παράγουν ή συλλέγουν τόση ενέργεια όση απαιτείται για τη συνεχή ή περιοδική λειτουργία τους, χωρίς να εξαρτώνται από συμβατικές πηγές τροφοδοσίας ή από συχνή αντικατάσταση μπαταριών.

Η ιδιότητα αυτή έχει πολλαπλές και ουσιαστικές επιπτώσεις στη διαχείριση και την οργάνωση των αστικών υποδομών. Καταρχάς, μειώνεται σημαντικά το λειτουργικό κόστος που σχετίζεται με τη συντήρηση εκτεταμένων δικτύων αισθητήρων. Σε παραδοσιακά συστήματα, η ανάγκη αντικατάστασης μπαταριών ή η παροχή ηλεκτρικής τροφοδοσίας μέσω καλωδιώσεων δημιουργεί οικονομικές και τεχνικές επιβαρύνσεις, ιδιαίτερα όταν οι συσκευές είναι εγκατεστημένες σε

δυσπρόσιτα σημεία, όπως σε στύλους φωτισμού, σε γέφυρες, σε υπόγειες διαβάσεις ή σε απομακρυσμένες περιοχές της πόλης [19]. Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας, λόγω της αυτονομίας τους, μπορούν να παραμείνουν λειτουργικές για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, γεγονός που διευκολύνει τη μακροχρόνια και κλιμακούμενη ανάπτυξη δικτύων παρακολούθησης.

Επιπλέον, περιορίζεται η παραγωγή ηλεκτρονικών αποβλήτων που προκύπτουν από τη συχνή απόρριψη και αντικατάσταση μπαταριών. Η μείωση των αποβλήτων αυτών συνδέεται άμεσα με τους στόχους της κυκλικής οικονομίας και της υπεύθυνης διαχείρισης πόρων, καθώς συμβάλλει στον περιορισμό της εξόρυξης πρώτων υλών και στη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης από την επεξεργασία και διάθεση επικίνδυνων υλικών. Επομένως, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας δεν λειτουργούν μόνο ως τεχνική λύση εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά και ως εργαλείο περιβαλλοντικής προστασίας σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους.

Σε ένα πλαίσιο βιώσιμης αστικής ανάπτυξης, οι συσκευές αυτές λειτουργούν ως βασικοί κόμβοι συλλογής, επεξεργασίας και μετάδοσης δεδομένων. Η συστηματική και συνεχής παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων, όπως η ποιότητα του αέρα, τα επίπεδα θορύβου, η θερμοκρασία και η υγρασία, η κατανάλωση ενέργειας σε κτίρια, η κυκλοφοριακή ροή, η πληρότητα χώρων στάθμευσης ή ακόμη και η κατάσταση δημοτικών υποδομών, καθίσταται εφικτή μέσω της εγκατάστασης πυκνών και εκτεταμένων δικτύων αισθητήρων. Η δυνατότητα τοποθέτησης μεγάλου αριθμού συσκευών χωρίς σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις επιτρέπει την απόκτηση δεδομένων υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των αστικών αναλύσεων.

Η αξιοποίηση των δεδομένων αυτών ενισχύει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων από τις δημοτικές αρχές και τους φορείς χάραξης πολιτικής. Μέσω της ανάλυσης σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο, καθίσταται δυνατή η έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων, η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας υφιστάμενων μέτρων και η προσαρμογή στρατηγικών με βάση αντικειμενικούς δείκτες. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα μπορεί να οδηγήσει σε στοχευμένες παρεμβάσεις περιορισμού της κυκλοφορίας σε περιόδους αυξημένης ρύπανσης, ενώ η ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας σε δημοτικά κτίρια μπορεί να αναδείξει ευκαιρίες ενεργειακής αναβάθμισης. Με τον τρόπο αυτό, η τεχνολογική καινοτομία μετατρέπεται σε ουσιαστικό εργαλείο περιβαλλοντικής πολιτικής και στρατηγικού σχεδιασμού.

Επιπλέον, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία και την υποστήριξη έξυπνων ενεργειακών δικτύων. Η συνεχής ροή δεδομένων σχετικά με την παραγωγή και τη ζήτηση ενέργειας διευκολύνει τη βελτιστοποίηση της κατανομής φορτίων, την εξισορρόπηση του συστήματος και την αποτελεσματικότερη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική. Σε συνδυασμό με τεχνολογίες αποθήκευσης, τα δίκτυα αυτά αποκτούν μεγαλύτερη ευελιξία και ικανότητα προσαρμογής σε διακυμάνσεις, μειώνοντας την εξάρτηση από συμβατικές, ρυπογόνες πηγές παραγωγής.

Η περιορισμένη ενεργειακή απαίτηση των συσκευών αυτών καθιστά δυνατή τη λειτουργία τους ακόμη και σε περιβάλλοντα με διαλείπουσα ή ασταθή τροφοδοσία. Σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών, ενεργειακών κρίσεων ή διακοπών παροχής, τα αυτόνομα αυτά συστήματα μπορούν να συνεχίσουν να συλλέγουν και να μεταδίδουν κρίσιμες πληροφορίες, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των πόλεων. Η ανθεκτικότητα αυτή δεν αφορά μόνο την τεχνική διάσταση, αλλά

και την κοινωνική, καθώς η έγκαιρη πληροφόρηση μπορεί να συμβάλει στην προστασία της δημόσιας υγείας και ασφάλειας.

Τέλος, η συμβολή των συσκευών μηδενικής ενέργειας υπερβαίνει τη στενή έννοια της ενεργειακής εξοικονόμησης και επεκτείνεται στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ψηφιακού οικοσυστήματος που στηρίζει τη βιωσιμότητα σε βάθος χρόνου [19]. Η συνεχής ροή αξιόπιστων δεδομένων επιτρέπει την αξιολόγηση πολιτικών, την αναπροσαρμογή στόχων και τη σταδιακή βελτίωση των αστικών επιδόσεων σε περιβαλλοντικό, ενεργειακό και κοινωνικό επίπεδο. Η πόλη μετατρέπεται σε ένα δυναμικό σύστημα μάθησης, όπου οι αποφάσεις βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία και όχι σε αποσπασματικές εκτιμήσεις.

Συνεπώς, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας δεν αποτελούν απλώς μία ακόμη τεχνολογική καινοτομία, αλλά ένα δομικό στοιχείο του σύγχρονου βιώσιμου αστικού μετασχηματισμού. Συνδέουν την ενεργειακή αποδοτικότητα με τον ψηφιακό εκσυγχρονισμό, ενισχύουν τη διαφάνεια και τη συμμετοχικότητα στη διαχείριση πόρων και υποστηρίζουν τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική προστασία. Μέσω της ευρείας και στρατηγικής ενσωμάτωσής τους, οι πόλεις μπορούν να εξελιχθούν σε πιο έξυπνα, ανθεκτικά και βιώσιμα οικοσυστήματα, ικανά να ανταποκριθούν στις προκλήσεις του παρόντος και του μέλλοντος.

2.5 Δείκτες Αξιολόγησης Βιωσιμότητας σε Έξυπνες Πόλεις

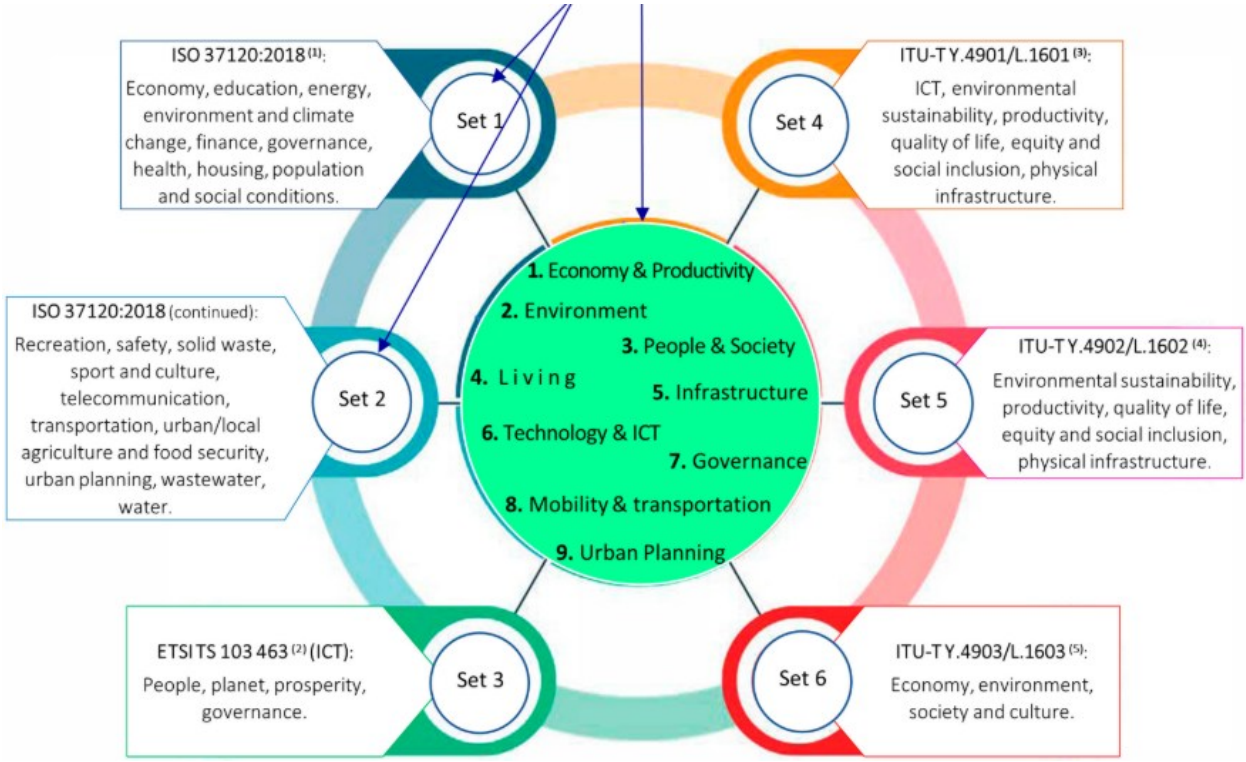
Η αποτίμηση της βιωσιμότητας μιας πόλης δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε γενικές διακηρύξεις πολιτικής ή σε αποσπασματικές περιβαλλοντικές δράσεις, αλλά απαιτεί τη συστηματική χρήση μετρήσιμων και συγκρίσιμων δεικτών. Οι δείκτες αξιολόγησης βιωσιμότητας αποτελούν βασικό εργαλείο στρατηγικού σχεδιασμού, καθώς επιτρέπουν την αντικειμενική αποτύπωση της ενεργειακής, περιβαλλοντικής και κοινωνικοοικονομικής απόδοσης ενός αστικού συστήματος [21]. Μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση της προόδου σε βάθος χρόνου, η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών πόλεων και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας συγκεκριμένων τεχνολογικών ή θεσμικών παρεμβάσεων.

Στο πλαίσιο των βιώσιμων έξυπνων πόλεων, οι δείκτες βιωσιμότητας οργανώνονται συνήθως σε τρεις βασικούς άξονες: τον ενεργειακό, τον περιβαλλοντικό και τον κοινωνικοοικονομικό. Η ενσωμάτωση συσκευών μηδενικής ενέργειας επηρεάζει πρωτίστως τους δύο πρώτους άξονες, χωρίς να αποκλείεται και η έμμεση θετική επίδραση στον τρίτο, μέσω της βελτίωσης της ποιότητας ζωής και της ενίσχυσης της τεχνολογικής καινοτομίας.

Οι ενεργειακοί δείκτες αποτυπώνουν τη δομή, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος μιας πόλης. Ένας από τους βασικότερους δείκτες είναι η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά κάτοικο, η οποία επιτρέπει τη σύγκριση της ενεργειακής έντασης μεταξύ διαφορετικών αστικών περιοχών. Παράλληλα, ιδιαίτερη σημασία έχει το ποσοστό ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, καθώς αντικατοπτρίζει τον βαθμό απεξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και τη μετάβαση σε καθαρότερο ενεργειακό μείγμα [22]. Συμπληρωματικά, η ενεργειακή ένταση σε σχέση με την οικονομική δραστηριότητα, δηλαδή η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου Α.Ε.Π., επιτρέπει την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αστικού παραγωγικού συστήματος. Σημαντικός θεωρείται επίσης ο δείκτης αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, ο οποίος αποτυπώνει το ποσοστό ενέργειας που

παράγεται εντός των ορίων της πόλης μέσω τοπικών εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών ή μικροδικτύων.

Η εφαρμογή συσκευών μηδενικής ενέργειας μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη βελτίωση των παραπάνω δεικτών, καθώς μειώνει τη συνολική ζήτηση από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης και ενισχύει τη λογική της αποκεντρωμένης παραγωγής. Η ευρεία εγκατάσταση ενεργειακά αυτόνομων αισθητήρων, συστημάτων φωτισμού και μικρών αστικών υποδομών οδηγεί σε σταδιακή αποσυμφόρηση του δικτύου και σε περιορισμό των απωλειών μεταφοράς, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα του αστικού συστήματος.



Εικόνα 2: Παράδειγμα πλαισίου δεικτών αξιολόγησης βιωσιμότητας σε έξυπνες πόλεις, το οποίο περιλαμβάνει περιβαλλοντικούς, ενεργειακούς, κοινωνικούς και οικονομικούς δείκτες

(Πηγή: https://www.mdpi.com/2624-6511/6/5/129)

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες επικεντρώνονται κυρίως στο οικολογικό αποτύπωμα της πόλης και στη συμβολή της στην κλιματική αλλαγή. Κεντρική θέση κατέχει ο δείκτης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο, ο οποίος χρησιμοποιείται ευρέως σε διεθνές επίπεδο ως βασικό μέτρο σύγκρισης της περιβαλλοντικής επίδοσης. Επιπλέον, οι συνολικές εκπομπές που σχετίζονται με τον ενεργειακό τομέα παρέχουν εικόνα της επίδρασης των ενεργειακών πολιτικών και των τεχνολογικών επιλογών [23]. Ιδιαίτερη σημασία έχει και η ποσοστιαία μείωση εκπομπών σε σχέση με ένα έτος βάσης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της προόδου στο πλαίσιο εθνικών και διεθνών δεσμεύσεων για την κλιματική ουδετερότητα.

Πέραν των άμεσων εκπομπών κατά τη φάση λειτουργίας, ολοένα και μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στην αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος καθ’ όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής των τεχνολογιών. Η ανάλυση κύκλου ζωής επιτρέπει την εκτίμηση των εκπομπών που συνδέονται με

την παραγωγή πρώτων υλών, την κατασκευή, τη μεταφορά, τη λειτουργία και την τελική απόσυρση ενός συστήματος. Στο πλαίσιο αυτό, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας μπορούν να συμβάλουν σε καθαρή μείωση εκπομπών, υπό την προϋπόθεση ότι ο συνολικός τους κύκλος ζωής παρουσιάζει χαμηλότερο περιβαλλοντικό κόστος σε σύγκριση με συμβατικές λύσεις που βασίζονται σε συνεχή τροφοδοσία από το δίκτυο και σε συχνή αντικατάσταση μπαταριών [24].

Τέλος, αν και η παρούσα εργασία επικεντρώνεται κυρίως στις ενεργειακές και περιβαλλοντικές διαστάσεις, δεν πρέπει να παραβλέπεται η κοινωνικοοικονομική διάσταση της βιωσιμότητας. Δείκτες όπως το κόστος ενέργειας για τα νοικοκυριά, η πρόσβαση σε καθαρές τεχνολογίες, η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στον τομέα της πράσινης τεχνολογίας και η βελτίωση της ποιότητας ζωής μέσω μείωσης ρύπανσης και θορύβου συνδέονται έμμεσα με την υιοθέτηση ενεργειακά αυτόνομων συστημάτων. Η ολιστική αξιολόγηση μιας βιώσιμης έξυπνης πόλης απαιτεί συνεπώς τη συνδυαστική ανάλυση όλων των παραπάνω παραμέτρων.

Η συστηματική χρήση δεικτών βιωσιμότητας επιτρέπει, επομένως, τη μετάβαση από τη θεωρητική περιγραφή των τεχνολογιών μηδενικής ενέργειας σε μια μετρήσιμη και συγκρίσιμη αποτίμηση της συμβολής τους στο αστικό σύστημα. Μέσω αυτής της προσέγγισης, οι πολιτικές και τεχνολογικές παρεμβάσεις μπορούν να αξιολογηθούν όχι μόνο ως καινοτόμες λύσεις, αλλά ως ποσοτικά τεκμηριωμένα εργαλεία επίτευξης ενεργειακής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας.

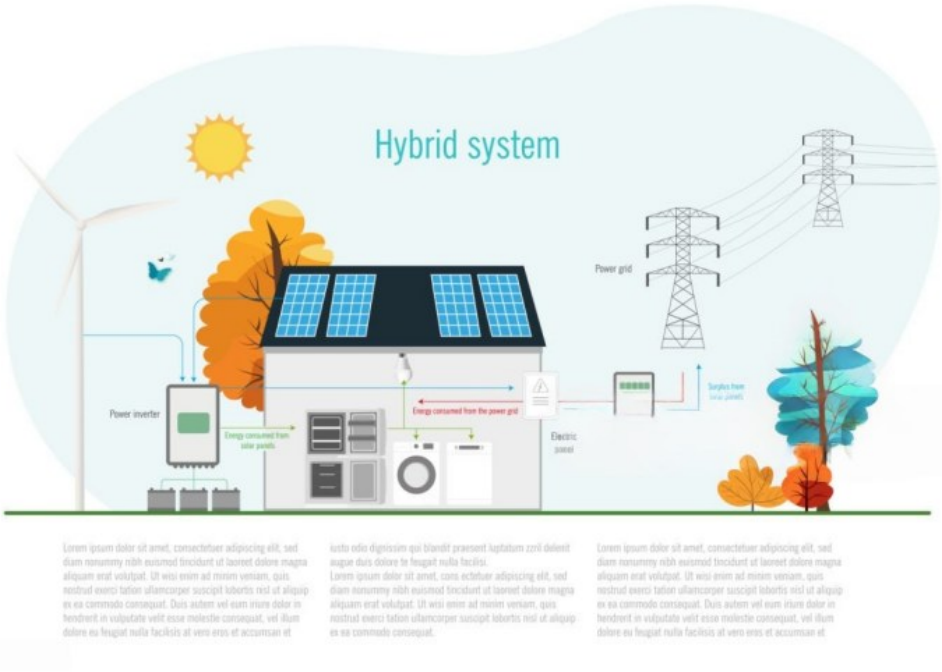
3

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΣΚΕΥΩΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ανάπτυξη τεχνολογιών μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης αποτελεί βασικό στοιχείο για τη μετάβαση σε βιώσιμα ενεργειακά συστήματα και για την αντιμετώπιση των σύγχρονων περιβαλλοντικών και ενεργειακών προκλήσεων. Η συνεχώς αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής, καθιστούν απαραίτητη την αξιοποίηση καινοτόμων ενεργειακών λύσεων που μειώνουν την κατανάλωση συμβατικών καυσίμων και περιορίζουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Στο πλαίσιο αυτό, οι τεχνολογίες μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης συμβάλλουν σημαντικά στην ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών υποδομών, οι οποίες μπορούν να λειτουργούν με ελάχιστη ή ακόμη και μηδενική εξάρτηση από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ενσωματωθούν σε συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά, τα αιολικά και τα γεωθερμικά συστήματα, δημιουργώντας ολοκληρωμένες ενεργειακές λύσεις με μειωμένη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιτρέπει την παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Μέσω της ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών σε σύγχρονες ενεργειακές υποδομές, είναι δυνατή η δημιουργία ενεργειακών συστημάτων που χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα, βιωσιμότητα και αξιοπιστία.

Στα σύγχρονα ενεργειακά δίκτυα, οι τεχνολογίες αυτές λειτουργούν συμπληρωματικά, επιτρέποντας την αξιοποίηση διαφορετικών μορφών ανανεώσιμης ενέργειας και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Η συνδυασμένη λειτουργία πολλαπλών ενεργειακών πηγών ενισχύει την ενεργειακή ευελιξία και συμβάλλει στη σταθερότητα του ενεργειακού συστήματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η παραγωγή ενέργειας από μία μόνο πηγή μπορεί να παρουσιάζει διακυμάνσεις. Επιπλέον, η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και έξυπνων ενεργειακών δικτύων (Smart Grids – Έξυπνα Ενεργειακά Δίκτυα) επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας και την καλύτερη κατανομή της στο ενεργειακό σύστημα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αξιοποιούν την ηλιακή ακτινοβολία για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της φωτοηλεκτρικής διαδικασίας. Τα συστήματα αυτά αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, καθώς μπορούν να εγκατασταθούν τόσο σε κτιριακές εγκαταστάσεις όσο και σε μεγάλες ενεργειακές μονάδες

παραγωγής. Παράλληλα, τα αιολικά συστήματα μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω της περιστροφής των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Η αιολική ενέργεια αποτελεί επίσης σημαντική πηγή καθαρής ενέργειας, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό.



Εικόνα 3: Παράδειγμα ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών και αιολικής ενέργειας σε ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής και διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας

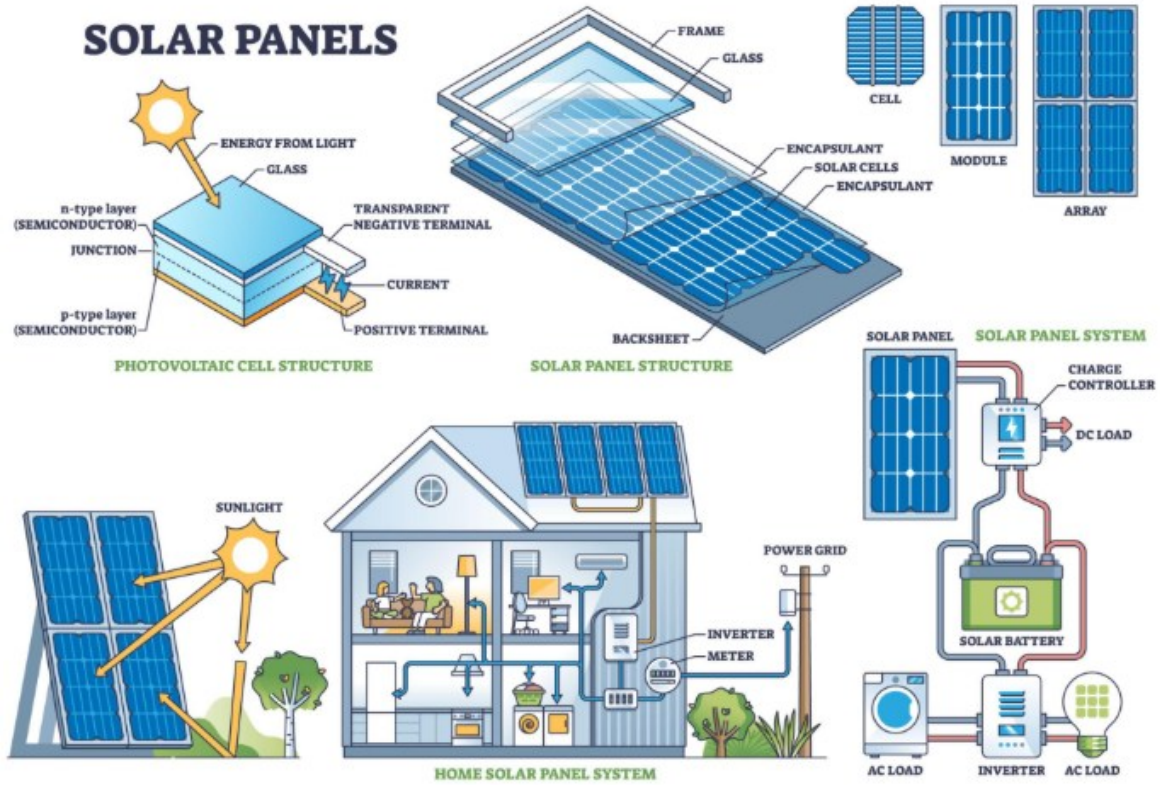
(Πηγή: https://www.whxcable.com/uploads/Hybrid-Solar-System1.png)

Αντίστοιχα, τα γεωθερμικά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης για την παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια χαρακτηρίζεται από σταθερή και συνεχόμενη παραγωγή, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα αξιόπιστη σε σύγκριση με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες. Επιπλέον, η αξιοποίησή της μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη θέρμανση κτιρίων, στη γεωργία και σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Η συνδυασμένη χρήση αυτών των τεχνολογιών οδηγεί στη δημιουργία υβριδικών ενεργειακών συστημάτων, τα οποία μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου, μιας εγκατάστασης ή ακόμη και μιας ολόκληρης πόλης. Τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα βασίζονται στη συνεργασία πολλαπλών πηγών ενέργειας και συστημάτων αποθήκευσης, επιτρέποντας την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία, ενώ παράλληλα μειώνεται η εξάρτηση από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών επιτρέπει την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών υποδομών, οι οποίες συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και στη βιώσιμη ανάπτυξη. Οι έξυπνες πόλεις αξιοποιούν προηγμένα συστήματα διαχείρισης ενέργειας, αισθητήρες και ψηφιακές τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Μέσω της

εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών, καθίσταται δυνατή η δημιουργία βιώσιμων αστικών περιβαλλόντων που βασίζονται σε καθαρές μορφές ενέργειας και αποδοτική ενεργειακή διαχείριση.

3.1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα

Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ημιαγώγιμων υλικών. Ο πυρήνας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου αποτελείται συνήθως από πυρίτιο (μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό ή άμορφο), το οποίο έχει υποστεί κατάλληλη προσμίξη (doping) ώστε να δημιουργηθεί ένωση τύπου p-n. Όταν τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν στην επιφάνεια του κυττάρου, διεγείρουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους προς τη ζώνη αγωγιμότητας, δημιουργώντας ζεύγη ηλεκτρονίων–οπών. Η εσωτερική ηλεκτρική πεδίο της ένωσης p-n κατευθύνει τα φορτία, παράγοντας συνεχή ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικόνα 4: Παράδειγμα δομής φωτοβολταϊκού συστήματος

(Πηγή : https://www.shutterstock.com/el/image-vector/solar-panel-cell-structure-installation-technical-2391496467)

Σε επίπεδο συστήματος, ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από πολλαπλά στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, ώστε να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές τάσης και έντασης [31]. Η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα από φορτία συνεχούς ρεύματος, να αποθηκευτεί σε συστήματα μικρο-αποθήκευσης (όπως υπερπυκνωτές ή μικρές

επαναφορτιζόμενες μπαταρίες) ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα μέσω μετατροπέα (inverter), όταν πρόκειται για μεγαλύτερης κλίμακας εφαρμογές. Σε συσκευές μηδενικής ενέργειας μικρής ισχύος, χρησιμοποιούνται συχνά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαμηλής επιφάνειας, κατάλληλα για λειτουργία ακόμη και σε εσωτερικούς χώρους, όπου η ένταση φωτισμού είναι περιορισμένη.

Στο πλαίσιο των αστικών εφαρμογών, η φωτοβολταϊκή τεχνολογία εμφανίζεται σε δύο βασικές μορφές: αφενός ως ενσωματωμένη πηγή τροφοδοσίας μικρών συσκευών (π.χ. αισθητήρων περιβάλλοντος ή συστημάτων μέτρησης), αφετέρου ως τμήμα μεγαλύτερων εγκαταστάσεων σε κτιριακές ή δημοτικές υποδομές. Στην πρώτη περίπτωση, ο σχεδιασμός εστιάζει στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες φωτισμού, στη μείωση απωλειών κατά τη μετατροπή και στη σταθερότητα λειτουργίας υπό διαλείπουσα παραγωγή. Στη δεύτερη, λαμβάνονται υπόψη ζητήματα προσανατολισμού, σκίασης, θερμοκρασιακών μεταβολών και διασύνδεσης με το δίκτυο.

Η απόδοση ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου εξαρτάται από το υλικό κατασκευής, την ποιότητα επεξεργασίας, το φάσμα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την ηλεκτρική απόδοση, γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία σε πυκνοδομημένα αστικά περιβάλλοντα, όπου αναπτύσσονται υψηλές θερμικές τιμές λόγω του φαινομένου της αστικής θερμικής νησίδας [32]. Επομένως, ο σχεδιασμός φωτοβολταϊκών συστημάτων για συσκευές μηδενικής ενέργειας δεν περιορίζεται μόνο στην επιλογή του κατάλληλου πάνελ, αλλά περιλαμβάνει και την ολοκληρωμένη διαχείριση ισχύος, με στόχο τη διατήρηση ενεργειακού ισοζυγίου σε βάθος χρόνου.

Η χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε συσκευές μηδενικής ενέργειας προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε επίπεδο λειτουργικότητας και βιωσιμότητας. Καταρχάς, η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί ευρέως διαθέσιμη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, ιδίως σε περιοχές με υψηλή ηλιοφάνεια. Η τεχνολογία χαρακτηρίζεται από απουσία κινούμενων μερών, γεγονός που περιορίζει τη φθορά και μειώνει τις ανάγκες συντήρησης. Η κλιμακωσιμότητα των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιτρέπει την προσαρμογή τους σε διαφορετικά επίπεδα ισχύος, από μικροσκοπικούς αισθητήρες έως μεγαλύτερες αστικές εγκαταστάσεις. Επιπλέον, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν συνοδεύεται από άμεσες εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία, στοιχείο που ευθυγραμμίζεται με τις στρατηγικές περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

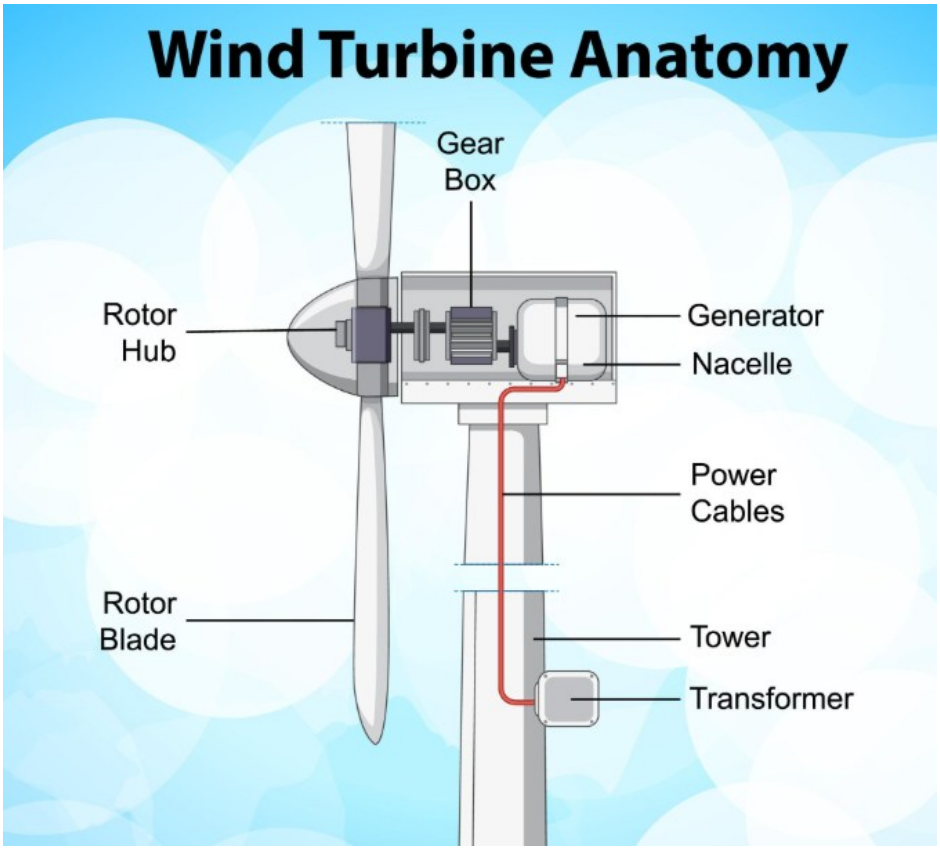
Ωστόσο, η απόδοση των φωτοβολταϊκών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες φωτισμού, οι οποίες μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών. Σε περιβάλλοντα με σκίαση, περιορισμένη ηλιοφάνεια ή έντονη ατμοσφαιρική ρύπανση, η παραγόμενη ισχύς μπορεί να μην επαρκεί για τη συνεχή λειτουργία μιας συσκευής χωρίς τη συνδρομή αποθηκευτικού μέσου [33]. Επιπλέον, η ανάγκη για κατάλληλη χωροθέτηση και προσανατολισμό περιορίζει ορισμένες φορές την αισθητική ή λειτουργική ευελιξία σε αστικές εφαρμογές. Σημαντικό είναι και το ζήτημα του αρχικού κόστους εγκατάστασης, το οποίο, αν και έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια, παραμένει παράγοντας που επηρεάζει τις επενδυτικές αποφάσεις σε μεγάλης κλίμακας έργα.

Ακόμη, πρέπει να συνεκτιμηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων, συμπεριλαμβανομένης της εξόρυξης πρώτων υλών και της διαδικασίας ανακύκλωσης στο τέλος ζωής τους. Παρότι οι εκπομπές κατά τη φάση λειτουργίας

είναι μηδενικές, η συνολική αξιολόγηση απαιτεί ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment), ιδίως όταν τα συστήματα εγκαθίστανται μαζικά σε αστικά περιβάλλοντα.

3.2 Αιολική Ενέργεια

Η αιολική ενέργεια προκύπτει από τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω ανεμογεννητριών, οι οποίες αποτελούνται από δρομέα με πτερύγια, άξονα μετάδοσης, γεννήτρια και σύστημα ελέγχου. Η ροή του αέρα προκαλεί περιστροφή των πτερυγίων λόγω της διαφοράς πίεσης που δημιουργείται στις δύο επιφάνειές τους. Η μηχανική κίνηση μεταφέρεται στη γεννήτρια, όπου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα [34]. Η ισχύς που μπορεί να αποδοθεί εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, τη διάμετρο του δρομέα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος.



Εικόνα 5: Δομή και βασικά μέρη ανεμογεννήτριας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

(Πηγή: https://www.alamy.com/stock-photo/wind-turbine-generator-diagram.html?pseudoid=9BA33C251DD94AA29C35D07BEC589DCC&sortBy=relevant)

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται κυρίως σε μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις, όπως τα αιολικά πάρκα, όπου επιδιώκεται υψηλή απόδοση σε σταθερές συνθήκες ροής. Οι δεύτερες εμφανίζουν απλούστερη κατασκευή και καλύτερη συμπεριφορά σε μεταβαλλόμενες κατευθύνσεις ανέμου, γεγονός που τις καθιστά καταλληλότερες για περιοχές με έντονη αστική μορφολογία. Σε περιβάλλοντα με κτίρια

και στενούς δρόμους, η ροή του αέρα μεταβάλλεται διαρκώς, δημιουργώντας στροβιλισμούς που επηρεάζουν την απόδοση. Για τον λόγο αυτό, η επιλογή τύπου ανεμογεννήτριας βασίζεται σε τοπική ανάλυση αιολικού δυναμικού.

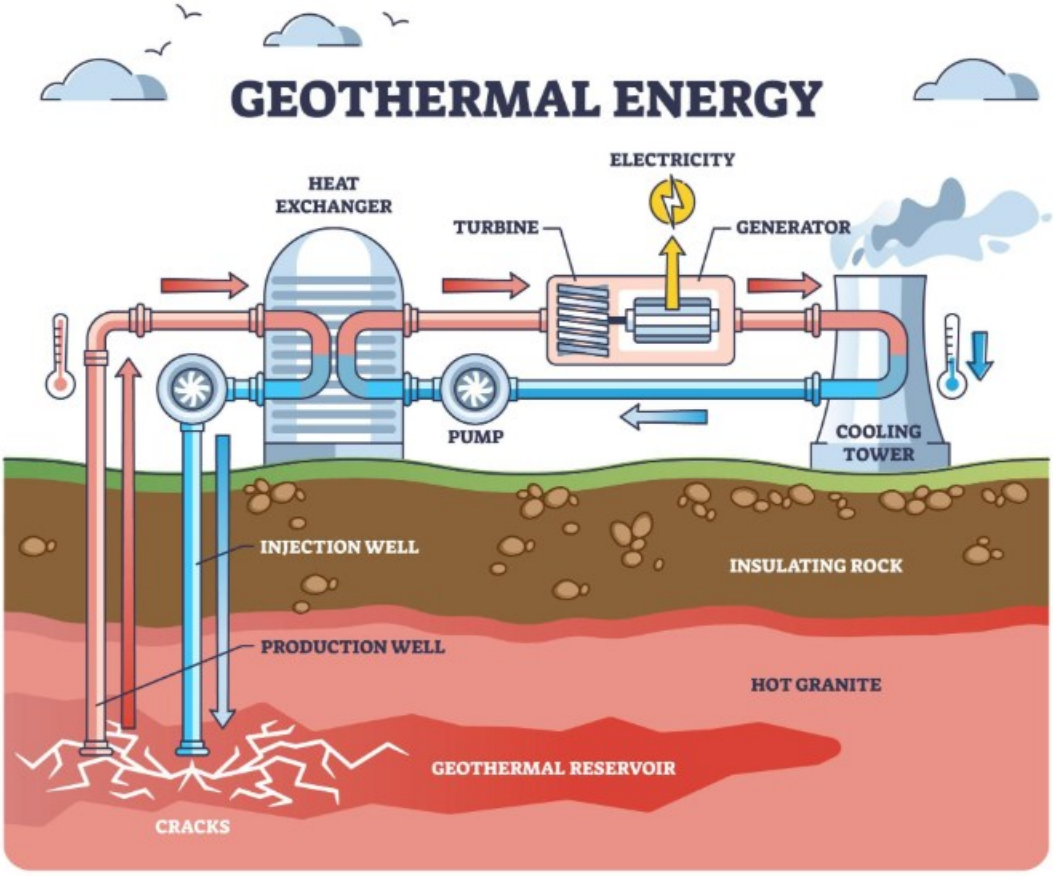
Σε εφαρμογές μικρής ισχύος, η παραγόμενη ενέργεια κατευθύνεται σε συστήματα αποθήκευσης, όπως υπερπυκνωτές ή μικρές επαναφορτιζόμενες μονάδες, ώστε να εξασφαλίζεται σταθερή παροχή σε περιόδους χαμηλής ταχύτητας ανέμου. Η ηλεκτρονική διαχείριση ισχύος είναι απαραίτητη για τη ρύθμιση της τάσης και την αποφυγή απωλειών, ιδιαίτερα όταν η τροφοδοσία αφορά συσκευές χαμηλής κατανάλωσης.

Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται τόσο σε περιφερειακές εγκαταστάσεις μεγάλης ισχύος όσο και σε αποκεντρωμένες λύσεις εντός του αστικού ιστού. Στις παρυφές πόλεων, τα αιολικά πάρκα παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο, ενισχύοντας τη διαφοροποίηση των πηγών τροφοδοσίας. Η παραγωγή δεν συνοδεύεται από καύση καυσίμων, γεγονός που μειώνει τις άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τη λειτουργία. Σε μικρότερη κλίμακα, ανεμογεννήτριες μπορούν να ενσωματωθούν σε κτιριακές εγκαταστάσεις ή σε δημοτικές υποδομές, όπως ιστοί φωτισμού και σταθμοί μέτρησης [35]. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται επαρκεί για τη λειτουργία αισθητήρων, συστημάτων παρακολούθησης κυκλοφορίας ή αυτόνομου φωτισμού. Η χρήση τέτοιων λύσεων περιορίζει την ανάγκη εκτεταμένης καλωδίωσης και διευκολύνει την εγκατάσταση εξοπλισμού σε σημεία όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι δύσκολη ή δαπανηρή.

Παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν περιορισμοί που σχετίζονται με τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου, τον θόρυβο και την οπτική ένταξη στο δομημένο περιβάλλον. Σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, οι αποστάσεις ασφαλείας και οι κανονιστικές ρυθμίσεις επηρεάζουν τη χωροθέτηση. Επιπλέον, η μεταβλητότητα της παραγωγής καθιστά αναγκαία τη συνδυαστική χρήση με άλλες μορφές συλλογής ενέργειας ή με μέσα αποθήκευσης, ώστε να διατηρείται σταθερή λειτουργία συσκευών χαμηλής ισχύος. Η αιολική τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά με φωτοβολταϊκά στοιχεία, ιδίως σε περιοχές όπου οι συνθήκες φωτισμού και ανέμου διαφοροποιούνται χρονικά. Ο συνδυασμός πηγών μειώνει τα διαστήματα μηδενικής παραγωγής και αυξάνει την πιθανότητα ενεργειακής αυτονομίας μικρών αστικών συστημάτων.

3.3 Γεωθερμική Ενέργεια

Η γεωθερμική ενέργεια προέρχεται από τη θερμότητα που αποθηκεύεται στο εσωτερικό της Γης και μεταφέρεται προς την επιφάνεια μέσω αγωγής και συναγωγής. Η θερμότητα αυτή οφείλεται τόσο στη γεωλογική σύσταση του πλανήτη όσο και στη ραδιενεργό διάσπαση στοιχείων στον φλοιό και στον μανδύα. Ανάλογα με το βάθος και τη θερμοκρασία του γεωθερμικού πεδίου, διακρίνονται εφαρμογές υψηλής, μέσης και χαμηλής ενθαλπίας [36]. Σε αστικά περιβάλλοντα αξιοποιείται κυρίως η χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμία, όπου η θερμοκρασία του υπεδάφους παραμένει σχετικά σταθερή καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση και ψύξη κτιρίων μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.



Εικόνα 6: Διάγραμμα λειτουργίας γεωθερμικού συστήματος αξιοποίησης θερμικής ενέργειας από το υπέδαφος (Πηγή: https://lawlovepqr.click/product_tag/54124286_.html)

Τα συστήματα αυτά λειτουργούν με την εγκατάσταση κατακόρυφων ή οριζόντιων γεωεναλλακτών στο έδαφος, μέσα από τους οποίους κυκλοφορεί ρευστό μεταφοράς θερμότητας. Τον χειμώνα, το ρευστό απορροφά θερμότητα από το υπέδαφος και τη μεταφέρει στο κτίριο, ενώ το καλοκαίρι η διαδικασία αντιστρέφεται, επιτρέποντας την απόρριψη θερμότητας στο έδαφος. Η θερμοδυναμική διεργασία βασίζεται σε κύκλο συμπίεσης–εκτόνωσης ψυκτικού μέσου, παρόμοιο με εκείνον των συμβατικών αντλιών θερμότητας, με τη διαφορά ότι η θερμική πηγή ή δεξαμενή δεν είναι ο εξωτερικός αέρας αλλά το υπέδαφος. Η σχετικά σταθερή θερμοκρασία του εδάφους βελτιώνει τον βαθμό απόδοσης του συστήματος σε σύγκριση με λύσεις αερόψυκτων μονάδων, ιδίως σε περιοχές με έντονες εποχικές μεταβολές.

Σε επίπεδο πόλης, η γεωθερμία μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε μεμονωμένα κτίρια είτε σε δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης [37]. Σε ορισμένες περιπτώσεις, εγκαθίστανται γεωθερμικά πεδία που εξυπηρετούν πολλαπλά κτίρια, επιτρέποντας καλύτερη διαχείριση φορτίων και εξισορρόπηση θερμικών αναγκών μεταξύ διαφορετικών χρήσεων (κατοικίες, γραφεία, εμπορικοί χώροι). Η αξιοποίηση γεωθερμικών πόρων μέσης ή υψηλής ενθαλπίας είναι λιγότερο συχνή εντός αστικών περιοχών, καθώς απαιτεί ειδικές γεωλογικές συνθήκες και μεγαλύτερο βάθος γεωτρήσεων, ωστόσο σε ορισμένες χώρες χρησιμοποιείται και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η γεωθερμική τεχνολογία εντάσσεται στις επιλογές παροχής ενέργειας με χαμηλές άμεσες εκπομπές, καθώς δεν περιλαμβάνει καύση καυσίμων κατά τη φάση λειτουργίας. Η κατανάλωση

ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζεται κυρίως στη λειτουργία της αντλίας θερμότητας και των κυκλοφορητών, γεγονός που επιτρέπει σημαντική εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με συμβατικά συστήματα θέρμανσης πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

Η επιτυχής εφαρμογή γεωθερμικών συστημάτων σε αστικό περιβάλλον προϋποθέτει λεπτομερή γεωτεχνική και υδρογεωλογική διερεύνηση πριν από την εγκατάσταση. Η ανάλυση της θερμικής αγωγιμότητας του εδάφους, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της διαθεσιμότητας χώρου καθορίζει τον τύπο και το βάθος των γεωτρήσεων [37]. Σε πυκνοδομημένες περιοχές, η περιορισμένη επιφάνεια οικοπέδων συχνά οδηγεί σε επιλογή κατακόρυφων γεωεναλλακτών, οι οποίοι απαιτούν μικρότερη οριζόντια έκταση αλλά μεγαλύτερο βάθος. Ο σωστός σχεδιασμός αποτρέπει τη σταδιακή ψύξη ή υπερθέρμανση του υπεδάφους, φαινόμενο που μπορεί να εμφανιστεί όταν η θερμική ισορροπία δεν διατηρείται σε ετήσια βάση.

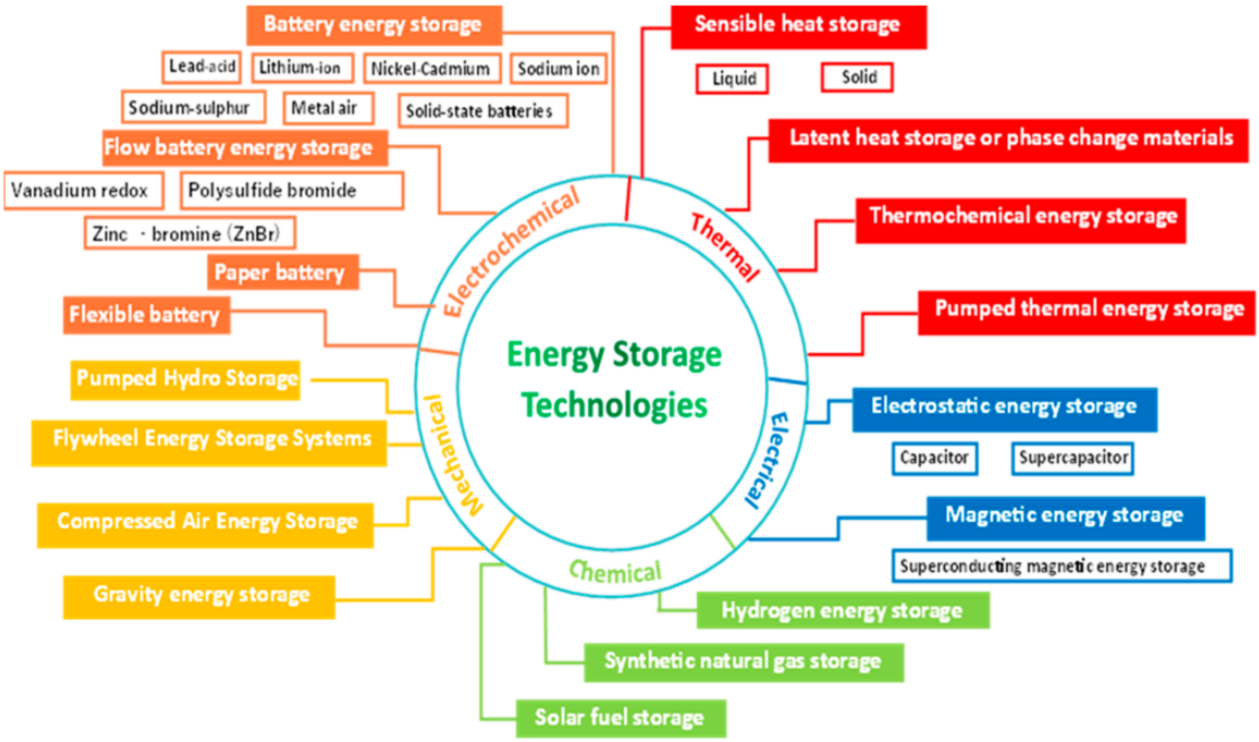
Μία πρακτική που εφαρμόζεται σε σύγχρονες αστικές αναπτύξεις είναι ο συνδυασμός γεωθερμίας με άλλα ενεργειακά συστήματα, όπως φωτοβολταϊκά ή ηλιακά θερμικά, ώστε να καλύπτεται μέρος της ηλεκτρικής κατανάλωσης των αντλιών θερμότητας. Η ολοκληρωμένη ενεργειακή διαχείριση κτιρίων επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των φορτίων και την προσαρμογή της λειτουργίας στις πραγματικές ανάγκες χρήσης. Επιπλέον, η δημιουργία κοινών γεωθερμικών πεδίων για ομάδες κτιρίων διευκολύνει την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του υπεδάφους και μειώνει το συνολικό κόστος ανά μονάδα επιφάνειας.

Ωστόσο, υπάρχουν περιορισμοί που σχετίζονται με το αρχικό κόστος εγκατάστασης, το οποίο είναι υψηλότερο σε σύγκριση με συμβατικά συστήματα θέρμανσης. Οι γεωτρήσεις και ο εξοπλισμός απαιτούν σημαντική επένδυση, η οποία αποσβένεται σε βάθος χρόνου μέσω της μείωσης λειτουργικών δαπανών. Επιπλέον, η εφαρμογή σε ιστορικά κέντρα ή περιοχές με υπόγειες υποδομές μπορεί να αντιμετωπίσει τεχνικές δυσκολίες λόγω περιορισμένου χώρου και κανονιστικών απαιτήσεων.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η ανεπαρκής μελέτη των γεωλογικών συνθηκών έχει οδηγήσει σε μειωμένη απόδοση ή σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ γειτονικών συστημάτων, όταν εγκαθίστανται πολλαπλές γεωτρήσεις σε μικρή απόσταση [38]. Η ανάγκη συντονισμού μεταξύ ιδιοκτητών και δημοτικών αρχών καθίσταται σημαντική όταν η χρήση του υπεδάφους αποκτά συλλογικό χαρακτήρα. Η μακροχρόνια βιωσιμότητα εξαρτάται από την ορθολογική διαχείριση του θερμικού φορτίου και από την τακτική παρακολούθηση της απόδοσης, ώστε να διατηρείται η ισορροπία μεταξύ άντλησης και επαναφόρτισης θερμότητας στο έδαφος. Η γεωθερμική ενέργεια, όταν σχεδιάζεται με τεχνική ακρίβεια και λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες του αστικού υπεδάφους, μπορεί να προσφέρει σταθερή και προβλέψιμη παροχή θερμικής ενέργειας, μειώνοντας τη χρήση ορυκτών καυσίμων και περιορίζοντας τις διακυμάνσεις κόστους που σχετίζονται με τις αγορές ενέργειας.

3.4 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Η αποθήκευση ενέργειας επιτρέπει τη χρονική μετατόπιση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, στοιχείο απαραίτητο όταν η ηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από πηγές με μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα, όπως η ηλιακή και η αιολική. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διακρίνονται σε ηλεκτροχημικές, μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές, καθεμία με διαφορετικά χαρακτηριστικά ισχύος, χωρητικότητας και χρόνου απόκρισης.



Εικόνα 7: Κατηγορίες τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας

(Πηγή: https://encyclopedia.pub/entry/54045)

Οι ηλεκτροχημικές λύσεις περιλαμβάνουν διάφορους τύπους μπαταριών, με πιο διαδεδομένες τις μπαταρίες ιόντων λιθίου λόγω υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, σχετικά χαμηλού βάρους και καλού κύκλου ζωής. Χρησιμοποιούνται τόσο σε φορητές συσκευές όσο και σε σταθμούς αποθήκευσης δικτύου. Άλλες τεχνολογίες, όπως οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος, διατηρούν χαμηλότερο κόστος αλλά μικρότερη διάρκεια ζωής και ενεργειακή απόδοση [39]. Οι μπαταρίες ροής (flow batteries) βασίζονται σε υγρά ηλεκτρολύτες που αποθηκεύονται σε εξωτερικές δεξαμενές και προσφέρουν δυνατότητα ανεξάρτητης κλιμάκωσης ισχύος και χωρητικότητας, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για σταθερές εγκαταστάσεις μεγάλης διάρκειας εκφόρτισης.

Στις μηχανικές μεθόδους περιλαμβάνεται η αντλησιοταμίευση, όπου η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την άντληση νερού σε ανώτερο υψομετρικά ταμιευτήρα· όταν απαιτείται ενέργεια, το νερό κατέρχεται και κινεί υδροστροβίλους παράγοντας ηλεκτρισμό. Η τεχνολογία αυτή εμφανίζει υψηλή απόδοση και μεγάλη διάρκεια ζωής, όμως προϋποθέτει κατάλληλη γεωμορφολογία και σημαντική χωρική διαθεσιμότητα [40]. Μια εναλλακτική προσέγγιση αποτελεί η αποθήκευση μέσω συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage – CAES), όπου η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για τη συμπίεση αέρα σε υπόγειες κοιλότητες και η απελευθέρωσή του οδηγεί σε παραγωγή ισχύος μέσω στροβίλων.

Η θερμική αποθήκευση βασίζεται στη συσσώρευση θερμότητας ή ψύξης σε υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα, όπως το νερό ή τα άλατα φάσης αλλαγής. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα τηλεθέρμανσης, σε κτίρια με αντλίες θερμότητας ή σε ηλιοθερμικές εγκαταστάσεις. Επιτρέπει την εξομάλυνση φορτίων θέρμανσης και ψύξης, μειώνοντας την ανάγκη για άμεση ηλεκτρική κατανάλωση σε ώρες αιχμής.

Σε μικρής κλίμακας εφαρμογές και συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, επιλέγονται συχνά υπερπυκνωτές (supercapacitors), οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια ηλεκτροστατικά και παρέχουν γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση με μεγάλο αριθμό κύκλων ζωής. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι μικρότερη από εκείνη των μπαταριών, όμως παρουσιάζουν υψηλή αξιοπιστία σε συστήματα με συχνές διακυμάνσεις ισχύος, όπως οι συσκευές μηδενικής ενέργειας που βασίζονται σε διαλείπουσα συλλογή από το περιβάλλον.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές χαρακτηρίζεται από χρονική μεταβλητότητα, καθώς εξαρτάται από φυσικά φαινόμενα όπως η ηλιοφάνεια και η ένταση του ανέμου. Χωρίς αποθήκευση, η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να καταναλωθεί τη στιγμή που παράγεται, γεγονός που δυσχεραίνει τη σταθερή λειτουργία ενός εκτεταμένου αστικού δικτύου [41]. Τα συστήματα αποθήκευσης επιτρέπουν την απορρόφηση πλεονάζουσας παραγωγής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και την απόδοσή της σε ώρες αιχμής, εξισορροπώντας τις διακυμάνσεις.

Σε επίπεδο πόλης, η αποθήκευση μειώνει την ανάγκη για εφεδρικές μονάδες συμβατικών καυσίμων και περιορίζει τις απότομες μεταβολές συχνότητας και τάσης στο δίκτυο. Η δυνατότητα γρήγορης απόκρισης ορισμένων τεχνολογιών, όπως οι μπαταρίες ιόντων λιθίου και οι υπερπυκνωτές, υποστηρίζει τη ρύθμιση φορτίου και τη σταθεροποίηση του συστήματος σε περιπτώσεις απότομων μεταβολών παραγωγής. Επιπλέον, διευκολύνεται η ενσωμάτωση αποκεντρωμένων μονάδων παραγωγής, όπως φωτοβολταϊκά σε κτίρια ή μικρές ανεμογεννήτριες, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα υπερφόρτωσης.

Η αποθήκευση αποκτά ιδιαίτερη σημασία και για τις υποδομές κρίσιμων υπηρεσιών, όπως φωτισμός, τηλεπικοινωνίες, συστήματα ελέγχου κυκλοφορίας και εγκαταστάσεις υγείας [40]. Σε περιπτώσεις διακοπής παροχής από το κεντρικό δίκτυο, οι αποθηκευμένες ποσότητες ενέργειας μπορούν να διατηρήσουν βασικές λειτουργίες για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Για συσκευές μηδενικής ενέργειας, ακόμη και μικρής χωρητικότητας μονάδες αποθήκευσης επαρκούν ώστε να γεφυρώνουν χρονικά διαστήματα κατά τα οποία η συλλογή ενέργειας είναι μηδενική ή ανεπαρκής.

Η ευρεία εφαρμογή τεχνολογιών αποθήκευσης επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μίγμα της πόλης, ενισχύοντας τη σταθερότητα και την προβλεψιμότητα της τροφοδοσίας. Η επιλογή κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από το μέγεθος της εγκατάστασης, τη διάρκεια εκφόρτισης που απαιτείται και τα οικονομικά δεδομένα της επένδυσης [39]. Η τεχνική αξιολόγηση περιλαμβάνει παραμέτρους όπως απόδοση κύκλου φόρτισης–εκφόρτισης, διάρκεια ζωής, ενεργειακή πυκνότητα και περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τον κύκλο ζωής του εξοπλισμού.

3.5 Συγκριτική Ανάλυση Τεχνολογιών

Η αξιολόγηση των τεχνολογιών που εξετάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες απαιτεί σύγκριση με βάση τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, ώστε να αποτυπωθούν με σαφήνεια οι δυνατότητες και οι περιορισμοί κάθε λύσης. Οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα, το αρχικό και λειτουργικό κόστος, η κλιμακωσιμότητα, η αξιοπιστία σε αστικό περιβάλλον και το εύρος εφαρμογών. Επειδή οι τεχνολογίες διαφέρουν ως προς τη φύση τους

(παραγωγή έναντι αποθήκευσης), η σύγκριση δεν στοχεύει στην ανάδειξη «καλύτερης» λύσης, αλλά στην κατανόηση των συνθηκών υπό τις οποίες κάθε επιλογή είναι καταλληλότερη [39], [40].

Οι τεχνολογίες παραγωγής που αναλύθηκαν περιλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά, τα αιολικά συστήματα και τη γεωθερμική ενέργεια. Παρουσιάζουν διαφορετικά προφίλ απόδοσης και απαιτήσεων εγκατάστασης, γεγονός που επηρεάζει τη χρήση τους στον αστικό ιστό.

Τεχνολογία	Ενεργειακή Απόδοση	Σταθερότητα Παραγωγής	Αρχικό Κόστος	Χωρικές Απαιτήσεις	Ενδεικτικές Αστικές Εφαρμογές
Φωτοβολταϊκά	15–23% (ανάλογα με το υλικό)	Μεταβαλλόμενη (ημέρα/νύχτα, καιρός)	Μέτριο	Στέγες, προσόψεις	Αισθητήρες, φωτισμός, κτίρια
Αιολική ενέργεια	Υψηλή σε κατάλληλες ταχύτητες ανέμου	Μεταβαλλόμενη (ένταση ανέμου)	Μέτριο–Υψηλό	Ανοικτοί χώροι ή στέγες	Μικρο-υποδομές, τοπική παραγωγή
Γεωθερμική ενέργεια	Υψηλός βαθμός απόδοσης (COP 3–5 για αντλίες θερμότητας)	Σταθερή	Υψηλό (γεωτρήσεις)	Υπόγειος χώρος	Θέρμανση/ψύξη κτιρίων, δίκτυα

Πίνακας 1: Σύγκριση μορφών ενέργειας

Τα φωτοβολταϊκά εμφανίζουν ευκολία εγκατάστασης και προσαρμοστικότητα σε υφιστάμενα κτίρια, με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης. Η παραγωγή τους εξαρτάται από την ηλιοφάνεια, γεγονός που περιορίζει τη διαθεσιμότητα κατά τις νυχτερινές ώρες. Τα αιολικά συστήματα μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά σε περιοχές με επαρκές αιολικό δυναμικό, όμως η απόδοσή τους επηρεάζεται από τη μορφολογία της πόλης και τις αναταράξεις του αέρα. Η γεωθερμική ενέργεια παρέχει σταθερή θερμική απόδοση ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, απαιτεί όμως υψηλότερη αρχική επένδυση και τεχνική μελέτη υπεδάφους [39], [40].

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διαφοροποιούνται ως προς τη χωρητικότητα, τη διάρκεια εκφόρτισης και τον κύκλο ζωής. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου παρουσιάζουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και καλή απόδοση, γεγονός που τις καθιστά διαδεδομένες σε σταθμούς αποθήκευσης και σε μικρότερες εγκαταστάσεις. Οι υπερπυκνωτές, αν και αποθηκεύουν μικρότερη ποσότητα ενέργειας, αντέχουν μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης–εκφόρτισης και ανταποκρίνονται άμεσα σε μεταβολές ισχύος, χαρακτηριστικό χρήσιμο σε συσκευές που βασίζονται σε διαλείπουσα παραγωγή από το περιβάλλον. Η αντλησιοταμίευση και οι μπαταρίες ροής αφορούν κυρίως εφαρμογές μεγάλης κλίμακας και δεν ενδείκνυνται για μεμονωμένες αστικές μικρο-υποδομές.

Τεχνολογία Αποθήκευσης	Ενεργειακή Πυκνότητα	Απόδοση Κύκλου	Διάρκεια Ζωής	Κατάλληλη Κλίμακα	Χρήση σε Συσκευές Μηδενικής Ενέργειας
Μπαταρίες ιόντων λιθίου	Υψηλή	85–95%	3.000–6.000 κύκλοι	Από μικρή έως μεγάλη	Ναι
Μπαταρίες μολύβδου-οξέος	Χαμηλότερη	70–85%	500–1.500 κύκλοι	Μικρή–μεσαία	Περιορισμένα
Μπαταρίες ροής	Μέτρια	65–85%	Μεγάλη	Μεγάλη (σταθερές εγκαταστάσεις)	Όχι συνήθως
Αντλησιοταμίευση	Πολύ μεγάλη	70–85%	Πολύ μεγάλη	Μεγάλη (δικτύου)	Όχι
Υπερπυκνωτές	Χαμηλή	>95%	>100.000 κύκλοι	Πολύ μικρή	Ιδιαίτερα κατάλληλοι

Πίνακας 2: Σύγκριση Τεχνολογιών Αποθήκευσης

Καμία τεχνολογία δεν καλύπτει από μόνη της το σύνολο των ενεργειακών απαιτήσεων μιας σύγχρονης πόλης. Οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις προσφέρουν ευελιξία και ευρεία εφαρμογή σε κτιριακό επίπεδο, η αιολική ενέργεια αξιοποιείται αποδοτικά όπου το επιτρέπουν οι τοπικές συνθήκες, ενώ η γεωθερμία παρέχει σταθερή θερμική κάλυψη. Η αποθήκευση λειτουργεί ως μηχανισμός εξισορρόπησης, επιτρέποντας μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα.

Για συσκευές μηδενικής ενέργειας μικρής ισχύος, οι καταλληλότεροι συνδυασμοί περιλαμβάνουν φωτοβολταϊκά στοιχεία μικρής επιφάνειας και υπερπυκνωτές ή μικρές μπαταρίες, ενώ για κτιριακές και δημοτικές υποδομές προκρίνεται υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει πολλαπλές πηγές παραγωγής με κατάλληλη αποθήκευση. Η τελική επιλογή καθορίζεται από τεχνικές προδιαγραφές, οικονομικά δεδομένα και χωρικούς περιορισμούς, τα οποία διαφέρουν σημαντικά από πόλη σε πόλη.

3.6 Τεχνολογίες Συλλογής και Ανάκτησης Ενέργειας

Οι τεχνολογίες συλλογής και ανάκτησης ενέργειας αναφέρονται σε μεθόδους μετατροπής μικρής κλίμακας ενεργειακών ροών από το περιβάλλον σε ηλεκτρική ισχύ ικανή να τροφοδοτήσει συστήματα χαμηλής κατανάλωσης. Σε αντίθεση με τα συμβατικά συστήματα παραγωγής, τα οποία βασίζονται σε συγκεντρωμένες και υψηλής έντασης πηγές ενέργειας, το energy harvesting αξιοποιεί διάχυτες μορφές ενέργειας, όπως η μηχανική δόνηση, οι θερμικές διαφορές, η ηλιακή ακτινοβολία χαμηλής έντασης και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ραδιοσυχνοτήτων [25]. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται άμεσα με τις συσκευές μηδενικής ενέργειας, καθώς επιτρέπει τη λειτουργία αισθητήρων και κόμβων επικοινωνίας χωρίς σταθερή εξωτερική τροφοδοσία ή συχνή αντικατάσταση μπαταριών.

Μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους είναι η πιεζοηλεκτρική συλλογή ενέργειας, η οποία βασίζεται στην ιδιότητα ορισμένων υλικών να παράγουν ηλεκτρικό φορτίο όταν υφίστανται μηχανική παραμόρφωση. Σε αστικά περιβάλλοντα, οι δονήσεις από την κυκλοφορία οχημάτων, τη διέλευση πεζών ή τη λειτουργία μηχανημάτων μπορούν να αποτελέσουν πηγή μικρής αλλά επαναλαμβανόμενης ενεργειακής εισόδου. Η παραγόμενη ισχύς είναι συνήθως της τάξης των μW έως mW, επαρκής όμως για αισθητήρες περιοδικής λειτουργίας [26]. Η τεχνική πρόκληση εντοπίζεται στην προσαρμογή της συχνότητας συντονισμού της συσκευής στις πραγματικές συνθήκες δόνησης, ώστε να μεγιστοποιείται η απόδοση μετατροπής.

Άλλη σημαντική κατηγορία αποτελεί η θερμοηλεκτρική συλλογή ενέργειας, η οποία αξιοποιεί το φαινόμενο Seebeck, δηλαδή τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ δύο επιφανειών. Σε πυκνοδομημένες περιοχές, οι θερμικές διακυμάνσεις μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών χώρων, αγωγών θέρμανσης ή επιφανειών εκτεθειμένων στον ήλιο μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω θερμοηλεκτρικών γεννητριών [27]. Η απόδοση εξαρτάται από το θερμοκρασιακό εύρος και τις ιδιότητες των υλικών, ενώ απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός για τη διατήρηση της θερμικής κλίσης σε βάθος χρόνου.

Η συλλογή ενέργειας από ραδιοσυχνότητες βασίζεται στην αξιοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από υφιστάμενες ασύρματες υποδομές, όπως δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, Wi-Fi ή τηλεοπτικοί πομποί. Μέσω ειδικών κυκλωμάτων ανόρθωσης και προσαρμογής εμπέδησης, η προσπίπτουσα ακτινοβολία μετατρέπεται σε συνεχές ρεύμα χαμηλής ισχύος. Αν και τα διαθέσιμα επίπεδα ενέργειας είναι περιορισμένα και εξαρτώνται από την απόσταση από την πηγή εκπομπής, η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει ενδιαφέρον για εφαρμογές εξαιρετικά χαμηλής κατανάλωσης, όπως παθητικοί αισθητήρες ή συστήματα μετάδοσης μικρών πακέτων δεδομένων.

Εκτός από τις παραπάνω τεχνικές, ιδιαίτερη θέση κατέχουν τα υβριδικά συστήματα συλλογής ενέργειας, τα οποία συνδυάζουν περισσότερες από μία πηγές, όπως φωτοβολταϊκή και πιεζοηλεκτρική ή θερμοηλεκτρική και ραδιοσυχνότητας [28]. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει τη μείωση της εξάρτησης από μία μόνο μεταβλητή περιβαλλοντική συνθήκη και αυξάνει τη διαθεσιμότητα ισχύος. Σε αστικό περιβάλλον με έντονες διακυμάνσεις φωτισμού, θερμοκρασίας και δραστηριότητας, η πολυπηγική προσέγγιση μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη λειτουργική σταθερότητα.

Η αξιοποίηση των τεχνολογιών energy harvesting προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλης ηλεκτρονικής διαχείρισης ισχύος. Δεδομένου ότι οι παραγόμενες τάσεις και ρεύματα είναι χαμηλά και συχνά διαλείποντα, απαιτούνται κυκλώματα ανόρθωσης, μετατροπείς DC-DC υψηλής απόδοσης και συστήματα αποθήκευσης μικρής κλίμακας, όπως υπερπυκνωτές ή μικρομπαταρίες [29]. Παράλληλα, η ίδια η συσκευή πρέπει να έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης, μέσω λειτουργιών περιοδικής ενεργοποίησης, χαμηλής ισχύος επικοινωνίας και βελτιστοποιημένων πρωτοκόλλων μετάδοσης δεδομένων.

Σε επίπεδο αστικών εφαρμογών, η συλλογή ενέργειας επιτρέπει την εγκατάσταση εκτεταμένων δικτύων αισθητήρων χωρίς την ανάγκη καλωδίωσης ή συχνής συντήρησης. Αυτό διευκολύνει την παρακολούθηση παραμέτρων όπως ποιότητα αέρα, δομική ακεραιότητα γεφυρών, στάθμη θορύβου ή μικροκλιματικές μεταβολές. Παρά τα πλεονεκτήματα, η τεχνολογία συνοδεύεται από περιορισμούς που σχετίζονται με τη χαμηλή πυκνότητα ισχύος και την εξάρτηση από στοχαστικές περιβαλλοντικές συνθήκες [30]. Για τον λόγο αυτό, η ενσωμάτωσή της σε συστήματα μηδενικής

ενέργειας απαιτεί προσεκτικό ενεργειακό προϋπολογισμό και ανάλυση του προφίλ κατανάλωσης της εφαρμογής.

Η συλλογή ενέργειας δεν αντικαθιστά πλήρως τις παραδοσιακές μορφές τροφοδοσίας, αλλά λειτουργεί ως μηχανισμός ενεργειακής συμπλήρωσης ή αυτονομίας σε εφαρμογές μικρής ισχύος. Η αποτελεσματικότητά της εξαρτάται από τον συνδυασμό αποδοτικής μετατροπής, χαμηλής κατανάλωσης φορτίου και κατάλληλης αποθήκευσης. Στο πλαίσιο των συσκευών μηδενικής ενέργειας, αποτελεί βασική τεχνολογική συνιστώσα που επιτρέπει την υλοποίηση αποκεντρωμένων και μακροχρόνια λειτουργικών υποδομών εντός του αστικού ιστού.

3.7 Μικροδίκτυα και Ενεργειακή Αυτονομία

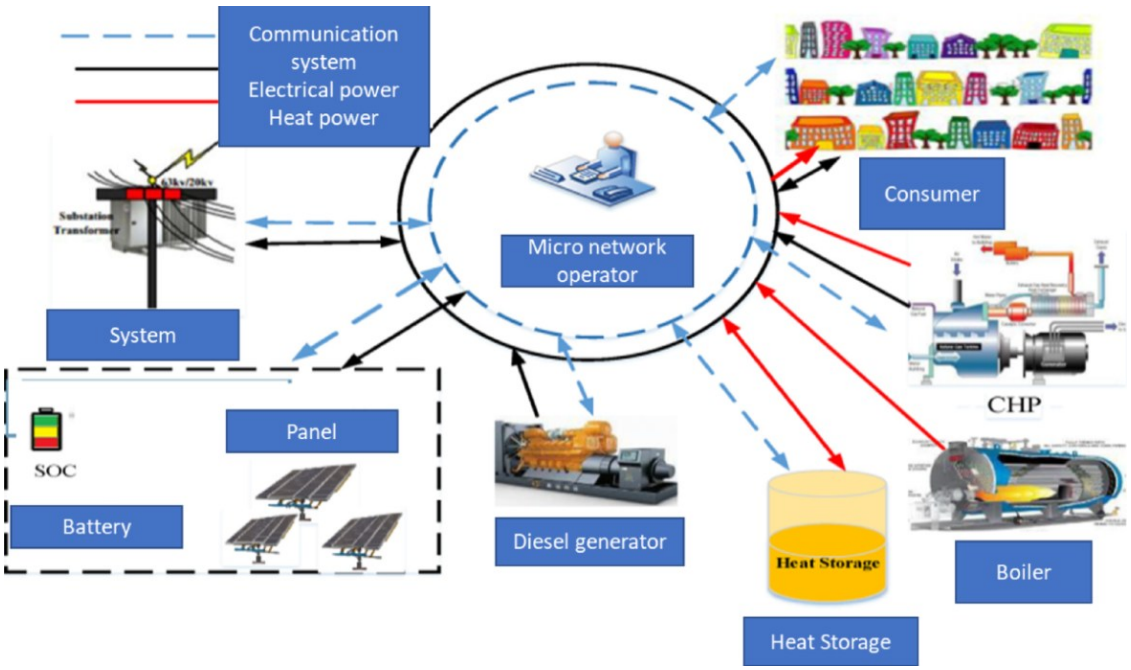
Τα μικροδίκτυα (Microgrids – Τοπικά Ευφυή Ηλεκτρικά Δίκτυα) αποτελούν μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στη σύγχρονη ενεργειακή μετάβαση, καθώς συνδυάζουν αποκεντρωμένη παραγωγή, τοπική κατανάλωση, αποθήκευση ενέργειας και ψηφιακό έλεγχο σε ένα ενιαίο λειτουργικό σύστημα. Στη διεθνή βιβλιογραφία, το μικροδίκτυο ορίζεται συνήθως ως ένα σύνολο αλληλοσυνδεδεμένων φορτίων και κατανεμημένων ενεργειακών πόρων, εντός σαφώς καθορισμένων ηλεκτρικών ορίων, που λειτουργεί ως μία ενιαία ελεγχόμενη οντότητα απέναντι στο κεντρικό δίκτυο και μπορεί να λειτουργεί είτε συνδεδεμένο με αυτό είτε αυτόνομα σε κατάσταση νησιδοποίησης (island mode – νησιδοποιημένη λειτουργία) [60]. Η σημασία αυτής της δυνατότητας είναι ιδιαίτερα μεγάλη για την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, επειδή επιτρέπει σε τοπικές κοινότητες, κτίρια ή κρίσιμες αστικές υποδομές να συνεχίζουν να λειτουργούν ακόμη και όταν το κεντρικό δίκτυο παρουσιάζει βλάβες ή αστάθεια.

Σε τεχνικό επίπεδο, ένα μικροδίκτυο περιλαμβάνει συνήθως μονάδες κατανεμημένης παραγωγής, όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, μικρές ανεμογεννήτριες, κυψέλες καυσίμου ή και συμβατικές εφεδρικές μονάδες, καθώς και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, φορτία διαφορετικής προτεραιότητας, μετατροπείς ισχύος και ένα κεντρικό ή αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου. Η βασική ιδέα είναι ότι η παραγωγή και η κατανάλωση δεν αντιμετωπίζονται πλέον αποκλειστικά μέσα από ένα μονοκατευθυντικό, κεντρικά οργανωμένο ενεργειακό μοντέλο, αλλά μέσα από ένα ευέλικτο και τοπικά διαχειρίσιμο σύστημα. Αυτή η αρχιτεκτονική προσφέρει καλύτερη προσαρμογή στις τοπικές ενεργειακές ανάγκες, περιορίζει τις απώλειες μεταφοράς και διευκολύνει την ενσωμάτωση κατανεμημένων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παράλληλα, η χρήση προηγμένων λογισμικών παρακολούθησης και ελέγχου επιτρέπει τη συνεχή εξισορρόπηση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης σε πραγματικό χρόνο. Η σχέση των μικροδικτύων με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ιδιαίτερα στενή, καθώς τα μικροδίκτυα αποτελούν ένα από τα πλέον κατάλληλα πλαίσια για την αξιοποίηση πηγών όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Οι Α.Π.Ε. χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα, λόγω της εξάρτησής τους από φυσικά φαινόμενα όπως η ηλιοφάνεια και η ένταση του ανέμου [60]. Μέσα σε ένα συμβατικό δίκτυο μεγάλης κλίμακας, η μεταβλητότητα αυτή μπορεί να δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις εξισορρόπησης, εφεδρειών και ρύθμισης συχνότητας ή τάσης. Αντίθετα, σε ένα μικροδίκτυο, η τοπική αποθήκευση, η διαχείριση φορτίου και οι αλγόριθμοι ενεργειακής διαχείρισης επιτρέπουν την αποτελεσματικότερη απορρόφηση αυτών των διακυμάνσεων. Έτσι, τα μικροδίκτυα λειτουργούν ως "γέφυρα" ανάμεσα στην αποκεντρωμένη παραγωγή από Α.Π.Ε. και στην ανάγκη για αξιόπιστη και συνεχόμενη παροχή ενέργειας.

Η συμβολή της αποθήκευσης είναι καθοριστική για τη λειτουργία ενός μικροδικτύου με υψηλή διείσδυση Α.Π.Ε.. Οι μπαταρίες, και ιδιαίτερα οι μπαταρίες ιόντων λιθίου, χρησιμοποιούνται συχνά ώστε να αποθηκεύουν ενέργεια όταν η τοπική παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση και να την αποδίδουν όταν η παραγωγή υπολείπεται των αναγκών. Παράλληλα, τεχνολογίες όπως οι υπερπυκνωτές και τα υβριδικά συστήματα αποθήκευσης μπορούν να καλύψουν ανάγκες ταχείας απόκρισης. Στην πράξη, η αποθήκευση προσφέρει στο μικροδίκτυο όχι μόνο ενεργειακή ευελιξία αλλά και δυνατότητα υποστήριξης κρίσιμων λειτουργιών, ομαλής μετάβασης από συνδεδεμένη σε αυτόνομη λειτουργία και καλύτερης αξιοποίησης των τοπικών ανανεώσιμων πόρων [61]. Για τον λόγο αυτό, η διεθνής βιβλιογραφία αντιμετωπίζει την αποθήκευση ως έναν από τους πιο κρίσιμους πυλώνες της ενεργειακής αυτονομίας. Η ενεργειακή αυτονομία δεν σημαίνει απαραίτητα πλήρη αποσύνδεση από το κεντρικό δίκτυο. Στις περισσότερες εφαρμογές, σημαίνει ότι ένα τοπικό ενεργειακό σύστημα μπορεί να καλύπτει σημαντικό μέρος των αναγκών του με ίδιους πόρους, να βελτιστοποιεί τη χρήση της παραγόμενης ενέργειας και να περιορίζει την εξάρτησή του από εξωτερική τροφοδότηση. Ένα μικροδίκτυο μπορεί επομένως να θεωρηθεί ενεργειακά αυτόνομο σε σχετικό και όχι απόλυτο βαθμό: όσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητά του να παράγει, να αποθηκεύει και να διαχειρίζεται την ενέργειά του τοπικά, τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο αυτονομίας του. Αυτή η θεώρηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τα αστικά περιβάλλοντα, όπου η πλήρης αποσύνδεση είναι συχνά ούτε εφικτή ούτε επιθυμητή, ενώ η μερική αυτονομία και η λειτουργική ανθεκτικότητα είναι πολύ πιο ρεαλιστικοί στόχοι.

Όσο αφορά τις έξυπνες πόλεις, τα μικροδίκτυα αποκτούν ακόμη μεγαλύτερη σημασία, επειδή εντάσσονται σε ένα ευρύτερο οικοσύστημα ψηφιακών και ενεργειακών υποδομών. Οι έξυπνες πόλεις βασίζονται στην παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, στη συλλογή δεδομένων, στη διασύνδεση υποδομών και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους μέσω ψηφιακών εργαλείων. Το μικροδίκτυο ταιριάζει οργανικά σε αυτό το μοντέλο, καθώς συνδυάζει αισθητήρες, έξυπνους μετρητές, πληροφοριακά συστήματα, ενεργειακούς αλγόριθμους και αποκεντρωμένους πόρους παραγωγής. Η βιβλιογραφία για τα smart grids και τις smart cities δείχνει ότι η ενσωμάτωση μικροδικτύων μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα, να μειώσει τις εκπομπές, να διευκολύνει την ένταξη των prosumers και να προσφέρει καλύτερη διαχείριση κρίσιμων δημοτικών υποδομών, όπως φωτισμός, μεταφορές, δημόσια κτίρια και συστήματα περιβαλλοντικής παρακολούθησης [61].

Μία από τις πιο σημαντικές λειτουργίες των μικροδικτύων στις έξυπνες πόλεις είναι η αύξηση της ανθεκτικότητας (resilience – λειτουργική ανθεκτικότητα) του αστικού ενεργειακού συστήματος. Σε περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων, διακοπών ρεύματος, φυσικών καταστροφών ή κυβερνοεπιθέσεων, ένα μικροδίκτυο που διαθέτει τοπική παραγωγή, αποθήκευση και δυνατότητα νησιδοποίησης μπορεί να διατηρήσει σε λειτουργία κρίσιμα φορτία, όπως νοσοκομεία, κέντρα ελέγχου, τηλεπικοινωνιακές υποδομές, αντλιοστάσια και εγκαταστάσεις δημόσιας ασφάλειας. Η αξία αυτή έχει αναδειχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, καθώς η ενεργειακή μετάβαση δεν αξιολογείται πλέον μόνο με όρους αποδοτικότητας και εκπομπών, αλλά και με όρους ασφάλειας και ανθεκτικότητας απέναντι σε διαταραχές. Η σύγχρονη έρευνα για τις αστικές μετασχηματίσεις επισημαίνει ότι ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός μικροδικτύων μπορεί να λειτουργήσει ως βασικό εργαλείο για πιο ανθεκτικές και βιώσιμες πόλεις.



Εικόνα 8: Ενδεικτική αρχιτεκτονική μικροδικτύου που συνδυάζει κατανεμημένη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης και τοπικά φορτία, με δυνατότητα λειτουργίας είτε συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο είτε αυτόνομα

(Πηγή : https://www.nature.com/articles/s41598-025-21771-3)

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, η ανάπτυξη μικροδικτύων συνοδεύεται και από προκλήσεις. Οι σημαντικότερες αφορούν τον έλεγχο και τον συγχρονισμό πολλών ετερογενών πηγών, τη σταθερότητα τάσης και συχνότητας, τη διαχείριση της αβεβαιότητας των Α.Π.Ε., την κυβερνοασφάλεια, τη διαλειτουργικότητα μεταξύ εξοπλισμού διαφορετικών κατασκευαστών και το συχνά αυξημένο αρχικό κόστος επένδυσης. Επιπλέον, σε επίπεδο πολιτικής και αγοράς, συχνά υπάρχουν ρυθμιστικά εμπόδια σχετικά με την ιδιοκτησία, την τιμολόγηση, την πώληση πλεονάζουσας ενέργειας και τη νομική θέση των μικροδικτύων απέναντι στο κεντρικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον λόγο αυτό, η ευρεία κλιμάκωση των μικροδικτύων στις πόλεις δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική ωριμότητα, αλλά και από την ύπαρξη σαφών θεσμικών πλαισίων, κατάλληλων μοντέλων χρηματοδότησης και κοινών τεχνικών προτύπων.

Επομένως, τα μικροδίκτυα μπορούν να θεωρηθούν ως ένα από τα πιο ολοκληρωμένα εργαλεία για τη μετάβαση προς ενεργειακά αποδοτικές και περισσότερο αυτόνομες πόλεις. Η αξία τους δεν περιορίζεται στην απλή τεχνολογική σύνδεση Α.Π.Ε. και αποθήκευσης, αλλά επεκτείνεται στη δημιουργία ενός νέου μοντέλου αστικής ενεργειακής οργάνωσης, όπου η παραγωγή, η κατανάλωση, τα δεδομένα και ο έλεγχος λειτουργούν συνδυαστικά. Σε αυτό το πλαίσιο, τα μικροδίκτυα δεν αποτελούν απλώς μία υποδομή ηλεκτροδότησης, αλλά μία στρατηγική αρχιτεκτονική για τη βιωσιμότητα, την ανθεκτικότητα και την ενεργειακή αυτονομία των έξυπνων πόλεων του μέλλοντος.

3.8 Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Systems)

Τα Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Systems – EMS) αποτελούν βασικό στοιχείο των σύγχρονων ενεργειακών υποδομών, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου η παραγωγή, η κατανάλωση και η αποθήκευση ενέργειας είναι κατανεμημένες και μεταβαλλόμενες. Ένα EMS είναι ένα σύνολο τεχνολογικών εργαλείων (λογισμικών, αισθητήρων, μετρητών και αλγορίθμων ελέγχου) που παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την ενεργειακή ροή σε ένα σύστημα και λαμβάνουν αποφάσεις για τη βέλτιστη λειτουργία του. Σκοπός τους είναι η εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, η μείωση ενεργειακών απωλειών, καθώς και η βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας των ενεργειακών υποδομών [62].

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ενεργειακά δίκτυα, όπου η παραγωγή συγκεντρώνεται σε μεγάλες μονάδες και η ενέργεια διανέμεται προς τους καταναλωτές με μονοκατευθυντικό τρόπο, τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα χαρακτηρίζονται από αποκεντρωμένη παραγωγή, μεταβλητές πηγές ενέργειας και ενεργούς χρήστες που μπορούν να λειτουργούν ταυτόχρονα ως παραγωγοί και καταναλωτές (prosumers). Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας αναλαμβάνουν να συντονίσουν διαφορετικούς πόρους – όπως φωτοβολταϊκά συστήματα, συστήματα αποθήκευσης, φορτία και δίκτυα διανομής – ώστε να διατηρείται η σταθερότητα και η αποδοτικότητα του συστήματος.

3.8.1 Smart Grids και ψηφιακή διαχείριση ενέργειας

Η λειτουργία των EMS συνδέεται στενά με την έννοια των έξυπνων δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας (Smart Grids – Έξυπνα Ενεργειακά Δίκτυα). Τα smart grids αποτελούν μια εξέλιξη των παραδοσιακών ηλεκτρικών δικτύων, καθώς ενσωματώνουν ψηφιακές τεχνολογίες, συστήματα επικοινωνίας και προηγμένους αισθητήρες για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ενεργειακής ροής. Μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τα έξυπνα δίκτυα μπορούν να εντοπίζουν ανισορροπίες στο σύστημα, να προβλέπουν μεταβολές στη ζήτηση και να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους ανάλογα με τις συνθήκες. Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, τα EMS λειτουργούν ως ο "εγκέφαλος" του ενεργειακού συστήματος. Οι αλγόριθμοι ελέγχου που χρησιμοποιούν επεξεργάζονται πληροφορίες από αισθητήρες, έξυπνους μετρητές και ενεργειακές μονάδες παραγωγής, προκειμένου να καθορίσουν πότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί τοπική παραγωγή, πότε να αποθηκευτεί ενέργεια και πότε να αντληθεί ισχύς από το κεντρικό δίκτυο. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές παρουσιάζει διακυμάνσεις. Επιπλέον, τα smart grids διευκολύνουν την ενσωμάτωση κατανεμημένων ενεργειακών πόρων σε αστικές περιοχές. Φωτοβολταϊκά σε κτίρια, μικρές ανεμογεννήτριες, συστήματα αποθήκευσης και φορτιστές ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να λειτουργούν συντονισμένα μέσα από ένα EMS, επιτρέποντας την καλύτερη αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής ενέργειας [62].

3.8.2 Ενεργειακός έλεγχος και βελτιστοποίηση λειτουργίας

Ο ενεργειακός έλεγχος αποτελεί βασική λειτουργία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Περιλαμβάνει τη συνεχή παρακολούθηση της παραγωγής, της κατανάλωσης και της κατάστασης των ενεργειακών μονάδων, καθώς και την εφαρμογή στρατηγικών ελέγχου για τη βέλτιστη κατανομή των διαθέσιμων πόρων. Στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα, ο έλεγχος αυτός δεν περιορίζεται μόνο στη διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, αλλά επεκτείνεται και στη βελτίωση της ποιότητας ισχύος, στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και στη διασφάλιση της αξιοπιστίας του δικτύου. Οι τεχνικές ενεργειακού ελέγχου συχνά βασίζονται σε αλγορίθμους πρόβλεψης, οι οποίοι αξιοποιούν ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης, μετεωρολογικές πληροφορίες και πρότυπα συμπεριφοράς των χρηστών. Για παράδειγμα, η πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας επιτρέπει την εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ η ανάλυση των δεδομένων κατανάλωσης βοηθά στην πρόβλεψη της ζήτησης σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Με βάση αυτές τις πληροφορίες, το EMS μπορεί να προγραμματίσει τη λειτουργία των ενεργειακών πόρων ώστε να μειώνεται το κόστος λειτουργίας και να αποφεύγονται αιχμές φορτίου [63]. Σε αστικές εφαρμογές, ο ενεργειακός έλεγχος μπορεί να επεκταθεί σε πολλές υποδομές, όπως δημόσιος φωτισμός, κτίρια, μεταφορικά συστήματα και σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Μέσω κεντρικών πλατφορμών διαχείρισης, οι δήμοι μπορούν να παρακολουθούν τη λειτουργία αυτών των υποδομών και να προσαρμόζουν τη λειτουργία τους με στόχο τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της αποδοτικότητας.

3.8.3 Διαχείριση φορτίου και εξισορρόπηση ζήτησης

Η διαχείριση φορτίου αποτελεί επίσης σημαντική λειτουργία των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας. Η έννοια αυτή αναφέρεται στη δυνατότητα ελέγχου ή μετατόπισης της κατανάλωσης ενέργειας ώστε να αποφεύγονται μεγάλες αιχμές ζήτησης και να αξιοποιείται καλύτερα η διαθέσιμη παραγωγή. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης, το EMS μπορεί να περιορίσει προσωρινά τη λειτουργία μη κρίσιμων φορτίων ή να μεταθέσει τη λειτουργία τους σε χρονικές περιόδους χαμηλότερης κατανάλωσης.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Εάν η φόρτιση πραγματοποιείται ταυτόχρονα από μεγάλο αριθμό χρηστών, μπορεί να προκαλέσει σημαντική επιβάρυνση στο δίκτυο. Μέσω ενός συστήματος διαχείρισης ενέργειας, η διαδικασία φόρτισης μπορεί να κατανεμηθεί χρονικά, ώστε να αποφεύγονται αιχμές φορτίου και να αξιοποιείται καλύτερα η παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές. Αντίστοιχα, σε κτίρια και δημοτικές εγκαταστάσεις, η λειτουργία ενεργοβόρων συστημάτων (όπως κλιματισμός, θέρμανση ή αντλίες) μπορεί να προσαρμόζεται με βάση τη διαθεσιμότητα ενέργειας και τις ανάγκες του δικτύου [63]. Η στρατηγική αυτή συμβάλλει στη μείωση της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και στην αποφυγή επενδύσεων σε επιπλέον υποδομές παραγωγής ή μεταφοράς ενέργειας.

3.8.4 Ρόλος των EMS στις βιώσιμες και έξυπνες πόλεις

Η χρήση συστημάτων διαχείρισης ενέργειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη βιώσιμων και έξυπνων πόλεων. Μέσα από τη συνδυασμένη λειτουργία αισθητήρων, δικτύων επικοινωνίας και συστημάτων ανάλυσης δεδομένων, οι πόλεις μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την ενεργειακή κατανάλωση των υποδομών τους και να λαμβάνουν αποφάσεις που βελτιώνουν την αποδοτικότητα και μειώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές, τα EMS ενσωματώνονται σε πλατφόρμες διαχείρισης πόλης που συλλέγουν δεδομένα από διαφορετικούς τομείς, όπως ενέργεια, μεταφορές, περιβάλλον και υποδομές [62]. Η διασύνδεση αυτή επιτρέπει τη δημιουργία ολοκληρωμένων στρατηγικών ενεργειακής διαχείρισης, όπου η κατανάλωση ενέργειας προσαρμόζεται δυναμικά με βάση τις πραγματικές ανάγκες της πόλης.

Επιπλέον, τα συστήματα αυτά διευκολύνουν την ενσωμάτωση τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης και συσκευών μηδενικής ενέργειας, οι οποίες βασίζονται συχνά σε μικρές ποσότητες συλλεγόμενης ενέργειας από το περιβάλλον. Μέσω της κατάλληλης διαχείρισης, οι συσκευές αυτές μπορούν να λειτουργούν αξιόπιστα για μεγάλα χρονικά διαστήματα, συμβάλλοντας στη δημιουργία εκτεταμένων δικτύων αισθητήρων που υποστηρίζουν την περιβαλλοντική παρακολούθηση και τη διαχείριση αστικών πόρων.

Έτσι, τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας αποτελούν κρίσιμο στοιχείο για την αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη λειτουργία σύνθετων ενεργειακών υποδομών σε αστικά περιβάλλοντα. Μέσω της συνδυασμένης χρήσης τεχνολογιών ελέγχου, ανάλυσης δεδομένων και αυτοματισμού, τα EMS συμβάλλουν στη δημιουργία ενεργειακά αποδοτικών, ευέλικτων και βιώσιμων αστικών συστημάτων.

4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΩΣΙΜΕΣ ΠΟΛΕΙΣ

4.1 Στρατηγικές Ενσωμάτωσης Συσκευών Μηδενικής Ενέργειας

Η ενσωμάτωση συσκευών μηδενικής ενέργειας στον αστικό ιστό δεν συνιστά απλώς τεχνολογική επιλογή, αλλά οργανωμένη διαδικασία που προϋποθέτει θεσμικό σχεδιασμό, κανονιστικό πλαίσιο και μηχανισμούς χρηματοδότησης. Οι πόλεις που επιδιώκουν τη συστηματική αξιοποίηση τέτοιων τεχνολογιών οφείλουν να εντάσσουν τη χρήση τους σε μακροπρόθεσμα στρατηγικά σχέδια, όπως τα Σχέδια Δράσης για τη Βιώσιμη Ενέργεια και το Κλίμα (SECAP - Sustainable Energy and Climate Action Plan) ή τα ολοκληρωμένα σχέδια βιώσιμης αστικής ανάπτυξης [42]. Στο επίπεδο αυτό, οι συσκευές μηδενικής ενέργειας αντιμετωπίζονται ως υποδομή συλλογής δεδομένων και ενεργειακής αυτονομίας, η οποία υποστηρίζει πολιτικές ενεργειακής αποδοτικότητας, διαχείρισης πόρων και περιβαλλοντικής παρακολούθησης.

Η πολεοδομική ενσωμάτωση απαιτεί πρόβλεψη για την τοποθέτηση αισθητήρων και μικρών ενεργειακών μονάδων σε δημόσιους χώρους, κτίρια και δίκτυα κοινής ωφέλειας. Η ένταξή τους σε νέα έργα μπορεί να γίνει μέσω κανονισμών που επιβάλλουν πρότυπα ενεργειακής απόδοσης και ψηφιακής ετοιμότητας σε δημοτικές υποδομές. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η αναθεώρηση της οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων από την European Commission εισάγει αυστηρότερα κριτήρια για κτίρια χαμηλών εκπομπών, δημιουργώντας θεσμικό υπόβαθρο για την ενσωμάτωση τεχνολογιών παρακολούθησης και ενεργειακής διαχείρισης [43]. Η αξιοποίηση συσκευών μηδενικής ενέργειας μπορεί να ενταχθεί σε τέτοιες ρυθμίσεις ως μέσο συνεχούς ελέγχου κατανάλωσης και βελτιστοποίησης λειτουργίας.

Σημαντικό εργαλείο εφαρμογής αποτελούν τα χρηματοδοτικά προγράμματα που στηρίζουν έργα ψηφιακού και ενεργειακού μετασχηματισμού. Τα διαρθρωτικά ταμεία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το πρόγραμμα Horizon Europe και μηχανισμοί πράσινης χρηματοδότησης παρέχουν πόρους για πιλοτικές εγκαταστάσεις, έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και για εκτεταμένες αναβαθμίσεις δημοτικών συστημάτων. Η πρόσβαση σε τέτοια μέσα προϋποθέτει τεκμηριωμένη ανάλυση κόστους–οφέλους, όπου αποδεικνύεται η μείωση λειτουργικών δαπανών, η περιορισμένη ανάγκη συντήρησης και η μείωση εκπομπών μέσω της χρήσης ενεργειακά αυτόνομων συσκευών [42]. Η οικονομική βιωσιμότητα δεν αξιολογείται μόνο με βάση το αρχικό κόστος εγκατάστασης, αλλά

και μέσω ανάλυσης κύκλου ζωής, λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια λειτουργίας και τη μείωση αντικατάστασης μπαταριών ή καλωδιακών επεκτάσεων.

Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική Έξυπνης Πόλης

(Πηγή : https://www.researchgate.net/publication/283769999_SMARTIE_project_Secure_IoT_data_management_for_smart_cities)

Η επιτυχής εφαρμογή προϋποθέτει επίσης την ανάπτυξη τεχνικών προτύπων και πρωτοκόλλων διαλειτουργικότητας. Η ύπαρξη κοινών προδιαγραφών επιτρέπει τη διασύνδεση συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών σε ενιαίες πλατφόρμες δεδομένων, μειώνοντας τον κίνδυνο τεχνολογικού εγκλωβισμού. Σε αυτό το επίπεδο, κατευθυντήριες γραμμές και πρότυπα που προωθούνται από διεθνείς οργανισμούς, όπως η International Telecommunication Union, υποστηρίζουν την ανάπτυξη έξυπνων και βιώσιμων πόλεων με έμφαση στη μετρησιμότητα και στη συγκρισιμότητα δεικτών απόδοσης. Η διαλειτουργικότητα αποτελεί προϋπόθεση για την αξιοποίηση των δεδομένων σε κεντρικά συστήματα διαχείρισης, τα οποία μετατρέπουν την πληροφορία σε εργαλείο σχεδιασμού πολιτικών.

Πέρα από τη θεσμική και τεχνική διάσταση, η ενσωμάτωση συσκευών μηδενικής ενέργειας απαιτεί διεπιστημονική συνεργασία. Η ανάπτυξη και εφαρμογή τους εμπλέκει μηχανικούς

ενέργειας, ειδικούς πληροφορικής, πολεοδόμους, οικονομολόγους και νομικούς, καθώς κάθε παρέμβαση επηρεάζει διαφορετικές πτυχές της αστικής λειτουργίας. Οι μηχανικοί σχεδιάζουν τα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης, οι ειδικοί δεδομένων αναπτύσσουν αλγορίθμους επεξεργασίας και πρόβλεψης, ενώ οι φορείς χάραξης πολιτικής καθορίζουν ρυθμιστικά όρια και διαδικασίες αδειοδότησης [43]. Η συνεργασία αυτή επιτρέπει τη σύνθεση τεχνικής γνώσης και κοινωνικών παραμέτρων, ώστε οι τεχνολογικές λύσεις να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των κατοίκων και να ενσωματώνονται ομαλά στο αστικό περιβάλλον.

Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί επιπλέον παράγοντα που επηρεάζει την επιτυχία εφαρμογής. Η διαφάνεια στη χρήση των δεδομένων, η προστασία προσωπικών πληροφοριών και η ενημέρωση των πολιτών για τα οφέλη της ενεργειακής αυτονομίας ενισχύουν την εμπιστοσύνη προς τις νέες τεχνολογίες. Η συμμετοχική διακυβέρνηση, με δημόσιες διαβουλεύσεις και πιλοτικά έργα σε γειτονιές, διευκολύνει την αξιολόγηση πρακτικών ζητημάτων πριν από την ευρεία υιοθέτηση.

Η στρατηγική ενσωμάτωσης συσκευών μηδενικής ενέργειας σε πόλεις συνδυάζει επομένως κανονιστικά μέτρα, τεχνικό σχεδιασμό, οικονομική τεκμηρίωση και συνεργατικά σχήματα υλοποίησης. Η μετάβαση σε ενεργειακά αποδοτικές και ψηφιακά διασυνδεδεμένες αστικές δομές δεν εξαρτάται μόνο από την ωριμότητα της τεχνολογίας, αλλά από τη δυνατότητα των τοπικών αρχών να οργανώσουν ένα συνεκτικό σύστημα σχεδιασμού, εφαρμογής και αξιολόγησης.

4.2 Μελέτες Περίπτωσης Επιτυχημένων Εφαρμογών

Η διερεύνηση συγκεκριμένων αστικών παραδειγμάτων αποτελεί κρίσιμο βήμα για τη μετάβαση από τη θεωρητική προσέγγιση της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης στην αποτίμηση απτών, εφαρμοσμένων πολιτικών και τεχνολογικών επιλογών. Ενώ τα θεωρητικά μοντέλα παρέχουν το εννοιολογικό πλαίσιο και τους στόχους, οι μελέτες περίπτωσης αναδεικνύουν τις πραγματικές συνθήκες, τις διοικητικές δυσκολίες, τις κοινωνικές παραμέτρους και τους τεχνικούς περιορισμούς που επηρεάζουν την υλοποίηση. Μέσα από τη σύγκριση διαφορετικών αστικών συστημάτων, καθίσταται δυνατή η κατανόηση των παραγόντων επιτυχίας, αλλά και των προκλήσεων που συνοδεύουν τον ενεργειακό και ψηφιακό μετασχηματισμό.

Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται τρεις ευρωπαϊκές πόλεις με ισχυρό προσανατολισμό προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη μείωση εκπομπών: η Κοπεγχάγη, το Παρίσι και το Αμβούργο. Και οι τρεις έχουν υλοποιήσει εκτεταμένες παρεμβάσεις ενεργειακού μετασχηματισμού, ενσωματώνοντας τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έξυπνα δίκτυα, συστήματα αποθήκευσης και ψηφιακές υποδομές παρακολούθησης χαμηλής κατανάλωσης. Η ανάλυση οργανώνεται γύρω από τέσσερις βασικούς άξονες: (α) στρατηγικός σχεδιασμός, (β) τεχνολογική υλοποίηση, (γ) μετρήσιμα αποτελέσματα και (δ) τεχνικές και θεσμικές προκλήσεις [44] - [46].

4.2.1 Κοπεγχάγη

Η Κοπεγχάγη αποτελεί διεθνώς αναγνωρισμένο παράδειγμα ολοκληρωμένης στρατηγικής κλιματικής ουδετερότητας. Ο στρατηγικός της σχεδιασμός βασίζεται σε σαφώς ποσοτικοποιημένους στόχους μείωσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και σε μακροπρόθεσμο προγραμματισμό που ενσωματώνει την ενεργειακή πολιτική στον συνολικό αστικό σχεδιασμό. Η

ενεργειακή μετάβαση δεν αντιμετωπίζεται ως μεμονωμένη τεχνική παρέμβαση, αλλά ως συστημική αναδιάρθρωση του τρόπου παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας.

Κεντρικό στοιχείο του μοντέλου της αποτελεί το εκτεταμένο δίκτυο τηλεθέρμανσης, το οποίο εξυπηρετεί τη μεγάλη πλειονότητα των κτιρίων. Το σύστημα αυτό συνδυάζεται με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα (τόσο χερσαία όσο και υπεράκτια) καθώς και από μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού [47]. Η αποκεντρωμένη παραγωγή και η ενσωμάτωση εγκαταστάσεων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας συμβάλλουν στη σταθεροποίηση της παροχής, ιδίως σε περιόδους διακύμανσης της αιολικής παραγωγής.

Στον τομέα των ψηφιακών υποδομών, η πόλη έχει αναπτύξει εκτεταμένα δίκτυα αισθητήρων για τη μέτρηση περιβαλλοντικών και ενεργειακών δεικτών. Συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, συχνά εξοπλισμένες με μικρά φωτοβολταϊκά στοιχεία ή υβριδικά συστήματα συλλογής ενέργειας, εγκαθίστανται σε στύλους φωτισμού, δημόσια κτίρια και οδικές αρτηρίες. Τα δεδομένα που συλλέγονται επιτρέπουν ανάλυση κυκλοφοριακών ροών, προσαρμοστικό έλεγχο του δημοτικού φωτισμού και βελτιστοποίηση της ενεργειακής λειτουργίας κτιρίων.

Σε επίπεδο αποτελεσμάτων, η Κοπεγχάγη έχει επιτύχει σημαντική μείωση εκπομπών σε σύγκριση με τις αρχές της δεκαετίας του 1990, ενώ παρουσιάζει υψηλό ποσοστό μετακινήσεων με ποδήλατο και μέσα χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος [48]. Ωστόσο, η εξάρτηση από τις καιρικές συνθήκες για την παραγωγή αιολικής ενέργειας απαιτεί συνεχή τεχνική προσαρμογή, ανάπτυξη ευέλικτων συστημάτων αποθήκευσης και επενδύσεις σε διασυνδέσεις με ευρύτερα δίκτυα.

4.2.2 Παρίσι

Το Παρίσι έχει εστιάσει στρατηγικά στην ενεργειακή αναβάθμιση του υφιστάμενου κτιριακού αποθέματος, αναγνωρίζοντας ότι τα κτίρια αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους τομείς κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών. Δεδομένης της παλαιότητας μεγάλου μέρους των κατασκευών, η πόλη έχει δρομολογήσει εκτεταμένα προγράμματα ανακαίνισης, με στόχο τη βελτίωση της θερμομόνωσης, την αντικατάσταση συστημάτων θέρμανσης και την εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Πολλά δημοτικά κτίρια έχουν εξοπλιστεί με φωτοβολταϊκά συστήματα, έξυπνους μετρητές και αυτοματοποιημένα συστήματα διαχείρισης κατανάλωσης [49]. Παράλληλα, η ανάπτυξη ψηφιακών πλατφορμών επιτρέπει τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από δίκτυα αισθητήρων που καταγράφουν ποιότητα αέρα, θερμοκρασία, θόρυβο και κυκλοφοριακή συμφόρηση. Η χρήση ενεργειακά αυτόνομων συσκευών σε δημόσιους χώρους μειώνει την ανάγκη εκτεταμένων παρεμβάσεων καλωδίωσης, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε ένα πυκνοδομημένο και ιστορικά προστατευόμενο αστικό περιβάλλον.

Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν σταδιακή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των δημοτικών υποδομών και μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Παρά ταύτα, η υλοποίηση των έργων συναντά περιορισμούς που σχετίζονται με την αρχιτεκτονική κληρονομιά, τις σύνθετες διοικητικές διαδικασίες και την ανάγκη συντονισμού πολλών εμπλεκόμενων φορέων [50]. Επιπλέον, η υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα περιορίζει τις διαθέσιμες επιφάνειες για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, καθιστώντας αναγκαία την έμφαση στην εξοικονόμηση και την αποδοτική διαχείριση.

4.2.3 Αμβούργο

Το Αμβούργο έχει αναπτύξει μία ολοκληρωμένη στρατηγική ψηφιακού μετασχηματισμού που συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή πολιτική χαμηλών εκπομπών. Σε επιλεγμένες αστικές περιοχές, όπως αναπτυσσόμενες ζώνες μικτής χρήσης, εφαρμόζονται πρότυπα ενεργειακά συστήματα που συνδυάζουν τοπική παραγωγή, έξυπνα δίκτυα και υποδομές αποθήκευσης.

Η διαχείριση των ενεργειακών ροών βασίζεται σε συστήματα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, τα οποία αξιοποιούν αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης για τη συλλογή δεδομένων από κτίρια, οδικά δίκτυα και δημόσιες υποδομές. Η διασύνδεση τοπικών μονάδων παραγωγής με το κεντρικό δίκτυο επιτρέπει καλύτερη εξισορρόπηση φορτίου, ενώ η επένδυση σε υποδομές αποθήκευσης αυξάνει την ευελιξία του συστήματος [51].

Παράλληλα, η αξιοποίηση συσκευών μικρής κατανάλωσης σε τομείς όπως η διαχείριση κυκλοφορίας και η περιβαλλοντική παρακολούθηση έχει μειώσει λειτουργικά κόστη και έχει ενισχύσει τη διαθεσιμότητα δεδομένων για αστικό σχεδιασμό [52]. Ωστόσο, η μετάβαση από παλαιά ενεργειακά και πληροφοριακά συστήματα σε νέα, διαλειτουργικά περιβάλλοντα απαιτεί σημαντικούς οικονομικούς πόρους, εκπαίδευση τεχνικού προσωπικού και θεσμικό συντονισμό. Η διασφάλιση διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογικών πλατφορμών και προτύπων παραμένει κρίσιμο ζήτημα.

4.2.4 Ποσοτική και ποιοτική σύγκριση

Παράμετρος	Κοπεγχάγη	Παρίσι	Αμβούργο
Κύρια έμφαση	Κλιματική ουδετερότητα & τηλεθέρμανση	Ανακαίνιση κτιρίων & ψηφιακή διαχείριση	Ψηφιακά δίκτυα & τοπική παραγωγή
Ρόλος συσκευών χαμηλής κατανάλωσης	Παρακολούθηση ενέργειας & κυκλοφορίας	Περιβαλλοντικοί αισθητήρες & μετρητές	Διαχείριση φορτίου & μεταφορών
Μείωση εκπομπών	Σημαντική (μακροχρόνια στρατηγική)	Σταδιακή μέσω αναβαθμίσεων	Συνδεδεμένη με έργα έξυπνου δικτύου
Βασικές δυσκολίες	Μεγάλο κόστος επενδύσεων	Περιορισμένος χώρος & γραφειοκρατία	Τεχνική εναρμόνιση & μετάβαση υποδομών

Πίνακας 3: Ποσοτική και ποιοτική σύγκριση

Η συγκριτική ανάλυση αναδεικνύει ότι οι επιτυχημένες εφαρμογές βασίζονται σε σαφείς ποσοτικούς στόχους, σταθερή πολιτική δέσμευση και αξιοποίηση τεχνολογιών χαμηλής κατανάλωσης ως υποστηρικτικού μηχανισμού ενεργειακής πολιτικής. Οι συσκευές μηδενικής ή πολύ χαμηλής κατανάλωσης δεν λειτουργούν απομονωμένα· ενσωματώνονται σε ευρύτερα συστήματα παραγωγής, αποθήκευσης και διαχείρισης ενέργειας [47] – [52].

Κοινό χαρακτηριστικό και των τριών πόλεων είναι η σύνδεση τεχνολογικών παρεμβάσεων με μετρήσιμους δείκτες απόδοσης. Οι προκλήσεις αφορούν κυρίως το χρηματοδοτικό κόστος, τη διαχείριση υφιστάμενων υποδομών και την ανάγκη συντονισμού πολλαπλών φορέων. Η εμπειρία

τους δείχνει ότι η επιτυχία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική ωριμότητα, αλλά από τη συνοχή στρατηγικής, θεσμικού πλαισίου και διοικητικής ικανότητας.

4.3 Προκλήσεις και Ευκαιρίες

Η εφαρμογή συσκευών μηδενικής ενέργειας στο πλαίσιο βιώσιμων και «έξυπνων» πόλεων αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, η οποία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνολογική διαθεσιμότητα ή την καινοτομία των επιμέρους εξαρτημάτων. Αντιθέτως, διαμορφώνεται από ένα πλέγμα τεχνικών, οικονομικών, θεσμικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών παραγόντων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και επηρεάζουν την ταχύτητα, την κλίμακα και την ποιότητα της υιοθέτησης. Η μετάβαση από πιλοτικές εφαρμογές σε εκτεταμένα αστικά δίκτυα απαιτεί ολιστική προσέγγιση, όπου η τεχνολογία ενσωματώνεται λειτουργικά στο αστικό σύστημα και υποστηρίζεται από κατάλληλο κανονιστικό και διοικητικό πλαίσιο [47] – [52].

Σε τεχνικό επίπεδο, μία από τις βασικές προκλήσεις αφορά τη διαλείπουσα φύση της συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον. Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας αξιοποιούν πηγές όπως η ηλιακή ακτινοβολία, οι θερμικές διαφορές, οι μηχανικές δονήσεις ή τα ραδιοκύματα. Ωστόσο, οι πηγές αυτές χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα και αβεβαιότητα [44]. Για παράδειγμα, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με την εποχή, τις καιρικές συνθήκες και τη σκίαση από γειτονικά κτίρια, ιδιαίτερα σε πυκνοδομημένα αστικά κέντρα. Αντίστοιχα, η ένταση του ανέμου ή των μηχανικών δονήσεων δεν είναι σταθερή, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε χρονικά διαστήματα ανεπαρκούς τροφοδοσίας.

Η τεχνική απάντηση σε αυτή την πρόκληση περιλαμβάνει την αποδοτική διαχείριση ισχύος, τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης σε επίπεδο μικροελεγκτών και την κατάλληλη διαστασιολόγηση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως υπερπυκνωτές ή μικρές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Η αρχιτεκτονική των συσκευών πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να λειτουργεί σε καθεστώς ενεργειακής προσαρμοστικότητας, μειώνοντας προσωρινά τη συχνότητα μετάδοσης δεδομένων ή εισερχόμενη σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης όταν τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα μειώνονται. Η ανάγκη για απομακρυσμένη παρακολούθηση της κατάστασης λειτουργίας (remote diagnostics) καθίσταται επίσης κρίσιμη, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για χιλιάδες κόμβους εγκατεστημένους σε δημόσιους χώρους.

Ένα επιπλέον τεχνικό ζήτημα αφορά τη διαλειτουργικότητα. Στο αστικό περιβάλλον συνυπάρχουν συστήματα από διαφορετικούς κατασκευαστές, με ετερογενή πρωτόκολλα επικοινωνίας και διαφορετικά πρότυπα λογισμικού. Η απουσία κοινών τεχνικών προτύπων δυσχεραίνει την ενοποίηση των δεδομένων σε κεντρικές πλατφόρμες διαχείρισης και περιορίζει τη δυνατότητα κλιμάκωσης. Ο τεχνολογικός κατακερματισμός μπορεί να οδηγήσει σε «κλειστά» οικοσυστήματα που δυσκολεύουν την αναβάθμιση ή την αντικατάσταση εξοπλισμού στο μέλλον. Συνεπώς, η υιοθέτηση ανοικτών προτύπων και διαλειτουργικών αρχιτεκτονικών αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη βιώσιμη ανάπτυξη τέτοιων δικτύων.

Σημαντική διάσταση αποτελεί και η κυβερνοασφάλεια. Οι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης διαθέτουν περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους, γεγονός που δυσχεραίνει την εφαρμογή σύνθετων πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης και μηχανισμών πιστοποίησης [45]. Παρ' όλα αυτά, η προστασία δεδομένων και η αποτροπή κακόβουλων παρεμβάσεων είναι κρίσιμη, ιδίως όταν τα δίκτυα συλλέγουν πληροφορίες που σχετίζονται με κυκλοφοριακές ροές, ενεργειακή κατανάλωση

ή περιβαλλοντικούς δείκτες. Η εξισορρόπηση μεταξύ ενεργειακής αποδοτικότητας και επιπέδου ασφάλειας αποτελεί τεχνολογική και σχεδιαστική πρόκληση.

Σε οικονομικό επίπεδο, το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να λειτουργήσει ανασταλτικά, ιδιαίτερα σε δήμους με περιορισμένους προϋπολογισμούς. Η προμήθεια εξοπλισμού, η ανάπτυξη ψηφιακών πλατφορμών, η ενσωμάτωση με υφιστάμενες υποδομές και η εκπαίδευση προσωπικού απαιτούν σημαντικές επενδύσεις. Αν και το λειτουργικό κόστος είναι μειωμένο λόγω χαμηλής κατανάλωσης και περιορισμένης ανάγκης αντικατάστασης μπαταριών, η απόσβεση της επένδυσης πραγματοποιείται σε βάθος χρόνου. Συχνά, τα κριτήρια αξιολόγησης δημόσιων έργων εστιάζουν σε βραχυπρόθεσμους οικονομικούς δείκτες, χωρίς να συνυπολογίζουν τα μακροπρόθεσμα οφέλη που προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση διαχείρισης πόρων, τη μείωση εκπομπών και την αποφυγή μελλοντικών δαπανών.

Θεσμικά, η επιτυχής εφαρμογή εξαρτάται από την προσαρμογή του κανονιστικού πλαισίου στις απαιτήσεις ψηφιακών και ενεργειακά αυτόνομων υποδομών. Η εγκατάσταση αισθητήρων σε δημόσιους χώρους απαιτεί σαφείς διαδικασίες αδειοδότησης, καθορισμό ευθυνών συντήρησης και ρυθμίσεις σχετικά με την ιδιοκτησία και τη χρήση των δεδομένων. Η έλλειψη συντονισμού μεταξύ διαφορετικών δημοτικών υπηρεσιών ή μεταξύ τοπικού και εθνικού επιπέδου μπορεί να επιβραδύνει σημαντικά την υλοποίηση έργων. Η διαμόρφωση ολοκληρωμένων στρατηγικών «έξυπνης πόλης» με σαφείς ρόλους και αρμοδιότητες είναι καθοριστική για την υπέρβαση τέτοιων εμποδίων.

Η κοινωνική αποδοχή αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα. Η εγκατάσταση συστημάτων παρακολούθησης σε δημόσιους χώρους ενδέχεται να εγείρει ανησυχίες σχετικά με την ιδιωτικότητα και τη χρήση των συλλεγόμενων δεδομένων [46]. Η διαφάνεια, η σαφής ενημέρωση των πολιτών και η υιοθέτηση αυστηρών πολιτικών προστασίας προσωπικών δεδομένων ενισχύουν την εμπιστοσύνη και τη νομιμοποίηση των παρεμβάσεων. Επιπλέον, η οπτική ένταξη ενεργειακών μονάδων ή αισθητήρων σε ιστορικά ή αρχιτεκτονικά ευαίσθητα περιβάλλοντα απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό ώστε να αποφεύγονται κοινωνικές αντιδράσεις.

Σε περιβαλλοντικό επίπεδο, παρότι οι συσκευές μηδενικής ενέργειας μειώνουν τη χρήση συμβατικών μπαταριών και τη λειτουργική κατανάλωση, η μαζική παραγωγή τους συνεπάγεται κατανάλωση πρώτων υλών και παραγωγή ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Η ανάπτυξη συστημάτων ανακύκλωσης, η χρήση ανακυκλώσιμων ή χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος υλικών και η εφαρμογή αναλύσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment) καθίστανται απαραίτητες για την πλήρη αποτίμηση των επιπτώσεων. Η βιωσιμότητα πρέπει να αξιολογείται συνολικά και όχι μόνο στη φάση λειτουργίας.

Παρά τις προκλήσεις αυτές, οι προοπτικές είναι ιδιαίτερα θετικές. Η συνεχιζόμενη πρόοδος στη μικροηλεκτρονική οδηγεί σε ολοένα και χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος, ενώ νέα υλικά και τεχνολογίες συλλογής ενέργειας αυξάνουν την αποδοτικότητα και την αξιοπιστία. Η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένων αναλυτικών εργαλείων επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται, οδηγώντας σε βελτιστοποίηση ενεργειακών ροών, διαχείριση κυκλοφορίας και αποδοτικότερη παροχή αστικών υπηρεσιών.

Επιπροσθέτως, η μετάβαση προς κλιματικά ουδέτερες πόλεις, όπως προωθείται από ευρωπαϊκές και διεθνείς στρατηγικές, δημιουργεί ευνοϊκό θεσμικό και χρηματοδοτικό περιβάλλον για επενδύσεις σε ενεργειακά αυτόνομες τεχνολογίες. Η ενσωμάτωση συσκευών μηδενικής ενέργειας

σε νέα έργα υποδομών (από έξυπνα δίκτυα έως αναβαθμισμένα κτίρια και συστήματα μεταφορών) μπορεί να ενισχύσει την ενεργειακή ανθεκτικότητα, να μειώσει το λειτουργικό κόστος και να βελτιώσει τη συνολική ποιότητα ζωής.

Επομένως, η επιτυχία της εφαρμογής τους εξαρτάται από τη σύζευξη τεχνολογικής καινοτομίας, στρατηγικού σχεδιασμού και κοινωνικής συναίνεσης. Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας δεν αποτελούν απλώς τεχνική λύση χαμηλής κατανάλωσης, αλλά κρίσιμο στοιχείο ενός ευρύτερου μετασχηματισμού που συνδέει την ενεργειακή αποδοτικότητα, τον ψηφιακό εκσυγχρονισμό και τη μακροπρόθεσμη περιβαλλοντική βιωσιμότητα των πόλεων.

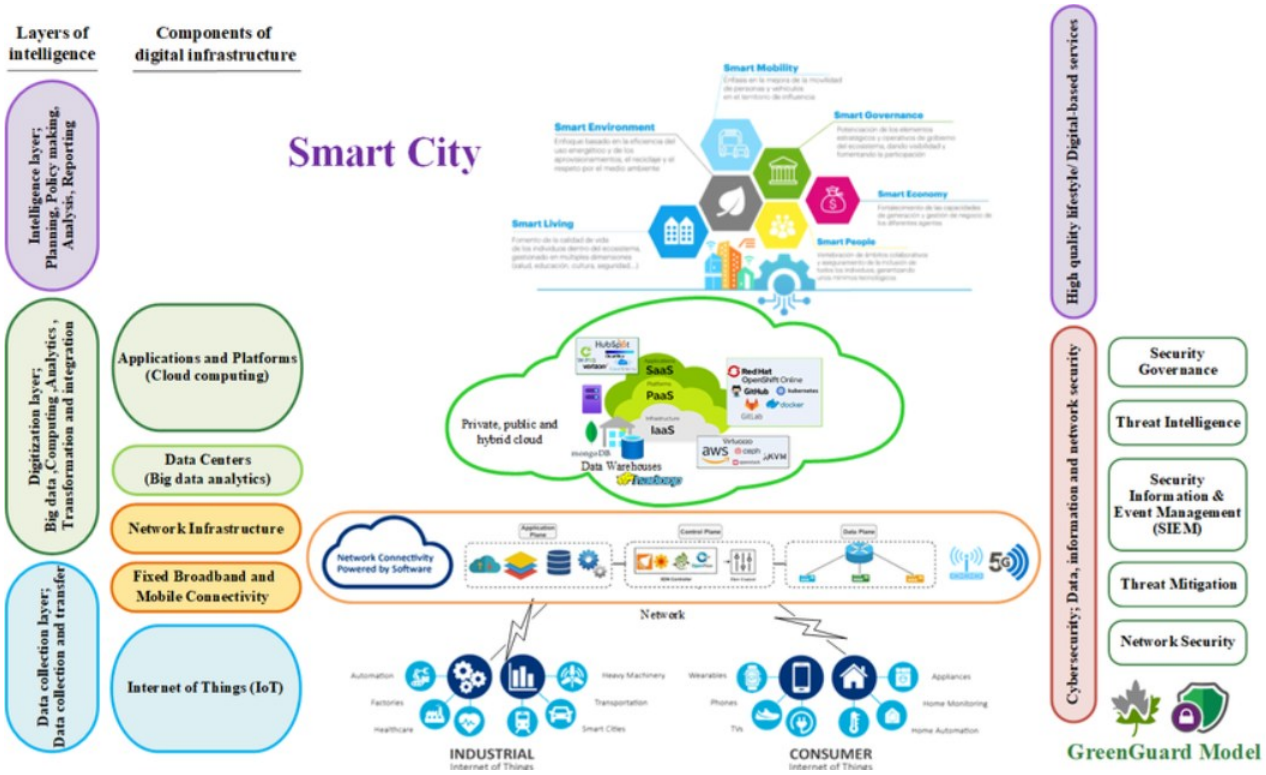
4.4 Ρόλος των Ψηφιακών Τεχνολογιών στις Βιώσιμες Πόλεις

Η μετάβαση προς βιώσιμες πόλεις δεν βασίζεται μόνο στην υιοθέτηση καθαρών μορφών ενέργειας ή στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των υποδομών. Ένας εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι η αξιοποίηση ψηφιακών τεχνολογιών που επιτρέπουν την παρακολούθηση, την ανάλυση και τη διαχείριση των αστικών συστημάτων σε πραγματικό χρόνο. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν στις πόλεις να λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, να αξιοποιούν καλύτερα τους διαθέσιμους πόρους και να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις για την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών και ενεργειακών προκλήσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η έννοια της «έξυπνης πόλης» συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη ψηφιακών υποδομών που συλλέγουν δεδομένα από διαφορετικές πηγές και τα αξιοποιούν για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των αστικών υπηρεσιών. Οι υποδομές αυτές περιλαμβάνουν δίκτυα αισθητήρων, συστήματα επικοινωνίας, πλατφόρμες ανάλυσης δεδομένων και εφαρμογές λογισμικού που επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση της ενεργειακής κατανάλωσης, της ποιότητας του περιβάλλοντος και της λειτουργίας των δημόσιων υποδομών.

4.4.1 Internet of Things (IoT) στις έξυπνες πόλεις

Μία από τις βασικότερες τεχνολογίες που υποστηρίζουν τη λειτουργία των βιώσιμων πόλεων είναι το Internet of Things (IoT – Διαδίκτυο των Πραγμάτων). Το IoT αναφέρεται σε ένα δίκτυο διασυνδεδεμένων συσκευών που μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους, να επικοινωνούν μεταξύ τους και να μεταδίδουν πληροφορίες σε κεντρικά συστήματα επεξεργασίας. Στις αστικές υποδομές, οι συσκευές IoT εγκαθίστανται σε διάφορα σημεία της πόλης, όπως σε δημόσιους χώρους, κτίρια, μεταφορικά δίκτυα και ενεργειακές εγκαταστάσεις [64]. Μέσω αισθητήρων και συστημάτων επικοινωνίας, οι συσκευές αυτές καταγράφουν δεδομένα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας, τη θερμοκρασία, την ποιότητα του αέρα, την κυκλοφορία οχημάτων και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν τη λειτουργία της πόλης.

Η συνεχής συλλογή δεδομένων επιτρέπει στις δημοτικές αρχές να κατανοούν καλύτερα τα πρότυπα λειτουργίας των αστικών συστημάτων και να εντοπίζουν προβλήματα ή ανεπάρκειες στις υποδομές. Για παράδειγμα, μέσω αισθητήρων φωτισμού είναι δυνατό να ρυθμίζεται δυναμικά η ένταση του δημόσιου φωτισμού, ενώ αισθητήρες κυκλοφορίας μπορούν να συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση της ροής των οχημάτων και στη μείωση της συμφόρησης [64].



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική IoT σε έξυπνη πόλη

(Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/385733944_Designing_and_localizing_a_novel_cybersecurity_model_according_to_smart_city_digital_infrastructure_components_A_Case_Study_of_GreenWeb_Co/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic)

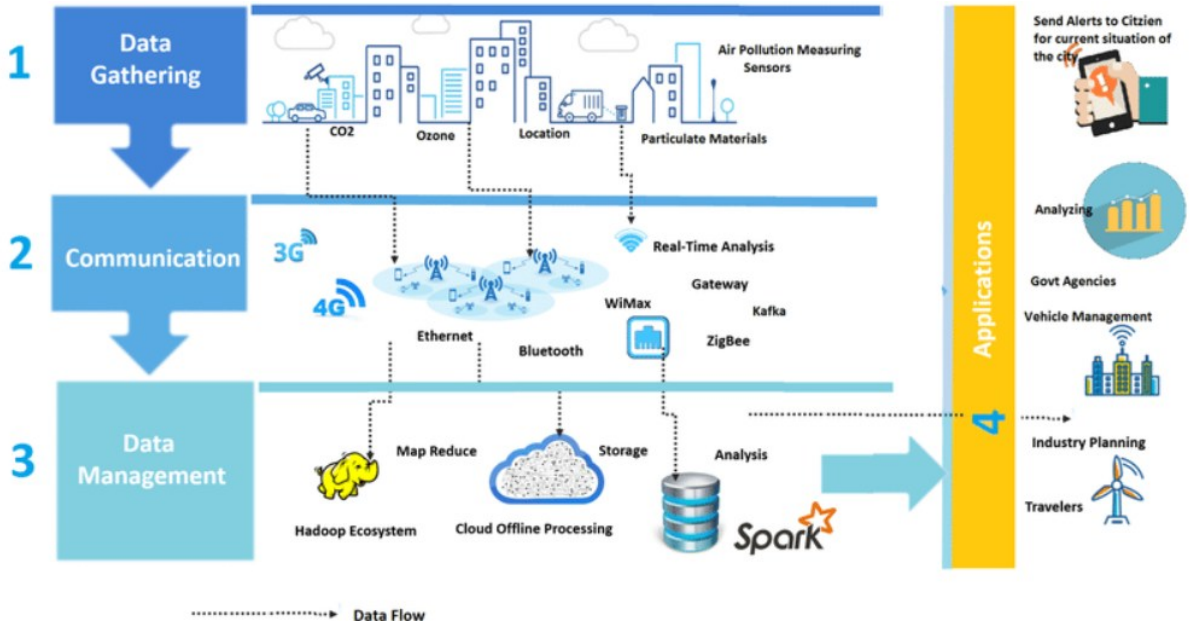
4.4.2 Αισθητήρες περιβάλλοντος

Οι αισθητήρες περιβάλλοντος αποτελούν βασικό στοιχείο των ψηφιακών υποδομών μιας βιώσιμης πόλης. Οι συσκευές αυτές έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν περιβαλλοντικές παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η συγκέντρωση ατμοσφαιρικών ρύπων, τα επίπεδα θορύβου και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η χρήση τέτοιων αισθητήρων επιτρέπει τη δημιουργία εκτεταμένων δικτύων παρακολούθησης του αστικού περιβάλλοντος [65]. Μέσω των δικτύων αυτών, οι αρμόδιες αρχές μπορούν να αξιολογούν την ποιότητα του αέρα σε διαφορετικές περιοχές της πόλης και να λαμβάνουν μέτρα για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Παράλληλα, τα δεδομένα που συλλέγονται μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη πολιτικών βιώσιμης κινητικότητας, όπως ο περιορισμός της κυκλοφορίας σε περιοχές με υψηλή ρύπανση ή η προώθηση εναλλακτικών μορφών μετακίνησης. Επιπλέον, οι αισθητήρες περιβάλλοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση φυσικών φαινομένων και την έγκαιρη ανίχνευση κινδύνων, όπως πλημμύρες, ακραίες θερμοκρασίες ή αυξημένα επίπεδα

ρύπων. Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της αστικής ανθεκτικότητας και στην προστασία της δημόσιας υγείας.

4.4.3 Συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων

Η αποτελεσματική λειτουργία των ψηφιακών υποδομών μιας βιώσιμης πόλης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαχείριση των δεδομένων που συλλέγονται από τα δίκτυα αισθητήρων και τις συσκευές IoT. Τα δεδομένα αυτά μεταδίδονται σε κεντρικές πλατφόρμες διαχείρισης, όπου αποθηκεύονται, αναλύονται και αξιοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων. Οι πλατφόρμες διαχείρισης δεδομένων επιτρέπουν την ενοποίηση πληροφοριών από διαφορετικούς τομείς της πόλης, όπως η ενέργεια, οι μεταφορές, το περιβάλλον και οι δημόσιες υπηρεσίες.



Εικόνα 11: Δίκτυο αισθητήρων περιβάλλοντος και συλλογή δεδομένων

(Πηγή : https://www.researchgate.net/publication/334058882_Comparative_Analysis_of_Machine_Learning_Techniques_for_Predicting_Air_Quality_in_Smart_Cities/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic)

Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων αυτών μπορούν να εντοπιστούν πρότυπα κατανάλωσης, να προβλεφθούν μελλοντικές ανάγκες και να αναπτυχθούν στρατηγικές για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των αστικών υποδομών [65]. Για παράδειγμα, η ανάλυση δεδομένων ενεργειακής κατανάλωσης σε δημόσια κτίρια μπορεί να οδηγήσει στην εφαρμογή μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας, ενώ η επεξεργασία δεδομένων κυκλοφορίας μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταφορών. Επιπλέον, η χρήση τεχνολογιών ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (Big Data) και τεχνητής νοημοσύνης επιτρέπει την ανάπτυξη προηγμένων μοντέλων πρόβλεψης που υποστηρίζουν τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων σε επίπεδο πόλης.

4.4.4 Σύνδεση ψηφιακών τεχνολογιών με τις συσκευές μηδενικής ενέργειας

Οι ψηφιακές τεχνολογίες συνδέονται στενά με τις συσκευές μηδενικής ενέργειας, καθώς πολλές από αυτές λειτουργούν ως αισθητήρες ή συσκευές συλλογής δεδομένων χαμηλής κατανάλωσης. Σε πολλές περιπτώσεις, οι συσκευές αυτές αξιοποιούν τεχνικές συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον, όπως η ηλιακή ακτινοβολία ή οι μηχανικές δονήσεις, ώστε να λειτουργούν χωρίς εξωτερική παροχή ενέργειας [64]. Η ενσωμάτωση τέτοιων συσκευών σε δίκτυα IoT επιτρέπει την ανάπτυξη εκτεταμένων συστημάτων παρακολούθησης με ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις και μειωμένες ανάγκες συντήρησης. Με τον τρόπο αυτό, οι πόλεις μπορούν να αναπτύσσουν ολοένα και πιο πυκνά δίκτυα αισθητήρων, τα οποία παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη λειτουργία του αστικού περιβάλλοντος.

Επομένως, οι ψηφιακές τεχνολογίες διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη μετάβαση προς βιώσιμες πόλεις, καθώς επιτρέπουν τη συνεχή παρακολούθηση των αστικών συστημάτων, τη βελτιστοποίηση της χρήσης των πόρων και την ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών πολιτικών διαχείρισης ενέργειας και περιβάλλοντος. Μέσα από τη συνδυασμένη χρήση δικτύων IoT, αισθητήρων και συστημάτων ανάλυσης δεδομένων, οι πόλεις αποκτούν τα εργαλεία που απαιτούνται για την αντιμετώπιση των σύγχρονων περιβαλλοντικών και ενεργειακών προκλήσεων.

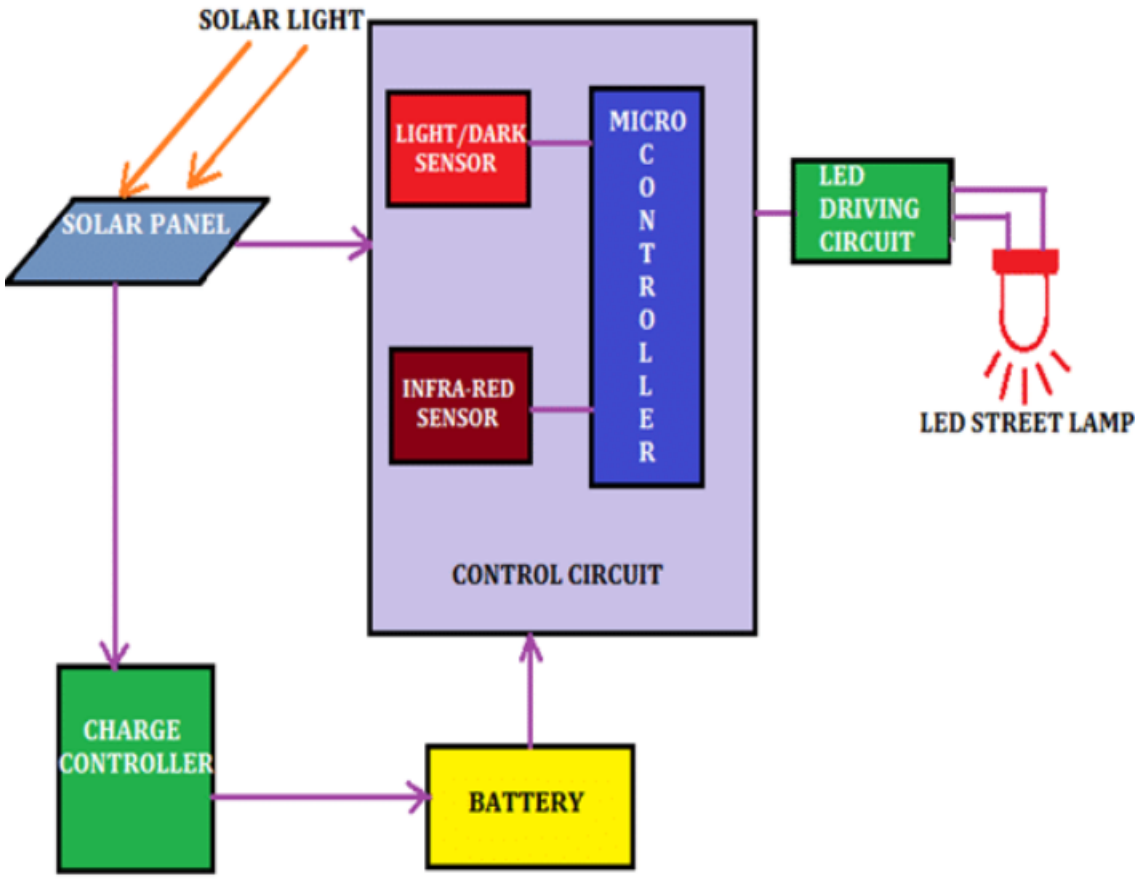
4.5 Ενεργειακά Αυτόνομες Αστικές Υποδομές

Οι ενεργειακά αυτόνομες αστικές υποδομές αποτελούν μία από τις πιο πρακτικές και άμεσα εφαρμόσιμες εκφράσεις της βιώσιμης και έξυπνης πόλης, καθώς μεταφέρουν την έννοια της ενεργειακής αποδοτικότητας από το επίπεδο του στρατηγικού σχεδιασμού στο επίπεδο της καθημερινής λειτουργίας του αστικού χώρου. Πρόκειται για υποδομές που μπορούν να καλύπτουν πλήρως ή σε μεγάλο βαθμό τις ενεργειακές τους ανάγκες μέσω τοπικής παραγωγής ενέργειας, συνήθως από ανανεώσιμες πηγές, σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης και ελέγχου [66]. Η σημασία τους είναι ιδιαίτερα μεγάλη στις σύγχρονες πόλεις, επειδή επιτρέπουν τη μείωση της εξάρτησης από το κεντρικό δίκτυο, τον περιορισμό των λειτουργικών δαπανών, την ευκολότερη εγκατάσταση εξοπλισμού σε σημεία όπου η καλωδίωση είναι δύσκολη ή δαπανηρή, καθώς και τη δημιουργία πιο ευέλικτων και ανθεκτικών δημοτικών υπηρεσιών.

Η λογική των ενεργειακά αυτόνομων αστικών υποδομών βασίζεται στη σύνδεση τριών βασικών στοιχείων: της τοπικής παραγωγής ενέργειας, της προσωρινής αποθήκευσης και της έξυπνης διαχείρισης κατανάλωσης. Η τοπική παραγωγή επιτυγχάνεται κυρίως μέσω μικρών φωτοβολταϊκών συστημάτων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να ενσωματώνονται και άλλες μορφές συλλογής ενέργειας, όπως μικρές ανεμογεννήτριες ή τεχνολογίες ανάκτησης ενέργειας από περιβαλλοντικές συνθήκες. Η αποθήκευση πραγματοποιείται συνήθως με μπαταρίες ή υπερπυκνωτές, ώστε η παραγόμενη ενέργεια να είναι διαθέσιμη όταν η ζήτηση δεν συμπίπτει χρονικά με την παραγωγή [66]. Η έξυπνη διαχείριση, τέλος, επιτρέπει στο σύστημα να ρυθμίζει τη λειτουργία του ανάλογα με τη διαθεσιμότητα ενέργειας, τις καιρικές συνθήκες, την ένταση της χρήσης και τις προτεραιότητες λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο, η υποδομή δεν είναι

απλώς ενεργειακά «ανεξάρτητη», αλλά και ικανή να λειτουργεί αποδοτικά μέσα σε ένα δυναμικό και μεταβαλλόμενο αστικό περιβάλλον.

Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελεί ο έξυπνος φωτισμός δρόμων. Ο δημόσιος φωτισμός είναι βασικό στοιχείο της αστικής λειτουργίας, καθώς σχετίζεται με την οδική ασφάλεια, την κοινωνική δραστηριότητα, την αίσθηση ασφάλειας των πολιτών και τη συνολική ποιότητα του δημόσιου χώρου. Ταυτόχρονα, όμως, αποτελεί και μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες κατανάλωσης ενέργειας για τους δήμους. Η μετάβαση από συμβατικά φωτιστικά σώματα σε φωτιστικά LED έχει ήδη μειώσει σημαντικά την ενεργειακή κατανάλωση, όμως η επόμενη φάση εξέλιξης αφορά την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πάνελ, τοπικών μπαταριών και συστημάτων έξυπνου ελέγχου πάνω στις ίδιες τις μονάδες φωτισμού [67]. Σε μια τέτοια διάταξη, κάθε ιστός φωτισμού ή μια ομάδα ιστών μπορεί να λειτουργεί μερικώς ή πλήρως αυτόνομα, αξιοποιώντας την ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας και αποδίδοντας αποθηκευμένη ενέργεια κατά τη διάρκεια της νύχτας.



Εικόνα 12: Παράδειγμα συστήματος έξυπνου φωτισμού δρόμων που λειτουργεί με φωτοβολταϊκά πάνελ, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και αισθητήρες για δυναμική ρύθμιση φωτεινότητας

(Πηγή: https://www.researchgate.net/publication/317231630_Power_Saving_Solar_Street_lights/figures?lo=1)

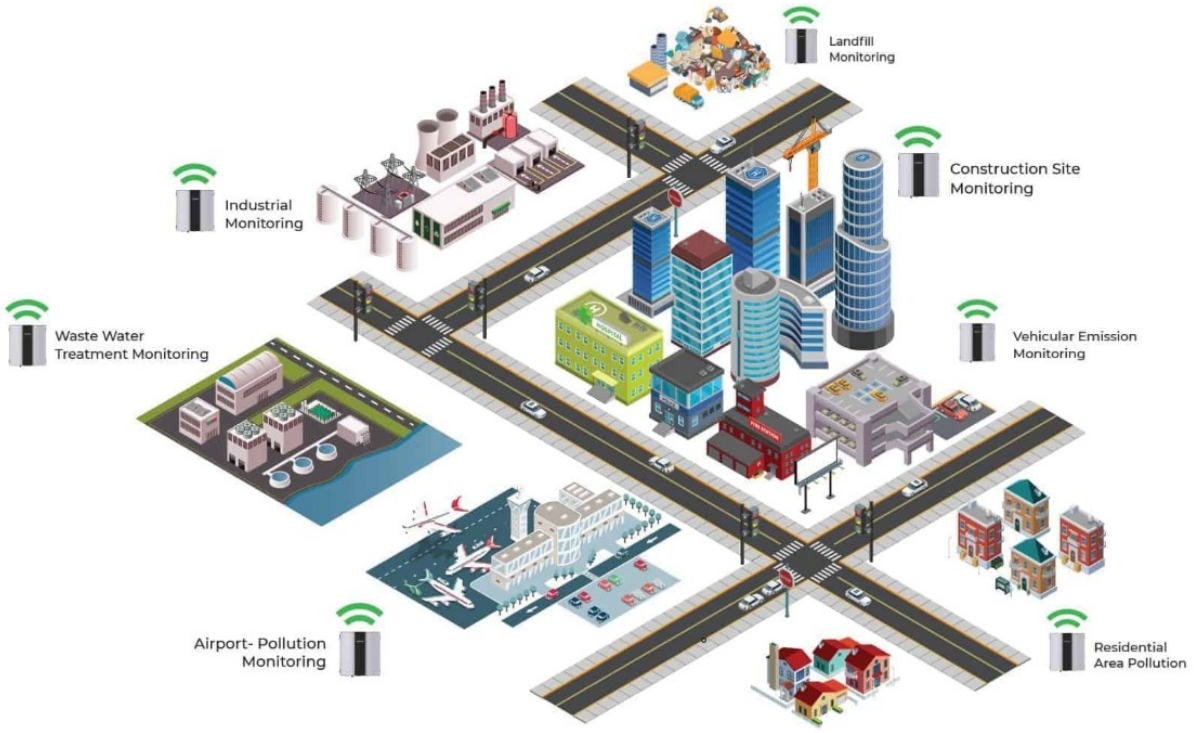
Η αξία αυτής της προσέγγισης δεν περιορίζεται στην απλή εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ενεργειακά αυτόνομες μονάδες φωτισμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε περιοχές όπου η ανάπτυξη υπόγειων καλωδιώσεων είναι τεχνικά δύσκολη, δαπανηρή ή χρονοβόρα, όπως σε πεζοδρόμους, πάρκα, προαστιακές ζώνες, ποδηλατοδρόμους ή νέες οικιστικές επεκτάσεις. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αισθητήρων κίνησης, αισθητήρων φωτεινότητας και μονάδων τηλεδιαχείρισης επιτρέπει τη δυναμική προσαρμογή της έντασης φωτισμού ανάλογα με την πραγματική χρήση του χώρου [67]. Για παράδειγμα, ένας δρόμος ή ένα πάρκο μπορεί να φωτίζεται σε χαμηλότερο επίπεδο όταν δεν υπάρχει παρουσία πεζών ή οχημάτων και να αυξάνει αυτόματα τη φωτεινότητα όταν ανιχνεύεται κίνηση. Αυτό μειώνει περαιτέρω την κατανάλωση, επιμηκύνει τη διάρκεια ζωής των συστημάτων αποθήκευσης και δημιουργεί ένα πιο αποδοτικό μοντέλο λειτουργίας.

Ταυτόχρονα, ο έξυπνος φωτισμός μπορεί να μετατραπεί σε πολυλειτουργική αστική υποδομή. Οι ιστοί φωτισμού μπορούν να φιλοξενούν αισθητήρες ποιότητας αέρα, κάμερες κυκλοφορίας, συστήματα επικοινωνίας, σημεία Wi-Fi ή ακόμη και φορτιστές για μικροσυσκευές και μικροκινητικότητα. Έτσι, ο φωτισμός δεν αποτελεί μόνο υπηρεσία ορατότητας, αλλά και κόμβο συλλογής δεδομένων και παροχής αστικών υπηρεσιών. Η προσθήκη αυτών των λειτουργιών συνδέει άμεσα τον έξυπνο φωτισμό με τον ευρύτερο ψηφιακό μετασχηματισμό της πόλης, μετατρέποντας μια παραδοσιακή δημοτική υποδομή σε ενεργειακά αποδοτική και πληροφοριακά ενεργή μονάδα.

Εικόνα 13: Έξυπνος ιστός φωτισμού που ενσωματώνει φωτισμό LED, αισθητήρες περιβάλλοντος και συστήματα επικοινωνίας για αστικές υπηρεσίες

(Πηγή: https://www.dsppatech.com/smart-light-pole-system-for-smart-cities.html)

Ένα δεύτερο σημαντικό παράδειγμα ενεργειακά αυτόνομης αστικής υποδομής είναι οι στάσεις λεωφορείων με ενσωματωμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η σύγχρονη στάση δεν αντιμετωπίζεται πλέον μόνο ως σημείο αναμονής επιβατών, αλλά ως μικρή πολυλειτουργική μονάδα δημόσιας εξυπηρέτησης. Μέσω της τοποθέτησης φωτοβολταϊκών επιφανειών στη στέγη ή σε παρακείμενες κατασκευές, η στάση μπορεί να παράγει μέρος ή το σύνολο της απαιτούμενης ενέργειας για φωτισμό, ηλεκτρονικές πινακίδες ενημέρωσης, συστήματα πληροφόρησης δρομολογίων σε πραγματικό χρόνο, σημεία φόρτισης κινητών συσκευών, αισθητήρες περιβάλλοντος ή ακόμη και μικρά συστήματα επιτήρησης. Η προσέγγιση αυτή βελτιώνει τη λειτουργικότητα της δημόσιας συγκοινωνίας, ενώ παράλληλα αναβαθμίζει τον δημόσιο χώρο με έναν τρόπο που είναι τεχνολογικά σύγχρονος και περιβαλλοντικά συμβατός.



Εικόνα 14: Δίκτυο αισθητήρων ποιότητας αέρα σε αστικό περιβάλλον για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με ατμοσφαιρικούς ρύπους και περιβαλλοντικές συνθήκες

(Πηγή: https://www.mdpi.com/journal/atmosphere/special_issues/Sensors_air_pollution)

Η ενεργειακή αυτονομία στις στάσεις λεωφορείων είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, επειδή οι υποδομές αυτές είναι διασπαρμένες σε όλο τον αστικό ιστό και συχνά βρίσκονται σε θέσεις όπου η παροχή ηλεκτρικής ισχύος από το κεντρικό δίκτυο θα απαιτούσε επιπλέον έργα εγκατάστασης και συντήρησης. Η χρήση Α.Π.Ε. και αποθήκευσης επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στον σχεδιασμό τους, ταχύτερη εγκατάσταση και μικρότερη εξάρτηση από τοπικές δικτυακές δυνατότητες. Επιπλέον, σε περιόδους διακοπών ή δυσλειτουργιών του δικτύου, μια ενεργειακά αυτόνομη στάση μπορεί να διατηρεί βασικές λειτουργίες, όπως φωτισμό ασφαλείας ή ενημέρωση των

πολιτών. Αυτό ενισχύει τη λειτουργική ανθεκτικότητα της πόλης και βελτιώνει την ποιότητα των δημοσίων υπηρεσιών.

Από κοινωνική άποψη, οι ενεργειακά αυτόνομες στάσεις έχουν και συμβολική αξία. Λειτουργούν ως ορατά παραδείγματα βιώσιμης τεχνολογίας σε καθημερινό περιβάλλον και φέρνουν την ενεργειακή μετάβαση πιο κοντά στην εμπειρία του πολίτη. Όταν οι χρήστες των μέσων μεταφοράς βλέπουν ότι μια στάση φωτίζεται, ενημερώνει και λειτουργεί με ενέργεια που παράγεται τοπικά, αντιλαμβάνονται πιο απτά τη δυνατότητα εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών στον αστικό χώρο. Με αυτή την έννοια, τέτοιες υποδομές δεν έχουν μόνο τεχνικό ρόλο αλλά και εκπαιδευτικό ή παραδειγματικό χαρακτήρα, καθώς δείχνουν έμπρακτα πώς η τεχνολογία μπορεί να βελτιώσει τις δημόσιες υπηρεσίες με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Εικόνα 15: Ενεργειακά αυτόνομη στάση λεωφορείου

(Πηγή: https://ec.europa.eu/regional_policy/en/projects/Poland/a-smart-solar-powered-bus-shelter-from-poland)

Ιδιαίτερη θέση ανάμεσα στις ενεργειακά αυτόνομες υποδομές κατέχουν και οι αισθητήρες ποιότητας αέρα. Η ποιότητα του αέρα αποτελεί κρίσιμο δείκτη βιωσιμότητας στις πόλεις, επειδή συνδέεται άμεσα με τη δημόσια υγεία, την ποιότητα ζωής και την περιβαλλοντική πολιτική. Η παραδοσιακή παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης βασιζόταν σε περιορισμένο αριθμό σταθερών σταθμών μέτρησης, οι οποίοι, αν και ακριβείς, είχαν υψηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και δεν επέτρεπαν πάντοτε μεγάλη χωρική πυκνότητα δεδομένων [67]. Αντίθετα, οι σύγχρονοι αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης, όταν συνδυάζονται με μικρής κλίμακας συστήματα

συλλογής ενέργειας ή με αποδοτικά συστήματα αποθήκευσης, επιτρέπουν την ανάπτυξη πολύ πιο εκτεταμένων δικτύων μέτρησης μέσα στον αστικό χώρο.

Η χρήση ενεργειακά αυτόνομων αισθητήρων ποιότητας αέρα δίνει τη δυνατότητα για πιο αναλυτική καταγραφή παραμέτρων όπως αιωρούμενα σωματίδια, διοξείδιο του αζώτου, όζον, διοξείδιο του άνθρακα, θερμοκρασία και υγρασία. Αυτοί οι αισθητήρες μπορούν να εγκαθίστανται σε ιστούς φωτισμού, στάσεις λεωφορείων, δημόσια κτίρια, σχολεία, περιοχές έντονης κυκλοφορίας ή βιομηχανικές ζώνες, δημιουργώντας ένα πυκνό και δυναμικό δίκτυο χωρικής παρακολούθησης. Τα δεδομένα που παράγονται δεν είναι χρήσιμα μόνο για την περιβαλλοντική αξιολόγηση, αλλά και για τη λήψη στοχευμένων αποφάσεων, όπως παρεμβάσεις στην κυκλοφορία, αναθεώρηση διαδρομών δημοσίων μεταφορών, ενημέρωση ευάλωτων κοινωνικών ομάδων ή σχεδιασμό πράσινων αστικών παρεμβάσεων.

Η ενεργειακή αυτονομία των αισθητήρων είναι κρίσιμο στοιχείο, επειδή μειώνει το λειτουργικό βάρος της μακροχρόνιας συντήρησης. Ένα από τα βασικά προβλήματα στα μεγάλα αστικά δίκτυα αισθητήρων είναι ότι η ανάγκη συχνής αντικατάστασης μπαταριών ή η εξάρτηση από σταθερή καλωδιωμένη τροφοδοσία αυξάνει σημαντικά το κόστος λειτουργίας. Αντίθετα, όταν οι αισθητήρες σχεδιάζονται έτσι ώστε να καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια και να συμπληρώνουν ή να ανακτούν την απαιτούμενη ισχύ από το περιβάλλον, μπορούν να λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα με περιορισμένες παρεμβάσεις. Αυτό επιτρέπει στους δήμους να επεκτείνουν τα δίκτυα παρακολούθησης χωρίς ανάλογη αύξηση του κόστους διαχείρισης και συντήρησης.

Πέρα από τα μεμονωμένα παραδείγματα, η πραγματική σημασία των ενεργειακά αυτόνομων αστικών υποδομών βρίσκεται στη δυνατότητα διασύνδεσής τους σε ένα κοινό οικοσύστημα. Όταν ο έξυπνος φωτισμός, οι στάσεις λεωφορείων με Α.Π.Ε., οι αισθητήρες ποιότητας αέρα και άλλες υποδομές επικοινωνούν μεταξύ τους και μεταδίδουν δεδομένα σε κεντρικές πλατφόρμες διαχείρισης, η πόλη αποκτά τη δυνατότητα να παρακολουθεί και να βελτιστοποιεί τη λειτουργία της πιο ολιστικά. Το ενεργειακό ζήτημα, η κινητικότητα, το περιβάλλον και οι δημοτικές υπηρεσίες παύουν να αντιμετωπίζονται ως απομονωμένοι τομείς και γίνονται μέρη ενός διασυνδεδεμένου συστήματος. Σε αυτό το πλαίσιο, η ενεργειακή αυτονομία δεν είναι μόνο θέμα τροφοδοσίας, αλλά και μέρος μιας συνολικότερης λογικής αποκέντρωσης, ψηφιοποίησης και λειτουργικής ευφυΐας.

Η ενσωμάτωση αυτών των υποδομών στις βιώσιμες πόλεις προσφέρει επίσης σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα. Η μείωση της κατανάλωσης από το δίκτυο, ο περιορισμός της ανάγκης για εκτεταμένες καλωδιώσεις, η μικρότερη συχνότητα συντήρησης και η δυνατότητα προληπτικής διαχείρισης βλαβών μειώνουν τις δαπάνες κύκλου ζωής [66]. Παράλληλα, η μεγαλύτερη χρήση τοπικά παραγόμενης καθαρής ενέργειας συμβάλλει στη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και στη βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης των δήμων. Η προσέγγιση αυτή αποκτά ακόμη μεγαλύτερη αξία όταν οι υποδομές αυτές αναπτύσσονται συστηματικά και όχι αποσπασματικά, δηλαδή όταν εντάσσονται σε μια συνολική στρατηγική αστικής βιωσιμότητας.

Βέβαια, η εφαρμογή ενεργειακά αυτόνομων αστικών υποδομών δεν είναι χωρίς δυσκολίες. Η απόδοσή τους εξαρτάται από το τοπικό ηλιακό δυναμικό, τις σκιάσεις, τις καιρικές συνθήκες, την ποιότητα του εξοπλισμού και τη σωστή διαστασιολόγηση των συστημάτων αποθήκευσης. Επίσης, η ανάγκη για ανθεκτικότητα απέναντι σε βανδαλισμούς, ρύπανση, υγρασία και μηχανικές καταπονήσεις είναι σημαντική, καθώς οι υποδομές αυτές λειτουργούν σε ανοιχτό δημόσιο χώρο. Σε επίπεδο σχεδιασμού, απαιτείται προσεκτική επιλογή μεταξύ κόστους, λειτουργιών και επιθυμητού βαθμού αυτονομίας, ώστε η επένδυση να είναι τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά λογική. Παρόλα αυτά, η συνεχής βελτίωση των φωτοβολταϊκών, των μπαταριών, των αισθητήρων και των συστημάτων ελέγχου καθιστά αυτές τις εφαρμογές ολοένα και πιο ρεαλιστικές και ελκυστικές για τις πόλεις.

Συνοψίζοντας, οι ενεργειακά αυτόνομες αστικές υποδομές αποτελούν έναν από τους πιο ουσιαστικούς τρόπους με τους οποίους η βιωσιμότητα μετατρέπεται σε χειροπιαστή αστική πρακτική. Ο έξυπνος φωτισμός δρόμων, οι στάσεις λεωφορείων με αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και οι αισθητήρες ποιότητας αέρα δείχνουν ότι η τοπική παραγωγή, η αποθήκευση, η χαμηλή κατανάλωση και η ψηφιακή διαχείριση μπορούν να συνδυαστούν σε λειτουργικά συστήματα με άμεσο όφελος για τον πολίτη και τον δήμο. Μέσα από τέτοιες υποδομές, οι πόλεις αποκτούν μεγαλύτερη ενεργειακή ευελιξία, καλύτερη περιβαλλοντική επίγνωση και ισχυρότερη δυνατότητα παροχής ποιοτικών υπηρεσιών με χαμηλότερο ενεργειακό και οικονομικό κόστος.

5

ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

5.1 Ανάλυση Κόστους και Οφέλους

Η οικονομική αξιολόγηση συσκευών μηδενικής ενέργειας βασίζεται στη σύγκριση του συνολικού κόστους κύκλου ζωής με τα αναμενόμενα άμεσα και έμμεσα οφέλη. Σε αντίθεση με συμβατικές ενεργειακές ή ψηφιακές εγκαταστάσεις, οι συσκευές αυτές χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση και μειωμένες ανάγκες τροφοδοσίας, γεγονός που μεταβάλλει τη δομή του κόστους. Η ανάλυση δεν περιορίζεται στην αρχική επένδυση, αλλά περιλαμβάνει δαπάνες εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης, αντικατάστασης εξαρτημάτων και τελικής απόσυρσης.

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης εξαρτάται από την κλίμακα του έργου, το είδος της τεχνολογίας συλλογής ενέργειας και τον βαθμό ενσωμάτωσης σε υφιστάμενες υποδομές. Για μικρής κλίμακας εφαρμογές (π.χ. αισθητήρες περιβάλλοντος με φωτοβολταϊκή τροφοδοσία και υπερπυκνωτές), το κόστος περιλαμβάνει τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό, το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης, τα μέσα επικοινωνίας και τις εργασίες τοποθέτησης [53]. Σε μεγαλύτερες δημοτικές εγκαταστάσεις, προστίθενται δαπάνες σχεδιασμού, δικτύωσης και διασύνδεσης με κεντρικές πλατφόρμες δεδομένων.

Η συντήρηση παρουσιάζει διαφοροποίηση σε σχέση με συμβατικές συσκευές που βασίζονται αποκλειστικά σε μπαταρίες. Η απουσία τακτικής αντικατάστασης μπαταριών μειώνει σημαντικά τις επαναλαμβανόμενες δαπάνες, ιδίως σε περιπτώσεις όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη ή απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό. Παρ’ όλα αυτά, παραμένουν ανάγκες για περιοδικό έλεγχο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, καθαρισμό επιφανειών φωτοβολταϊκών στοιχείων και επικαιροποίηση λογισμικού. Σε μεγάλης κλίμακας αστικά δίκτυα, η διαχείριση συντήρησης οργανώνεται μέσω συστημάτων απομακρυσμένης διάγνωσης, μειώνοντας το λειτουργικό κόστος μετακινήσεων και τεχνικών παρεμβάσεων [53].

Ενδεικτικά, η δομή κόστους μπορεί να αποτυπωθεί ως εξής:

Κατηγορία Δαπάνης	Περιγραφή	Συχνότητα
Προμήθεια εξοπλισμού	Αισθητήρες, μονάδες συλλογής ενέργειας, αποθήκευση	Εφάπαξ
Εγκατάσταση	Τοποθέτηση, διασύνδεση, αρχική ρύθμιση	Εφάπαξ
Λειτουργία	Κατανάλωση βοηθητικής ισχύος, διαχείριση δεδομένων	Συνεχής
Συντήρηση	Έλεγχος, καθαρισμός, αντικατάσταση εξαρτημάτων	Περιοδική
Απόσυρση/Ανακύκλωση	Διαχείριση εξοπλισμού στο τέλος ζωής	Τελική

Πίνακας 4: Αποτύπωση δομής κόστους

Σε συγκριτικό επίπεδο, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (Total Cost of Ownership – TCO) για ενεργειακά αυτόνομες συσκευές τείνει να μειώνεται σε βάθος χρόνου, ιδίως όταν αποφεύγονται εκτεταμένες καλωδιώσεις ή επαναλαμβανόμενες αντικαταστάσεις μπαταριών.

Τα οικονομικά οφέλη προκύπτουν από τη μείωση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, τον περιορισμό δαπανών συντήρησης και τη βελτιστοποίηση διαχείρισης πόρων μέσω συλλογής δεδομένων. Η εξοικονόμηση ενέργειας δεν αφορά μόνο τη λειτουργία των ίδιων των συσκευών, αλλά και τη δυνατότητα καλύτερης ρύθμισης δημοτικών συστημάτων, όπως φωτισμός ή θέρμανση κτιρίων, βάσει πραγματικών μετρήσεων.

Σε μακροχρόνιο ορίζοντα, η ανάλυση κόστους–οφέλους περιλαμβάνει δείκτες όπως:

- Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value – NPV)
- Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR)
- Περίοδος Απόσβεσης (Payback Period)

Η περίοδος απόσβεσης εξαρτάται από την αρχική επένδυση και το ύψος των ετήσιων εξοικονομήσεων. Σε δημοτικά έργα που αντικαθιστούν ενεργοβόρες υποδομές ή μειώνουν επεμβάσεις συντήρησης, η απόσβεση μπορεί να επιτευχθεί σε μερικά έτη, ιδίως όταν συνδυάζεται με επιδοτήσεις ή φορολογικά κίνητρα.

Κρατικά και ευρωπαϊκά προγράμματα χρηματοδότησης λειτουργούν ως μοχλός επιτάχυνσης επενδύσεων, καλύπτοντας μέρος του αρχικού κόστους. Τα κίνητρα αυτά περιλαμβάνουν επιχορηγήσεις, χαμηλότοκα δάνεια και σχήματα ενεργειακής απόδοσης όπου η εξοικονόμηση ενέργειας χρηματοδοτεί την επένδυση. Η αξιολόγηση οφέλους λαμβάνει επίσης υπόψη έμμεσες επιδράσεις, όπως η μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η βελτίωση ποιότητας ζωής, οι οποίες μπορούν να αποτιμηθούν οικονομικά μέσω κοινωνικού κόστους άνθρακα.

Επομένως, η οικονομική βιωσιμότητα συσκευών μηδενικής ενέργειας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη χαμηλή κατανάλωση, αλλά από τη συστημική τους ένταξη σε μηχανισμούς διαχείρισης πόρων και σε στρατηγικές ενεργειακής μετάβασης. Όταν η αξιολόγηση πραγματοποιείται με προσέγγιση κύκλου ζωής και ενσωματώνει τόσο άμεσα όσο και έμμεσα οφέλη, οι επενδύσεις σε τέτοιες τεχνολογίες εμφανίζουν θετικό ισοζύγιο σε μεσο-μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

5.2 Οικονομικές Στρατηγικές για Βιώσιμες Πόλεις

Η οικονομική διάσταση της μετάβασης σε βιώσιμες πόλεις συμβάλλει σημαντικά στην επιτυχή υλοποίηση τεχνολογιών μηδενικής ενέργειας και ευρύτερα ενεργειακά αυτόνομων υποδομών. Η τεχνολογική ωριμότητα από μόνη της δεν επαρκεί, εάν δεν συνοδεύεται από βιώσιμα χρηματοδοτικά σχήματα, μηχανισμούς διαχείρισης κινδύνου και στρατηγικό σχεδιασμό επενδύσεων σε βάθος χρόνου. Οι δημοτικές αρχές καλούνται να διαμορφώσουν πολυεπίπεδες στρατηγικές χρηματοδότησης που συνδυάζουν δημόσιους και ιδιωτικούς πόρους, αξιοποιώντας τόσο παραδοσιακά όσο και καινοτόμα χρηματοοικονομικά εργαλεία.

Η χρηματοδότηση έργων που βασίζονται σε συσκευές μηδενικής ενέργειας προϋποθέτει συνδυασμό ιδίων κεφαλαίων, εθνικών και ευρωπαϊκών προγραμμάτων, ιδιωτικών επενδύσεων και μηχανισμών συμπράξεων. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, πρωτοβουλίες όπως το Horizon Europe και το European Regional Development Fund προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες επιχορηγήσεων για έργα καινοτομίας, ψηφιακού μετασχηματισμού και ενεργειακής αποδοτικότητας. Η αξιοποίηση τέτοιων χρηματοδοτικών εργαλείων επιτρέπει την κάλυψη μέρους του αρχικού επενδυτικού κόστους, μειώνοντας το δημοσιονομικό βάρος για τους δήμους και ενισχύοντας τη δυνατότητα υλοποίησης πιλοτικών ή ευρείας κλίμακας έργων.

Επίσης, η έκδοση πράσινων ομολόγων αποτελεί ένα δυναμικά αναπτυσσόμενο εργαλείο άντλησης κεφαλαίων για βιώσιμες αστικές επενδύσεις [54]. Τα πράσινα ομόλογα προσελκύουν επενδυτές που επιδιώκουν περιβαλλοντικά και κοινωνικά υπεύθυνες τοποθετήσεις, υπό την προϋπόθεση ότι τα έργα συνοδεύονται από σαφείς δείκτες απόδοσης και αξιόπιστους μηχανισμούς παρακολούθησης. Η ύπαρξη μετρήσιμων περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων (όπως μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ή εξοικονόμηση ενέργειας) ενισχύει τη διαφάνεια και μειώνει το επενδυτικό ρίσκο.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν επίσης οι Συμβάσεις Ενεργειακής Απόδοσης (Energy Performance Contracts), μέσω των οποίων μέρος του τεχνικού και οικονομικού κινδύνου μεταφέρεται σε ιδιωτικούς φορείς. Στο πλαίσιο αυτό, ο ιδιωτικός εταίρος αναλαμβάνει τη χρηματοδότηση και την υλοποίηση της επένδυσης, αποπληρούμενος από την εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια της σύμβασης. Η οικονομική βιωσιμότητα των έργων τεκμηριώνεται μέσω αναλύσεων καθαρής παρούσας αξίας (NPV - Net Present Value), εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR - Internal Rate of Return) και περιόδου απόσβεσης, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις άμεσες ενεργειακές εξοικονομήσεις αλλά και τη μείωση λειτουργικών δαπανών, όπως το κόστος συντήρησης, αντικατάστασης μπαταριών ή τεχνικής υποστήριξης.

Ωστόσο, η μείωση του κόστους εφαρμογής δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη διαθεσιμότητα χρηματοδότησης. Καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει ο τρόπος σχεδιασμού και υλοποίησης των έργων. Η προσέγγιση κόστους κύκλου ζωής (Life Cycle Costing) επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογικών λύσεων με βάση το συνολικό οικονομικό τους αποτύπωμα σε βάθος χρόνου. Μία λύση με υψηλότερο αρχικό κόστος αλλά χαμηλότερες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης μπορεί να αποδειχθεί οικονομικά αποδοτικότερη σε ορίζοντα 15 ή 20 ετών.

Η τυποποίηση εξοπλισμού και η χρήση ανοικτών τεχνολογικών προτύπων μειώνουν το κόστος προμήθειας και συντήρησης, περιορίζοντας τον κίνδυνο εξάρτησης από έναν μόνο προμηθευτή. Η αποφυγή «κλειστών» συστημάτων διευκολύνει τη μελλοντική αναβάθμιση και διασφαλίζει μεγαλύτερο ανταγωνισμό στην αγορά, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση τιμών [55].

Παράλληλα, η ενσωμάτωση συσκευών μηδενικής ενέργειας σε υφιστάμενες υποδομές (όπως ιστοί οδοφωτισμού, στάσεις μέσων μαζικής μεταφοράς, δημοτικά κτίρια ή τεχνικά έργα) περιορίζει σημαντικά τις δαπάνες πολιτικού μηχανικού και καλωδιώσεων.

Η σταδιακή υλοποίηση μέσω πιλοτικών έργων αποτελεί επίσης κρίσιμη στρατηγική. Μέσω περιορισμένης κλίμακας εφαρμογών, οι δήμοι μπορούν να αξιολογήσουν τεχνικές επιδόσεις, πραγματικές εξοικονομήσεις και κοινωνική αποδοχή πριν προχωρήσουν σε γενικευμένη ανάπτυξη. Η πιλοτική φάση λειτουργεί ως μηχανισμός μάθησης, μειώνοντας τον επενδυτικό κίνδυνο και επιτρέποντας προσαρμογές στον σχεδιασμό.

Επιπλέον, η ανάπτυξη εσωτερικής τεχνογνωσίας εντός των δημοτικών διοικήσεων έχει σημαντικές οικονομικές προεκτάσεις. Η δημιουργία διεπιστημονικών ομάδων έργου με συμμετοχή μηχανικών, οικονομολόγων, ειδικών πληροφορικής και στελεχών διοίκησης ενισχύει την ικανότητα παρακολούθησης και ελέγχου κόστους, περιορίζοντας την ανάγκη για εξωτερικούς συμβούλους. Η ενίσχυση διοικητικής επάρκειας συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της απορροφητικότητας ευρωπαϊκών κονδυλίων και στη διαπραγματευτική ισχύ έναντι ιδιωτικών επενδυτών.

Σε μακροοικονομικό επίπεδο, οι επενδύσεις σε τεχνολογίες μηδενικής ενέργειας μπορούν να λειτουργήσουν ως μοχλός τοπικής ανάπτυξης. Η δημιουργία νέων αγορών, η ενίσχυση της καινοτομίας και η προσέλκυση εξειδικευμένων επιχειρήσεων στον τομέα των «έξυπνων» υποδομών δημιουργούν δευτερογενή οικονομικά οφέλη, τα οποία υπερβαίνουν το άμεσο ενεργειακό αποτέλεσμα. Παράλληλα, η μείωση λειτουργικών δαπανών σε βάθος χρόνου απελευθερώνει πόρους που μπορούν να κατευθυνθούν σε κοινωνικές ή αναπτυξιακές πολιτικές.

Επομένως, η οικονομικά βιώσιμη μετάβαση σε ενεργειακά αυτόνομες και ψηφιακά υποστηριζόμενες υποδομές απαιτεί στρατηγική προσέγγιση, πολυεπίπεδη χρηματοδότηση και συστηματική αξιολόγηση κόστους–οφέλους. Οι πόλεις που υιοθετούν ολοκληρωμένες οικονομικές στρατηγικές δεν επιδιώκουν μόνο τη βραχυπρόθεσμη εξισορρόπηση προϋπολογισμών, αλλά διαμορφώνουν ένα ανθεκτικό οικονομικό υπόβαθρο που στηρίζει τη μακροχρόνια περιβαλλοντική και κοινωνική βιωσιμότητα.

5.3 Περιβαλλοντική Αξιολόγηση

Η περιβαλλοντική αποτίμηση των συσκευών μηδενικής ενέργειας και των συναφών ενεργειακά αυτόνομων τεχνολογιών απαιτεί μια πολυδιάστατη και αναλυτική προσέγγιση, η οποία υπερβαίνει τη στενή εξέταση της κατανάλωσης κατά τη φάση λειτουργίας. Η ουσιαστική αξιολόγηση βασίζεται στην κατανόηση όλων των σταδίων του κύκλου ζωής ενός συστήματος: από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, την παραγωγή των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και τη συναρμολόγηση, έως τη μεταφορά, την εγκατάσταση, τη χρήση, τη συντήρηση και τελικά την απόσυρση ή επαναξιοποίηση [10]. Μόνο μέσω μιας τέτοιας ολιστικής θεώρησης μπορεί να αποτυπωθεί με ακρίβεια το καθαρό περιβαλλοντικό ισοζύγιο και να διασφαλιστεί ότι τα οφέλη σε ένα στάδιο δεν αντισταθμίζονται από επιβαρύνσεις σε κάποιο άλλο.

Κατά τη φάση παραγωγής, οι συσκευές χαμηλής κατανάλωσης απαιτούν τη χρήση μετάλλων, ημιαγωγών, πλαστικών και συχνά σπάνιων γαιών για την κατασκευή μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων, αισθητήρων και μονάδων συλλογής ενέργειας. Οι διαδικασίες εξόρυξης και

επεξεργασίας αυτών των υλικών ενδέχεται να συνεπάγονται ενεργειακή κατανάλωση, εκπομπές ρύπων και τοπικές περιβαλλοντικές πιέσεις. Επομένως, η αξιολόγηση δεν μπορεί να αγνοεί την «ενσωματωμένη ενέργεια» (embodied energy) που απαιτείται για την παραγωγή [54]. Παρ' όλα αυτά, η συγκριτική ανάλυση με συμβατικές λύσεις συχνά καταδεικνύει ότι, παρά το αρχικό αποτύπωμα, οι αυτόνομες τεχνολογίες υπερέχουν σε βάθος χρόνου λόγω της δραστικά μειωμένης κατανάλωσης κατά τη χρήση.

Η εφαρμογή μεθοδολογιών όπως η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) επιτρέπει την ποσοτική αποτίμηση όλων αυτών των παραμέτρων. Η LCA λαμβάνει υπόψη τις εισροές ενέργειας και υλικών, καθώς και τις εκροές ρύπων και αποβλήτων, σε κάθε στάδιο. Μέσω αυτής της διαδικασίας υπολογίζεται το συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα, αλλά και άλλοι δείκτες, όπως η οξίνιση, η ευτροφισμός ή η τοξικότητα [55]. Η σύγκριση σεναρίων (για παράδειγμα, μεταξύ ενός συμβατικού δικτύου αισθητήρων με τακτική αντικατάσταση μπαταριών και ενός αυτόνομου δικτύου που αξιοποιεί ηλιακή ή άλλη περιβαλλοντική ενέργεια) αναδεικνύει συχνά σημαντική μείωση εκπομπών και αποβλήτων στη δεύτερη περίπτωση.

Κατά τη λειτουργική φάση, τα πλεονεκτήματα καθίστανται ακόμη πιο εμφανή. Οι συσκευές μηδενικής ενέργειας δεν απαιτούν συνεχή τροφοδότηση από το ηλεκτρικό δίκτυο, μειώνοντας την έμμεση εξάρτηση από σταθμούς παραγωγής που ενδέχεται να βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Η αξιοποίηση τοπικά διαθέσιμης ενέργειας (όπως η ηλιακή ακτινοβολία ή οι μηχανικές δονήσεις) περιορίζει τη ζήτηση από κεντρικές υποδομές [56]. Σε μεγάλη κλίμακα, η αντικατάσταση χιλιάδων ενεργοβόρων μονάδων με αυτόνομες εκδοχές μπορεί να οδηγήσει σε αισθητή μείωση της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μιας πόλης.

Ένα επιπλέον όφελος αφορά τη μείωση της χρήσης αναλώσιμων στοιχείων, ιδίως μπαταριών. Η παραγωγή και διάθεση μπαταριών συνεπάγεται περιβαλλοντικές πιέσεις λόγω εξόρυξης λιθίου, κοβαλτίου και άλλων υλικών, καθώς και ζητήματα ασφαλούς διαχείρισης στο τέλος ζωής. Όταν οι αυτόνομες μονάδες σχεδιάζονται με υπερπυκνωτές ή με ελάχιστες απαιτήσεις αποθήκευσης, περιορίζεται η ανάγκη συχνής αντικατάστασης, μειώνοντας τον όγκο επικίνδυνων αποβλήτων. Η μείωση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία σε εκτεταμένα αστικά δίκτυα, όπου η κλίμακα εγκατάστασης είναι μεγάλη.

Επιπροσθέτως, η συμβολή τους δεν περιορίζεται στη δική τους ενεργειακή συμπεριφορά. Μέσω της συνεχούς συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, διευκολύνεται η αποδοτικότερη διαχείριση ευρύτερων αστικών συστημάτων. Η προσαρμοστική ρύθμιση φωτισμού, η βελτιστοποίηση λειτουργίας κτιρίων, η αποσυμφόρηση κυκλοφορίας και η έγκαιρη ανίχνευση διαρροών ή βλαβών συμβάλλουν σε συστημική εξοικονόμηση πόρων. Έτσι, οι έμμεσες περιβαλλοντικές ωφέλειες μπορούν να υπερβαίνουν το άμεσο όφελος της ίδιας της συσκευής.

Σημαντική διάσταση της αξιολόγησης αφορά τη διατήρηση φυσικών πόρων. Η υποκατάσταση συμβατικών ενεργειακών πηγών από ανανεώσιμες μειώνει τη ζήτηση για εξορύξεις και μεταφορές καυσίμων, περιορίζοντας παράλληλα τις εκπομπές που συνδέονται με αυτές τις δραστηριότητες. Επιπλέον, η αύξηση της διάρκειας ζωής των συστημάτων μέσω ανθεκτικού σχεδιασμού και δυνατότητας αναβάθμισης λογισμικού συμβάλλει στη μείωση κατανάλωσης πρώτων υλών. Ο οικολογικός σχεδιασμός (eco-design) που επιτρέπει αποσυναρμολόγηση και ανάκτηση εξαρτημάτων ενισχύει τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Ωστόσο, η μαζική ανάπτυξη τέτοιων τεχνολογιών δημιουργεί και νέες απαιτήσεις. Η αύξηση του αριθμού ηλεκτρονικών συσκευών στο αστικό περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερο όγκο ηλεκτρονικών αποβλήτων εάν δεν εφαρμοστούν συστήματα συλλογής και ανακύκλωσης [57]. Η πρόβλεψη για ανάκτηση πολύτιμων μετάλλων και η ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών στην παραγωγή αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για τη διατήρηση θετικού περιβαλλοντικού ισοζυγίου.

Σε ευρύτερο οικολογικό επίπεδο, η μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου συνδέεται με τη συμβολή στην αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Παράλληλα, ο περιορισμός ατμοσφαιρικών ρύπων βελτιώνει τις συνθήκες διαβίωσης στα αστικά κέντρα. Η έγκαιρη παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων επιτρέπει στοχευμένες παρεμβάσεις, όπως προσωρινούς περιορισμούς κυκλοφορίας ή βελτιστοποίηση συστημάτων θέρμανσης. Οι βελτιώσεις στην ποιότητα αέρα σχετίζονται με χαμηλότερη συχνότητα αναπνευστικών και καρδιαγγειακών προβλημάτων, μειώνοντας το κοινωνικό κόστος υγειονομικής περίθαλψης και αυξάνοντας τη συνολική ευημερία.

Επιπρόσθετα, η ενίσχυση ενεργειακής αποδοτικότητας και η αποκέντρωση παραγωγής συμβάλλουν στην προσαρμοστικότητα των πόλεων απέναντι σε ακραία φαινόμενα. Η μείωση θερμικών φορτίων μέσω έξυπνης διαχείρισης και ο περιορισμός σπατάλης ενέργειας μπορούν να μετριάσουν το φαινόμενο της αστικής θερμικής νησίδας. Η ύπαρξη αυτόνομων συστημάτων που συνεχίζουν να λειτουργούν ακόμη και σε περιόδους διακοπών παροχής ενισχύει την επιχειρησιακή συνέχεια κρίσιμων υπηρεσιών.

Συνοψίζοντας, η συνολική περιβαλλοντική επίδραση των συσκευών μηδενικής ενέργειας κρίνεται θετική όταν εξετάζεται σε πλήρη χρονικό και λειτουργικό ορίζοντα. Τα οφέλη εκτείνονται πέρα από τη μείωση εκπομπών κατά τη χρήση και περιλαμβάνουν τη διατήρηση πόρων, τη βελτίωση δημόσιας υγείας, την ενίσχυση ανθεκτικότητας και τη στήριξη της μετάβασης σε ένα πιο βιώσιμο αστικό πρότυπο. Μέσα από συνδυασμό τεχνολογικής βελτίωσης, υπεύθυνης διαχείρισης υλικών και στρατηγικού σχεδιασμού, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να αποτελέσουν θεμέλιο για ένα αστικό περιβάλλον με μικρότερο οικολογικό αποτύπωμα και μεγαλύτερη μακροπρόθεσμη σταθερότητα

6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Σύνοψη Ευρημάτων

6.1.1 Εννοιολογική και τεχνολογική αποτίμηση των συσκευών μηδενικής ενέργειας

Η παρούσα εργασία διερεύνησε τις συσκευές μηδενικής ενέργειας ως τεχνολογικό και λειτουργικό εργαλείο που μπορεί να υποστηρίξει τη μετάβαση των πόλεων σε πιο αποδοτικά, χαμηλών εκπομπών και δεδομενοκεντρικά μοντέλα διαχείρισης. Η βιβλιογραφική ανάλυση ανέδειξε ότι ο όρος «μηδενικής ενέργειας» δεν χρησιμοποιείται πάντοτε με έναν ενιαίο, αυστηρό τρόπο· στη διεθνή πρακτική εμφανίζονται δύο κύριες κλίμακες εφαρμογής. Η πρώτη αφορά συσκευές πολύ χαμηλής κατανάλωσης (αισθητήρες, κόμβοι IoT, συστήματα μέτρησης) που επιδιώκουν ενεργειακή ουδετερότητα μέσω συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον και κατάλληλης διαχείρισης ισχύος, ώστε να λειτουργούν χωρίς συνεχή εξωτερική τροφοδοσία ή συχνή αντικατάσταση μπαταριών. Η δεύτερη κλίμακα αφορά υποδομές ή συστήματα (όπως φωτισμός, στάσεις, μικρο-εγκαταστάσεις) όπου η τοπική παραγωγή από Α.Π.Ε. και η αποθήκευση οδηγούν σε λειτουργία με ελάχιστη ή μηδενική καθαρή κατανάλωση από το δίκτυο. Η χαρτογράφηση αυτών των δύο προσεγγίσεων έδειξε ότι, παρότι διαφέρουν ως προς την ισχύ και τα τεχνικά μεγέθη, συγκλίνουν ως προς τον στόχο: μείωση ενεργειακής εξάρτησης, περιορισμό λειτουργικών δαπανών και αύξηση της δυνατότητας κλιμάκωσης αστικών εφαρμογών με μειωμένο περιβαλλοντικό κόστος.

Ως προς τις τεχνολογίες, η συγκριτική αξιολόγηση φωτοβολταϊκών, αιολικών, γεωθερμίας και αποθήκευσης ανέδειξε ότι η καταλληλότητα κάθε επιλογής καθορίζεται από το προφίλ ζήτησης, τα τοπικά κλιματικά/γεωγραφικά χαρακτηριστικά και τους χωρικούς περιορισμούς του αστικού περιβάλλοντος. Τα φωτοβολταϊκά εμφανίζουν υψηλή προσαρμοστικότητα σε κτιριακές επιφάνειες και δημοτικό εξοπλισμό, όμως η παραγωγή τους είναι χρονικά μεταβλητή και επηρεάζεται από σκιάσεις, ρύπανση και θερμική επιβάρυνση. Η αιολική ενέργεια έχει δυναμικό σε περιοχές με επαρκή ροή αέρα, αλλά σε πυκνοδομημένα κέντρα η αναταραγμένη ροή και τα ζητήματα χωροθέτησης περιορίζουν την προβλεψιμότητα της απόδοσης, οδηγώντας συχνά σε

εφαρμογές μικρής κλίμακας ή σε περιφερειακές εγκαταστάσεις. Η γεωθερμία, κυρίως μέσω αντλιών θερμότητας, προσφέρει σταθερό θερμικό υπόβαθρο και υψηλή απόδοση για θέρμανση/ψύξη κτιρίων, όμως η εφαρμογή της απαιτεί γεωτεχνική τεκμηρίωση, διαθέσιμο υπόγειο χώρο και υψηλότερο αρχικό κόστος. Η αποθήκευση ενέργειας αναδείχθηκε ως συνδετικός μηχανισμός ανάμεσα στη μεταβλητή παραγωγή Α.Π.Ε. και στις ανάγκες σταθερής λειτουργίας, με τεχνολογίες όπως μπαταρίες ιόντων λιθίου να καλύπτουν ευρύ φάσμα εφαρμογών και υπερπυκνωτές να είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για συστήματα μικρής ισχύος με συχνές διακυμάνσεις φόρτισης–εκφόρτισης.

6.1.2 Εφαρμογή στις βιώσιμες πόλεις και οικονομικο-περιβαλλοντική διάσταση

Σε επίπεδο εφαρμογής σε βιώσιμες πόλεις, η εργασία ανέδειξε ότι η τεχνολογική δυνατότητα δεν αρκεί από μόνη της για επιτυχημένη υλοποίηση. Η διεθνής εμπειρία δείχνει ότι απαιτείται οργανωμένος στρατηγικός σχεδιασμός, σαφείς διαδικασίες αδειοδότησης, τεχνική τυποποίηση και οικονομική τεκμηρίωση που βασίζεται σε κόστος κύκλου ζωής. Οι μελέτες περίπτωσης ευρωπαϊκών πόλεων κατέδειξαν πως οι πιο σταθερές παρεμβάσεις στηρίζονται σε συνδυασμό ενεργειακής πολιτικής (αποδοτικότητα κτιρίων, διείσδυση Α.Π.Ε., τηλεθέρμανση/τηλεψύξη) και ψηφιακών υποδομών παρακολούθησης (αισθητήρες, πλατφόρμες δεδομένων, συστήματα ελέγχου). Οι εφαρμογές «μηδενικής ενέργειας» εμφανίζονται συχνά ως επιμέρους στοιχεία αυτής της στρατηγικής: αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης για περιβάλλον και κυκλοφορία, ενεργειακά αυτόνομες μονάδες μέτρησης, και δημοτικές μικρο-υποδομές με τοπική παραγωγή και αποθήκευση. Η αξιολόγηση αυτών των παραδειγμάτων ανέδειξε ότι η επιτυχία σχετίζεται με την ικανότητα της πόλης να κλιμακώνει πιλοτικές λύσεις χωρίς να αυξάνει δυσανάλογα το κόστος συντήρησης και χωρίς να δημιουργεί ασυμβατότητες μεταξύ συστημάτων διαφορετικών προμηθευτών.

Στο οικονομικό σκέλος, η ανάλυση κόστους–οφέλους έδειξε ότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης μπορεί να είναι υψηλότερο σε σύγκριση με συμβατικές λύσεις, κυρίως λόγω εξοπλισμού συλλογής ενέργειας, αποθήκευσης και της απαιτούμενης ψηφιακής υποδομής για παρακολούθηση και διαχείριση. Ωστόσο, σε μεσο-μακροπρόθεσμο ορίζοντα, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας μειώνεται όταν αποφεύγονται επαναλαμβανόμενες αντικαταστάσεις μπαταριών, εκτεταμένες καλωδιώσεις και συχνές επιτόπιες παρεμβάσεις συντήρησης. Η οικονομική βιωσιμότητα ενισχύεται όταν η επένδυση συνδέεται με απτά λειτουργικά οφέλη, όπως βελτιστοποίηση φωτισμού, μείωση ενεργειακών απωλειών σε κτίρια και καλύτερη κατανομή δημοτικών πόρων βάσει δεδομένων. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα χρηματοδοτικών εργαλείων (επιχορηγήσεις, πράσινη χρηματοδότηση, συμβάσεις ενεργειακής απόδοσης) μπορεί να μειώσει το επενδυτικό ρίσκο, υπό την προϋπόθεση ότι ο δήμος διαθέτει ώριμο σχεδιασμό και μηχανισμούς μέτρησης αποτελεσμάτων.

Στο περιβαλλοντικό σκέλος, διαπιστώθηκε ότι τα κύρια οφέλη αφορούν τη μείωση εκπομπών CO_2 μέσω χαμηλότερης κατανάλωσης και αυξημένης αξιοποίησης Α.Π.Ε., καθώς και τη μείωση αποβλήτων που συνδέονται με μπαταρίες, ιδιαίτερα σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα αισθητήρων. Παράλληλα, η δυνατότητα πυκνότερης και συνεχούς παρακολούθησης περιβαλλοντικών παραμέτρων ενισχύει την αποτελεσματικότητα αστικών πολιτικών για ποιότητα αέρα και θόρυβο, με έμμεσες επιδράσεις στην υγεία των κατοίκων. Ωστόσο, αναδείχθηκε η ανάγκη για

συστηματική ανάλυση κύκλου ζωής, διότι η αύξηση αριθμού ηλεκτρονικών συσκευών σε πόλεις μπορεί να μεταφέρει μέρος του περιβαλλοντικού φορτίου στη φάση κατασκευής και απόσυρσης, αν δεν υπάρξουν διαδικασίες ανακύκλωσης και υπεύθυνης προμήθειας υλικών.

6.1.3 Κύριες δυσκολίες και συνολική αποτίμηση

Τέλος, η εργασία εντόπισε τις σημαντικότερες δυσκολίες που εμφανίζονται επαναλαμβανόμενα στη βιβλιογραφία και στην πρακτική υλοποίηση. Οι τεχνικές δυσκολίες συνδέονται με τη μεταβλητότητα των πηγών συλλογής ενέργειας, την ανάγκη αξιόπιστης λειτουργίας με περιορισμένους ενεργειακούς πόρους, και τις απαιτήσεις ασφάλειας σε συστήματα με χαμηλή υπολογιστική ισχύ. Οι θεσμικές και οργανωτικές δυσκολίες αφορούν την πολυπλοκότητα αδειοδότησης, την έλλειψη ενιαίων προτύπων διαλειτουργικότητας, και την ανάγκη συντονισμού πολλών δημοτικών υπηρεσιών. Οι κοινωνικές δυσκολίες σχετίζονται με την αποδοχή τεχνολογιών μέτρησης και την ανάγκη διαφανούς διαχείρισης δεδομένων. Παρόλα αυτά, η συνολική εικόνα δείχνει ότι, όταν οι συσκευές μηδενικής ενέργειας εντάσσονται σε συνεκτικό σχέδιο ενεργειακής και ψηφιακής διαχείρισης, μπορούν να λειτουργήσουν ως τεχνολογικός πολλαπλασιαστής που επιτρέπει περισσότερη παρακολούθηση, καλύτερη ρύθμιση πόρων και χαμηλότερο περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος σε βάθος χρόνου.

Θεματική Ενότητα	Κύρια Ευρήματα	Σημασία για τις Βιώσιμες Πόλεις
Συσκευές μηδενικής ενέργειας	Διακρίνονται δύο βασικές κλίμακες εφαρμογής: (α) συσκευές πολύ χαμηλής κατανάλωσης όπως αισθητήρες και IoT κόμβοι που λειτουργούν μέσω συλλογής ενέργειας από το περιβάλλον και (β) μικρές υποδομές με τοπική παραγωγή ενέργειας από Α.Π.Ε. και αποθήκευση.	Μειώνεται η ενεργειακή εξάρτηση και το λειτουργικό κόστος, ενώ διευκολύνεται η ανάπτυξη εκτεταμένων αστικών δικτύων παρακολούθησης.
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	Η καταλληλότητα φωτοβολταϊκών, αιολικών και γεωθερμίας εξαρτάται από το ενεργειακό προφίλ, τις κλιματικές συνθήκες και τους χωρικούς περιορισμούς του αστικού περιβάλλοντος.	Η σωστή επιλογή τεχνολογίας αυξάνει την ενεργειακή αποδοτικότητα και την αξιοπιστία των αστικών ενεργειακών συστημάτων.
Αποθήκευση ενέργειας	Οι τεχνολογίες αποθήκευσης (π.χ. μπαταρίες ιόντων λιθίου, υπερπυκνωτές) λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ μεταβλητής παραγωγής Α.Π.Ε. και σταθερής ζήτησης ενέργειας.	Εξασφαλίζεται σταθερότητα λειτουργίας και αποτελεσματική αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
Εφαρμογή σε έξυπνες πόλεις	Η επιτυχία των εφαρμογών εξαρτάται από στρατηγικό σχεδιασμό, τεχνική τυποποίηση, οικονομική αξιολόγηση και ψηφιακές υποδομές δεδομένων.	Οι τεχνολογίες μηδενικής ενέργειας λειτουργούν ως υποστηρικτικό εργαλείο για συστήματα παρακολούθησης, διαχείρισης πόρων και αστικών υπηρεσιών.
Οικονομική διάσταση	Παρότι το αρχικό κόστος εγκατάστασης είναι υψηλότερο, το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας μειώνεται λόγω λιγότερης συντήρησης, λιγότερων καλωδιώσεων και μειωμένων αντικαταστάσεων μπαταριών.	Η οικονομική βιωσιμότητα ενισχύεται όταν συνδυάζεται με ενεργειακή εξοικονόμηση και χρηματοδοτικά εργαλεία.
Περιβαλλοντικές	Μείωση εκπομπών CO_2 και περιορισμός αποβλήτων	Συμβάλλει στη βιώσιμη ανάπτυξη

επιπτώσεις	από μπαταρίες, αλλά απαιτείται ανάλυση κύκλου ζωής για τον περιορισμό περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή ηλεκτρονικών συσκευών.	και στη βελτίωση της ποιότητας του αστικού περιβάλλοντος.
Προκλήσεις και περιορισμοί	Τεχνικές δυσκολίες (μεταβλητότητα ενέργειας), θεσμικά εμπόδια (έλλειψη προτύπων), και κοινωνικές προκλήσεις (αποδοχή τεχνολογιών και διαχείριση δεδομένων).	Απαιτείται ολοκληρωμένος σχεδιασμός πολιτικής και συνεργασία πολλών φορέων για την επιτυχημένη εφαρμογή.

Πίνακας 5: Σύνοψη βασικών ευρημάτων εργασίας

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

6.2.1 Τεχνολογικές κατευθύνσεις και βελτιστοποίηση συστημάτων

Η ανάλυση που προηγήθηκε καταδεικνύει ότι οι συσκευές μηδενικής ενέργειας βρίσκονται σε στάδιο τεχνολογικής ωρίμανσης, χωρίς όμως να έχουν εξαντληθεί οι δυνατότητες βελτίωσης και κλιμάκωσης. Η μελλοντική έρευνα μπορεί να κινηθεί σε πολλαπλές κατευθύνσεις, οι οποίες συνδυάζουν τεχνική εξέλιξη, συστημική ολοκλήρωση και κοινωνικοοικονομική αξιολόγηση. Πρώτον, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση προηγμένων υλικών και μικροηλεκτρονικών αρχιτεκτονικών με στόχο τη δραστική μείωση κατανάλωσης ισχύος και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης συστημάτων συλλογής ενέργειας. Η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών στοιχείων υψηλής απόδοσης για λειτουργία σε χαμηλό φωτισμό, η βελτιστοποίηση μικρο-ανεμογεννητριών για περιβάλλοντα με στροβιλισμούς και η αξιοποίηση νέων θερμοηλεκτρικών υλικών αποτελούν πεδία με ερευνητικό ενδιαφέρον. Παράλληλα, η εξέλιξη τεχνικών διαχείρισης ενέργειας, όπως αλγόριθμοι πρόβλεψης διαθεσιμότητας ισχύος και δυναμικής προσαρμογής λειτουργίας (adaptive duty cycling), μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία συστημάτων που βασίζονται σε διαλείπουσα τροφοδοσία.

6.2.2 Διαλειτουργικότητα, ασφάλεια και εμπειρική αξιολόγηση

Δεύτερον, απαιτείται συστηματική έρευνα στη διαλειτουργικότητα και στην ασφάλεια. Η ανάπτυξη ελαφρών πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης για συσκευές περιορισμένων πόρων και η τυποποίηση διεπαφών επικοινωνίας θα διευκολύνουν την κλιμάκωση δικτύων σε επίπεδο πόλης. Επιπλέον, η σύνδεση συσκευών μηδενικής ενέργειας με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων μπορεί να οδηγήσει σε προγνωστικά μοντέλα διαχείρισης ενέργειας και περιβάλλοντος, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα σε πραγματικό χρόνο [58]. Σημαντική είναι επίσης η ανάγκη για εκτεταμένες εμπειρικές μελέτες πεδίου (long-term field trials), ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση των τεχνολογιών υπό πραγματικές αστικές συνθήκες και να εντοπιστούν φαινόμενα υποβάθμισης ή απώλειας απόδοσης με την πάροδο του χρόνου.

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει ακόμη να ενισχύσει τη διεπιστημονική προσέγγιση, ενσωματώνοντας μεθόδους ανάλυσης κύκλου ζωής, κοινωνικοοικονομικούς δείκτες και μελέτες αποδοχής από τους πολίτες. Η ποσοτικοποίηση των έμμεσων οφελών — όπως η μείωση κόστους υγείας λόγω βελτιωμένης ποιότητας αέρα — θα επιτρέψει πληρέστερη αποτίμηση της αξίας των

επενδύσεων. Παράλληλα, η διερεύνηση επιχειρηματικών μοντέλων που βασίζονται σε δεδομένα (data-driven services) μπορεί να αναδείξει νέες πηγές εσόδων για δήμους και ιδιωτικούς παρόχους, ενισχύοντας τη βιωσιμότητα των έργων.

6.2.3 Συνεργατικά μοντέλα και προοπτικές εφαρμογή

Όσον αφορά τις ευκαιρίες συνεργασίας μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, η ανάπτυξη πιλοτικών ζωνών και «ζωντανών εργαστηρίων» (living labs) σε αστικά περιβάλλοντα προσφέρει πεδίο δοκιμής καινοτόμων λύσεων με ελεγχόμενο ρίσκο. Οι δήμοι μπορούν να παρέχουν υποδομές και δεδομένα, ενώ οι ιδιωτικές επιχειρήσεις και ερευνητικά ιδρύματα συμβάλλουν με τεχνογνωσία, εξοπλισμό και επενδυτικά κεφάλαια. Τα σχήματα συμπράξεων επιτρέπουν επιμερισμό κόστους και τεχνολογικού κινδύνου, επιταχύνοντας τη μετάβαση από το στάδιο της έρευνας στην εφαρμογή. Επιπλέον, η δημιουργία ανοικτών πλατφορμών δεδομένων διευκολύνει τη συμμετοχή νεοφυών επιχειρήσεων και την ανάπτυξη καινοτόμων υπηρεσιών βασισμένων στις πληροφορίες που συλλέγονται από συσκευές μηδενικής ενέργειας.

Συμπερασματικά, η μελλοντική πορεία του πεδίου εξαρτάται από τη σύγκλιση τεχνολογικής καινοτομίας, θεσμικής υποστήριξης και συνεργατικών μοντέλων υλοποίησης. Η ενίσχυση ερευνητικών συνεργασιών, η συστηματική αξιολόγηση αποτελεσμάτων και η διασύνδεση δημόσιων πολιτικών με ιδιωτική πρωτοβουλία μπορούν να επιταχύνουν την ανάπτυξη εφαρμογών που θα καταστήσουν τις πόλεις ενεργειακά αποδοτικότερες, τεχνολογικά πιο ευέλικτες και περιβαλλοντικά πιο ανθεκτικές.

Τομέας Έρευνας	Κύριες Κατευθύνσεις	Αναμενόμενα Οφέλη
Τεχνολογική εξέλιξη συσκευών	Ανάπτυξη προηγμένων υλικών και μικροηλεκτρονικών αρχιτεκτονικών με στόχο τη μείωση κατανάλωσης ισχύος και τη βελτίωση των συστημάτων συλλογής ενέργειας (π.χ. φωτοβολταϊκά χαμηλού φωτισμού, μικρο-ανεμογεννήτριες, θερμοηλεκτρικά υλικά).	Αυξημένη ενεργειακή απόδοση, μεγαλύτερη αυτονομία συσκευών και ευρύτερη εφαρμογή σε αστικά περιβάλλοντα.
Διαχείριση ενέργειας	Ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης ενεργειακής διαθεσιμότητας και τεχνικών δυναμικής προσαρμογής λειτουργίας (adaptive duty cycling).	Βελτιωμένη αξιοπιστία συστημάτων που λειτουργούν με διαλείπουσες πηγές ενέργειας.
Διαλειτουργικότητα και ασφάλεια	Τυποποίηση διεπαφών επικοινωνίας και ανάπτυξη ελαφρών πρωτοκόλλων κρυπτογράφησης για συσκευές περιορισμένων πόρων.	Ευκολότερη ενσωμάτωση σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα πόλεων και αυξημένη ασφάλεια δεδομένων.
Τεχνητή νοημοσύνη και ανάλυση δεδομένων	Σύνδεση συσκευών μηδενικής ενέργειας με τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων.	Προγνωστική διαχείριση ενέργειας και βελτιστοποίηση αστικών υπηρεσιών σε πραγματικό χρόνο.
Εμπειρικές μελέτες πεδίου	Διεξαγωγή μακροχρόνιων δοκιμών σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα (long-term field trials).	Αξιολόγηση πραγματικής απόδοσης και εντοπισμός τεχνολογικών περιορισμών.
Διεπιστημονική αξιολόγηση	Ενσωμάτωση ανάλυσης κύκλου ζωής, κοινωνικοοικονομικών δεικτών και μελετών αποδοχής	Πληρέστερη αποτίμηση της βιωσιμότητας και των

	από τους πολίτες.	κοινωνικών επιπτώσεων των τεχνολογιών.
Επιχειρηματικά μοντέλα	Ανάπτυξη μοντέλων υπηρεσιών βασισμένων σε δεδομένα (data-driven services).	Δημιουργία νέων πηγών εσόδων για δήμους και ιδιωτικούς παρόχους.
Συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα	Δημιουργία πιλοτικών ζωνών και «ζωντανών εργαστηρίων» (living labs) για δοκιμή καινοτόμων τεχνολογιών.	Επιτάχυνση μετάβασης από την έρευνα στην πρακτική εφαρμογή και επιμερισμός κόστους και κινδύνου.
Ανοικτά δεδομένα και καινοτομία	Ανάπτυξη ανοικτών πλατφορμών δεδομένων για την αξιοποίηση πληροφοριών από συσκευές μηδενικής ενέργειας.	Ενίσχυση καινοτομίας και συμμετοχή νεοφυών επιχειρήσεων στην ανάπτυξη νέων υπηρεσιών.

Πίνακας 6: Σύνοψη προτάσεων για μελλοντική έρευνα

6.3 Εφαρμογές Πολιτικής και Στρατηγικές Ανάπτυξης

6.3.1 Στρατηγικές κλιμάκωσης και μοντέλο ωρίμανσης έργων

Η επιτάχυνση της υιοθέτησης συσκευών μηδενικής ενέργειας σε πόλεις διεθνώς απαιτεί πολιτικές που αντιμετωπίζουν ταυτόχρονα τρία πρακτικά ζητήματα: (α) τον κατακερματισμό τεχνολογιών και προμηθευτών, (β) την έλλειψη σταθερών μηχανισμών χρηματοδότησης για κλιμάκωση πέρα από πιλοτικά έργα και (γ) την ανάγκη θεσμικής διακυβέρνησης δεδομένων, ώστε οι εφαρμογές να είναι κοινωνικά αποδεκτές και νομικά ασφαλείς. Από τη βιβλιογραφία και την εμπειρία των ευρωπαϊκών πόλεων προκύπτει ότι η αποτελεσματική πολιτική δεν εξαντλείται σε γενικές δεσμεύσεις για «έξυπνες» ή «πράσινες» πόλεις, αλλά μεταφράζεται σε συγκεκριμένα εργαλεία: πρότυπα, κανονισμούς ένταξης σε δημόσιες προμήθειες, δείκτες απόδοσης, προγράμματα υποστήριξης της αγοράς και μηχανισμούς αξιολόγησης που επιτρέπουν στις πόλεις να επιλέγουν λύσεις με πραγματική οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση σε βάθος χρόνου.

Σε επίπεδο στρατηγικών για παγκόσμια κλιμάκωση, προτείνεται η υιοθέτηση ενός «μοντέλου ωρίμανσης» έργων σε τρεις φάσεις, ώστε να αποφεύγεται η παγίδα των απομονωμένων πιλοτικών εγκαταστάσεων που δεν επεκτείνονται. Στην πρώτη φάση (pilot), οι πόλεις εγκαθιστούν μικρό αριθμό συσκευών σε περιορισμένη γεωγραφική ζώνη με σαφείς μετρήσιμους στόχους (π.χ. μείωση ενεργειακής κατανάλωσης σε φωτισμό, αύξηση ακρίβειας περιβαλλοντικής παρακολούθησης, μείωση κόστους συντήρησης λόγω απουσίας μπαταριών) [59]. Στη δεύτερη φάση (scale-up), η προμήθεια εξοπλισμού γίνεται με προδιαγραφές που επιβάλλουν διαλειτουργικότητα, ανοικτά πρωτόκολλα και δυνατότητα διαχείρισης από ενιαία πλατφόρμα, ώστε οι νέες εγκαταστάσεις να ενσωματώνονται χωρίς πρόσθετα κόστη ολοκλήρωσης. Στην τρίτη φάση (mainstreaming), οι συσκευές μηδενικής ενέργειας αντιμετωπίζονται ως τυπικό στοιχείο δημοτικών υποδομών, ενταγμένο σε προγράμματα αναβάθμισης κτιρίων, έξυπνου φωτισμού, διαχείρισης κυκλοφορίας και περιβαλλοντικής πολιτικής. Η μετάβαση από φάση σε φάση απαιτεί μηχανισμούς παρακολούθησης δεικτών (KPI-based governance) και τεκμηρίωση με κόστος

κύκλου ζωής, ώστε η κλιμάκωση να βασίζεται σε αποδείξεις αποτελεσματικότητας και όχι σε γενικούς στόχους ή αποσπασματική χρηματοδότηση.

6.3.2 Ο ρόλος των κυβερνήσεων: ρυθμιστικά και χρηματοδοτικά εργαλεία

Η υποστήριξη από κυβερνήσεις μπορεί να πάρει μορφή ρυθμιστικών και οικονομικών εργαλείων που μειώνουν το ρίσκο για δήμους και αγορά. Στο ρυθμιστικό πεδίο, οι εθνικές αρχές μπορούν να καθορίσουν ελάχιστες τεχνικές προδιαγραφές για δημοτικές προμήθειες (π.χ. απαιτήσεις ασφάλειας, ελάχιστη διάρκεια ζωής, δυνατότητα απομακρυσμένης διάγνωσης, διαλειτουργικότητα), καθώς και κατευθυντήριες γραμμές για εγκατάσταση σε δημόσιους χώρους (αδειοδότηση, κανόνες οπτικής ένταξης, ευθύνες συντήρησης). Στο οικονομικό πεδίο, μπορούν να θεσπιστούν προγράμματα συγχρηματοδότησης που καλύπτουν το αρχικό κόστος εξοπλισμού και εγκατάστασης, ιδίως όταν αποδεικνύεται μείωση εκπομπών ή λειτουργικών δαπανών. Ιδιαίτερα αποτελεσματικά είναι τα μοντέλα όπου η χρηματοδότηση συνδέεται με επίτευξη στόχων (performance-based funding), καθώς δημιουργούν κίνητρο για σωστό σχεδιασμό και όχι απλή απορρόφηση πόρων. Επίσης, η θεσμοθέτηση προτύπων αξιολόγησης (μεθοδολογίες NPV/IRR, ανάλυση κύκλου ζωής, κοινωνικό κόστος άνθρακα) βοηθά ώστε έργα διαφορετικών πόλεων να συγκρίνονται με κοινό τρόπο, διευκολύνοντας τη διάχυση καλών πρακτικών.

6.3.3 Διεθνείς οργανισμοί, διακυβέρνηση δεδομένων και εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα

Οι διεθνείς οργανισμοί μπορούν να ενισχύσουν την ανάπτυξη σε δύο επίπεδα: τυποποίηση/δείκτες και μεταφορά τεχνογνωσίας. Πρώτον, η ανάπτυξη και διάδοση πλαισίων δεικτών βιώσιμων πόλεων (όπως KPI frameworks) επιτρέπει κοινή γλώσσα αξιολόγησης, ώστε οι εφαρμογές συσκευών μηδενικής ενέργειας να συσχετίζονται με αποτελέσματα σε ενέργεια, εκπομπές, ποιότητα αέρα και αξιοπιστία υπηρεσιών. Δεύτερον, οι οργανισμοί αυτοί μπορούν να λειτουργήσουν ως κόμβοι ανταλλαγής πρακτικών, υποστηρίζοντας προγράμματα κατάρτισης για δημοτικές υπηρεσίες, οδηγούς υλοποίησης και πρότυπα συμβάσεων προμηθειών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η δημιουργία διεθνών “reference architectures” για smart city πλατφόρμες και συσκευές χαμηλής κατανάλωσης, ώστε να περιοριστεί η ασυμβατότητα μεταξύ λύσεων και να μειωθεί το κόστος ολοκλήρωσης. Τέλος, η διαμόρφωση αρχών διακυβέρνησης δεδομένων (με σαφείς κανόνες για ιδιωτικότητα, ασφάλεια και πρόσβαση σε ανοικτά δεδομένα) επιτρέπει την ανάπτυξη εφαρμογών χωρίς να υπονομεύεται η εμπιστοσύνη των πολιτών, κάτι που αποτελεί προϋπόθεση για ευρεία κλιμάκωση.

Σε μια πιο πρακτική ανάγνωση, οι πολιτικές και στρατηγικές ανάπτυξης που ευνοούν τις συσκευές μηδενικής ενέργειας συγκλίνουν σε μια κοινή λογική: οι πόλεις χρειάζονται σταθερούς κανόνες προμήθειας και διαλειτουργικότητας, προβλέψιμη χρηματοδότηση που ανταμείβει μετρήσιμα αποτελέσματα, και θεσμικό πλαίσιο για δεδομένα και ασφάλεια. Όταν αυτά τα στοιχεία συνδυάζονται, η υιοθέτηση των τεχνολογιών μετατρέπεται από μεμονωμένα πιλοτικά έργα σε επαναλαμβανόμενο μοντέλο αστικής αναβάθμισης, με δυνατότητα εφαρμογής σε διαφορετικές γεωγραφικές, οικονομικές και κοινωνικές συνθήκες.

Τομέας Πολιτικής	Βασικές Στρατηγικές	Αναμενόμενα Αποτελέσματα
Θεσμικό και κανονιστικό πλαίσιο	Καθορισμός τεχνικών προτύπων, κανονισμών δημοσίων προμηθειών και διαδικασιών αδειοδότησης για συσκευές μηδενικής ενέργειας.	Διασφάλιση διαλειτουργικότητας, αξιοπιστίας και ασφαλούς εγκατάστασης σε αστικά περιβάλλοντα.
Στρατηγική κλιμάκωσης έργων	Υιοθέτηση μοντέλου τριών φάσεων: πιλοτική εφαρμογή (pilot), επέκταση έργων (scale-up) και πλήρης ενσωμάτωση σε δημοτικές υποδομές (mainstreaming).	Αποφυγή απομονωμένων πιλοτικών έργων και δημιουργία βιώσιμων λύσεων μεγάλης κλίμακας.
Μηχανισμοί χρηματοδότησης	Προγράμματα συγχρηματοδότησης, πράσινη χρηματοδότηση και χρηματοδότηση βάσει απόδοσης (performance-based funding).	Μείωση επενδυτικού ρίσκου και ενίσχυση υλοποίησης έργων με αποδεδειγμένα αποτελέσματα.
Αξιολόγηση έργων	Χρήση δεικτών απόδοσης (KPI), ανάλυση κύκλου ζωής και οικονομικών μεθόδων αξιολόγησης (NPV, IRR).	Αντικειμενική σύγκριση έργων και καλύτερη λήψη αποφάσεων για επενδύσεις σε αστικές τεχνολογίες.
Ρόλος κυβερνήσεων	Θέσπιση ελάχιστων τεχνικών προδιαγραφών, κατευθυντήριων γραμμών εγκατάστασης και προγραμμάτων υποστήριξης δήμων.	Ενίσχυση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της βιώσιμης υιοθέτησης των τεχνολογιών.
Ρόλος διεθνών οργανισμών	Ανάπτυξη πλαισίων δεικτών βιώσιμων πόλεων και προτύπων για πλατφόρμες smart city.	Κοινή μεθοδολογία αξιολόγησης και ευκολότερη ανταλλαγή τεχνογνωσίας μεταξύ πόλεων.
Μεταφορά γνώσης και συνεργασία	Δημιουργία οδηγών υλοποίησης, προγραμμάτων κατάρτισης και ανταλλαγής καλών πρακτικών.	Βελτίωση τεχνογνωσίας δημοτικών υπηρεσιών και επιτάχυνση εφαρμογής καινοτόμων λύσεων.
Διακυβέρνηση δεδομένων	Καθορισμός κανόνων για προστασία ιδιωτικότητας, ασφάλεια πληροφοριών και χρήση ανοικτών δεδομένων.	Ενίσχυση εμπιστοσύνης πολιτών και ανάπτυξη νέων ψηφιακών υπηρεσιών βασισμένων σε δεδομένα.

Πίνακας 7: Σύνοψη εφαρμογών πολιτικής και στρατηγικών ανάπτυξης

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

[1] Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2017). Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Sage publications.

[2] Yin, R. K. (2018). Case study research and applications (Vol. 6). Thousand Oaks, CA: Sage.

[3] Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering.

[4] Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. British journal of management, 14(3), 207-222.

[5] Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., & Mattsson, M. (2008, June). Systematic mapping studies in software engineering. In 12th international conference on evaluation and assessment in software engineering (EASE). BCS Learning & Development.

[6] Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., & Crawley, D. (2006). Zero energy buildings: a critical look at the definition (No. NREL/CP-550-39833). National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO..

[7] Energy, U. D. (2015). A Common Definition for Zero Energy Buildings. USDo Energy, Editor.

[8] Sartori, I., Napolitano, A., & Voss, K. (2012). Net zero energy buildings: A consistent definition framework. Energy and buildings, 48, 220-232.

[9] Marszal, A. J., & Heiselberg, P. (2009). A literature review of Zero Energy Buildings (ZEB) definitions. Aalborg University, Department of Civil Engineering.

[10] Hernandez, P., & Kenny, P. (2010). From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB). Energy and Buildings, 42(6), 815–821.

[11] Citaristi, I. (2022). International energy agency—iea. In The Europa directory of international organizations 2022 (pp. 701-702). Routledge.

[12] Change, I. C. (2014). Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, 1454, 147.

[13] Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. energy, 68, 1-11.

[14] CARAGLIU, A., DEL, B., & C–NIJKAMP, P. (2011). Smart cities in Europe Journal of Urban Technology 18 (2): 65–82.

[15] Albino, V., Berardi, U., & Dangelico, R. M. (2015). Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. Journal of urban technology, 22(1), 3-21.

[16] Hollands, R. G. (2020). Will the real smart city please stand up?: Intelligent, progressive or entrepreneurial?. In The Routledge companion to smart cities (pp. 179-199). Routledge.

[17] Nam, T., & Pardo, T. A. (2011, June). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. In Proceedings of the 12th annual international digital government research conference: digital government innovation in challenging times (pp. 282-291).

[18] Angelidou, M. (2015). Smart cities: A conjuncture of four forces. Cities, 47, 95-106.

[19] Bibri, S. E. (2023). Data-driven smart eco-cities of the future: an empirically informed integrated model for strategic sustainable urban development. World Futures, 79(7-8), 703-746.

[20] Allam, Z., & Newman, P. (2018). Redefining the smart city: Culture, metabolism and governance. Smart cities, 1(1), 4-25.

[21] Cities, S. (2018). Communities—Indicators for City Services and Quality of Life. ISO: Geneva, Switzerland.

[22] UNECE, U., & ITU, I. (2016). Key performance indicators for smart sustainable cities to assess the achievement of sustainable development goals. Draft New Recommendation ITUT L. 1603 (ex L. KPIs-SSC-SDGs).

[23] Moschen, S. A., Macke, J., Bebber, S., & Benetti Correa da Silva, M. (2019). Sustainable development of communities: ISO 37120 and UN goals. International Journal of Sustainability in Higher Education, 20(5), 887-900.

[24] Anthopoulos, L., Janssen, M., & Weerakkody, V. (2018). A Unified Smart City Model (USCM) for smart city conceptualization and benchmarking. E-Planning and collaboration: Concepts, methodologies, tools, and applications, 523-540.

[25] Sudevalayam, S., & Kulkarni, P. (2010). Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. IEEE communications surveys & tutorials, 13(3), 443-461.

[26] Paradiso, J. A., & Starner, T. (2005). Energy scavenging for mobile and wireless electronics. IEEE Pervasive computing, 4(1), 18-27.

[27] Roundy, S., Wright, P. K., & Rabaey, J. M. (2003). Energy scavenging for wireless sensor networks. In Norwell (pp. 45-47).

[28] Ávila, B. Y. L., Vázquez, C. A. G., Baluja, O. P., Domínguez, L. A. Q., Cotfas, D. T., & Cotfas, P. A. (2025, October). Energy Storage and Management in Battery-free Wireless Sensor Networks. In 2025 14th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) (pp. 449-454). IEEE.

[29] Shaikh, F. K., Zeadally, S., & Exposito, E. (2015). Enabling technologies for green internet of things. IEEE Systems Journal, 11(2), 983-994.

[30] Shafique, K., Khawaja, B. A., Sabir, F., Qazi, S., & Mustaqim, M. (2020). Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios. IEEE access, 8, 23022-23040.

[31] Batista, F., Guimarães, A. S., & Palmero-Marrero, A. I. (2025). Building Integrated Photovoltaics: A multi-level design review for optimized implementation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 220, 115837.

[32] Chivelet, N. M., Kapsis, C., & Frontini, F. (Eds.). (2024). Building-integrated photovoltaics: a technical guidebook. Taylor & Francis.

[33] Constantinou, S., Al-Naemi, F., Alrashidi, H., Mallick, T., & Issa, W. (2024). A review on technological and urban sustainability perspectives of advanced building-integrated photovoltaics. Energy Science & Engineering, 12(3), 1265-1293.

[34] Anup, K. C., Whale, J., & Urmee, T. (2019). Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: A review. Renewable energy, 131, 268-283.

[35] Chrysochou, A. K. (2021). Urban wind turbines-a literature review on current research.

[36] Christodoulides, P., Christou, C., & Florides, G. A. (2024). Ground source heat pumps in buildings revisited and prospects. Energies, 17(13), 3329.

[37] Acharjya, K., Jain, N. K., & Saraswat, B. (2024). Exploring Geothermal Energy's Potential in Smart Cities Building Climate Control. In E3S Web of Conferences (Vol. 540, p. 13007). EDP Sciences.

[38] Mf, Y. K., Singh, R. M., Madiai, C., & Facciorusso, J. A. (2025). Heating and cooling geothermal systems in urban settings: the potential of energy micropiles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 208, 114966.

[39] Li, F., Wang, D., Liu, D., Yang, S., Sun, K., Liu, Z., ... & Qin, J. (2023). A comprehensive review on energy storage system optimal planning and benefit evaluation methods in smart grids. Sustainability, 15(12), 9584.

[40] Dunn, B., Kamath, H., & Tarascon, J. M. (2011). Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. Science, 334(6058), 928-935.

[41] Armaroli, N., & Balzani, V. (2007). The future of energy supply: challenges and opportunities. Angewandte Chemie International Edition, 46(1-2), 52-66.

[42] Boeri, A. N. D. R. E. A., Longo, D. A. N. I. L. A., & Palma, M. (2021). Climate-neutral and smart cities: a European policies' overview. WIT Trans Ecol Environ, 243, 3-14.

[43] Oyadeyi, O. A., & Oyadeyi, O. O. (2025). Towards inclusive and sustainable strategies in smart cities: A comparative analysis of Zurich, Oslo, and Copenhagen. Research in Globalization, 10, 100271.

[44] Khemakhem, S., & Krichen, L. (2024). A comprehensive survey on an IoT-based smart public street lighting system application for smart cities. Franklin Open, 8, 100142.

[45] Orejon-Sanchez, R. D., Andres-Diaz, J. R., & Gago-Calderon, A. (2021). Autonomous photovoltaic LED urban street lighting: Technical, economic, and social viability analysis based on a case study. Sustainability, 13(21), 11746.

[46] Jabbar, W. A., Keat, T. K., Dael, F. A., Hong, L. C., Yussof, Y. F. M., & Nasir, A. (2025). Optimising urban lighting efficiency with IoT and LoRaWAN integration in smart street lighting systems. Discover Internet of Things, 5(1), 64.

[47] Hansen, K. B., & Agger, A. (2023). Copenhagen CO2 neutrality in 2025? A polycentric analysis of urban climate governance in Copenhagen 2006–2020. Environmental Policy and Governance, 33(3), 288-300.

[48] SEVİNÇLİ, B. G., & Turan, M. (2025). Urban climate action plans in the age of crisis: Pathways to sustainable and resilient cities. Journal of process management and new technologies, 13(1-2), 124-142.

[49] Mialot, C. (2024). Climate governance and climate planning: The case of Paris. In Green Cities, Governance and the Law (pp. 145-169). Routledge.

[50] Albarus, I., Lauvaux, T., Utard, H., Ciais, P., Crifo, P., & Gros, V. (2025). Unraveling climate targets across the Paris conurbation as a gauge of city ambitions. npj Urban Sustainability, 5(1), 27.

[51] Kicherer, N., Lorenzen, P., & Schäfers, H. (2021). Design of a district heating roadmap for Hamburg. Smart Energy, 2, 100014.

[52] Bouchard, P., Voß, S., Heilig, L., & Shi, X. (2023). A case study on smart grid technologies with renewable energy for central parts of Hamburg. Sustainability, 15(22), 15834.

[53] Gudlaugsson, B., Ahmed, T. G., Dawood, H., Ogwumike, C., Short, M., & Dawood, N. (2023). Cost and environmental benefit analysis: An assessment of renewable energy integration and smart solution technologies in the InteGRIDy project. Cleaner Energy Systems, 5, 100071.

[54] Portillo, F., Alcayde, A., Garcia, R. M., Fernandez-Ros, M., Gazquez, J. A., & Novas, N. (2024). Life cycle assessment in renewable energy: solar and wind perspectives. Environments, 11(7), 147.

[55] International Organization for Standardization. (2006). Environmental management: life cycle assessment; Principles and Framework. ISO.

[56] Standard, I. (2006). Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines. London: ISO.

[57] Kuriakose, J., Jones, C., Anderson, K., McLachlan, C., & Broderick, J. (2022). What does the Paris climate change agreement mean for local policy? Downscaling the remaining global carbon budget to sub-national areas. Renewable and Sustainable Energy Transition, 2, 100030.

[58] Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., Kalasek, R., Pichler-Milanovic, N., & Meijers, E. J. (2007). Smart cities. Ranking of European medium-sized cities. Final report.

[59] Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). The core enabling technologies of big data analytics and context-aware computing for smart sustainable cities: a review and synthesis. Journal of Big Data, 4(1), 38.

[60] Hirsch, A., Parag, Y., & Guerrero, J. (2018). Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. Renewable and sustainable Energy reviews, 90, 402-411.

[61] Sami, M. S., Abrar, M., Akram, R., Hussain, M. M., Nazir, M. H., Khan, M. S., & Raza, S. (2021). Energy management of microgrids for smart cities: A review. Energies, 14(18), 5976.

[62] Ahmed, I., Rehan, M., Basit, A., Ahmad, H., Ahmed, W., Ullah, N., ... & Prokop, L. (2023). Review on microgrids design and monitoring approaches for sustainable green energy networks. Scientific Reports, 13(1), 21663.

[63] Shafiullah, M., Refat, A. M., Haque, M. E., Chowdhury, D. M. H., Hossain, M. S., Alharbi, A. G., ... & Hossain, S. (2022). Review of recent developments in microgrid energy management strategies. Sustainability, 14(22), 14794.

[64] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. IEEE Internet of Things journal, 1(1), 22-32.

[65] Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., ... & Portugali, Y. (2012). Smart cities of the future. The european physical journal special topics, 214(1), 481-518.

[66] Bibri, S. E., & Krogstie, J. (2017). Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. Sustainable cities and society, 31, 183-212.

[67] Farmanbar, M., Parham, K., Arild, Ø., & Rong, C. (2019). A widespread review of smart grids towards smart cities. Energies, 12(23), 4484.