



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

**Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα
δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του Κουλούρη Ερρίκου

ΑΜ : 3252024013

Επιβλέπων : Δρ. Κορμέτζας Γεώργιος

Σάμος, 2026

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

© 2026

του

ΕΡΡΙΚΟΥ ΚΟΥΛΟΥΡΗ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κέντρων δεδομένων (Data Centers) μέσα από τη συνέργεια της ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα (Smart Grids) και της στρατηγικής χωροθέτησης. Η μελέτη υιοθετεί έναν μικτό ερευνητικό σχεδιασμό, συνδυάζοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση με την πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων και την εξέταση εμβληματικών μελετών περίπτωσης (Google, Meta). Κεντρικό εύρημα της έρευνας αποτελεί η ανεπάρκεια του δείκτη PUE (Power Usage Effectiveness) ως μοναδικού κριτηρίου βιωσιμότητας. Προτείνεται ένα ολιστικό πλαίσιο αξιολόγησης που ενσωματώνει δείκτες υδατικής και ανθρακικής απόδοσης (WUE, CUE) καθώς και την επαναχρησιμοποίηση θερμότητας (ERE). Παράλληλα, αναδεικνύεται ο μετασχηματισμός των κέντρων δεδομένων από παθητικούς καταναλωτές σε ενεργούς δρώντες του ενεργειακού συστήματος, ικανούς να παρέχουν υπηρεσίες απόκρισης στη ζήτηση και ρύθμισης συχνότητας μέσω της ευελιξίας του φορτίου τους και των συστημάτων UPS. Επιπλέον, η εργασία τεκμηριώνει ότι η στρατηγική επιλογή τοποθεσίας υπερβαίνει τα στενά οικονομικά κριτήρια, καθώς απαιτεί τη σύγκλιση κλιματικών συνθηκών, χαμηλής έντασης άνθρακα του δικτύου και ρυθμιστικής σταθερότητας. Συμπερασματικά, προτείνεται ο επανασχεδιασμός των εγκαταστάσεων ως ολοκληρωμένων κυβερνο-φυσικών συστημάτων, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη ανάπτυξη της ψηφιακής οικονομίας με το ελάχιστο δυνατό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Λέξεις-κλειδιά: *κέντρα δεδομένων, έξυπνα δίκτυα, ενεργειακή απόδοση, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στρατηγική χωροθέτηση.*

Abstract

This thesis explores the optimization of data center energy efficiency through the synergy of smart grid integration and strategic siting. The study adopts a mixed-methods research design, synthesizing extensive literature review with multi-criteria decision analysis and the evaluation of flagship case studies (Google, Meta). A central finding of this research is the inadequacy of the Power Usage Effectiveness (PUE) metric as a standalone criterion for sustainability. Instead, the study proposes a holistic assessment framework that incorporates Water Usage Effectiveness (WUE), Carbon Usage Effectiveness (CUE), and Energy Reuse Effectiveness (ERE). Furthermore, the thesis highlights the transformation of data centers from passive consumers into active participants in the energy ecosystem, capable of providing demand response services and frequency regulation by leveraging workload flexibility and Uninterruptible Power Supply (UPS) systems. Additionally, the research demonstrates that strategic location selection transcends conventional economic factors, requiring the convergence of favorable climatic conditions, low grid carbon intensity, and regulatory stability. In conclusion, it is argued that next-generation facilities must be redesigned as integrated cyber-physical-energy systems to ensure the sustainable growth of the digital economy while minimizing environmental impact.

Keywords: *data centers, smart grids, energy efficiency, renewable energy, strategic siting.*

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	6
1. Εισαγωγή	10
1.1 Πλαίσιο και κίνητρα	10
1.2 Δήλωση προβλήματος	10
1.3 Σκοπός και ερευνητικοί στόχοι	13
1.4 Ερευνητικά ερωτήματα και υποθέσεις	14
1.5 Συνεισφορές	15
1.6 Δομή της διπλωματικής	17
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	19
2.1 Αρχιτεκτονική κέντρου δεδομένων: Φορτίο IT, ηλεκτρική αλυσίδα τροφοδοσίας (UPS), ψύξη (CRAC/CRAH, ελεύθερη ψύξη, υγρό) και δομή δικτύου	19
2.2 Δείκτες ενεργειακής απόδοσης και βιωσιμότητας: PUE, DCiE, WUE, CUE, ERE, μερικό PUE (pPUE)	21
2.3 Έξυπνα δίκτυα: αρχές (ανίχνευση/SCADA/DERMS/DR), VPPs, απόκριση στη ζήτηση και προηγμένη μέτρηση	22
2.4 Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης: ηλιακή/αιολική/υδροηλεκτρική/βιομάζα, μπαταρίες, υδρογόνο	23
2.5 Ρυθμιστικό και πολιτικό τοπίο: στόχοι και πρότυπα κλιματικής ουδετερότητας (π.χ., σειρά ISO/IEC 30134)	25
2.6 Γεωγραφία και κλίμα: HDD/CDD, υγρασία, υψόμετρο και πρόσβαση σε δίκτυα και υποθαλάσσια καλώδια	26
3. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας	30
3.1 Κατανάλωση και τάσεις: επιπτώσεις του cloud, της Τεχνητής Νοημοσύνης και του IoT	30
3.2 Στρατηγικές για τη μείωση της κατανάλωσης: εικονικοποίηση, διαχείριση φόρτου εργασίας και επαναχρησιμοποίηση θερμότητας	32
3.3 Συνέργειες DC–έξυπνου δικτύου: Συμμετοχή DR, ευελιξία φορτίου και συνεγκατάσταση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	34
3.4 Γεωγραφική βελτιστοποίηση: διεθνή παραδείγματα (ψυχρά κλίματα, περιοχές υδροηλεκτρικής ενέργειας και πέραν αυτών)	35
3.5 Κενά γνώσης που αντιμετωπίζονται από αυτήν την διατριβή	37
4. Μεθοδολογία	40
4.1 Σχεδιασμός έρευνας	40

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

4.2 Βιβλιογραφική και τεκμηριωτική ανάλυση	41
4.3 Δείκτες και αναλυτικές μεταβλητές	42
4.4 Ανάλυση αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων	43
4.5 Σχεδιασμός μελετών περίπτωσης	43
4.6 Πλαίσιο σεναρίου και περιορισμοί	44
5. Αποτελέσματα I: Ενεργειακά Προφίλ Κέντρων Δεδομένων	45
5.1 Ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας των κέντρων δεδομένων	45
5.2 Επίδραση του τύπου φόρτου εργασίας	47
5.3 Ζήτηση ενέργειας που σχετίζεται με την ψύξη	47
5.4 Ερμηνεία των PUE, WUE και CUE	48
6. Αποτελέσματα II: Ενσωμάτωση Έξυπνων Δικτύων	50
6.1 Κέντρα δεδομένων ως ευέλικτα ενεργειακά φορτία	51
6.2 Δυνατότητα απόκρισης στη ζήτηση	52
6.3 Ρύθμιση συχνότητας και βοηθητικές υπηρεσίες	52
6.4 Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	53
6.5 Μετατόπιση φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα	54
6.6 Προτεινόμενο μοντέλο ενσωμάτωσης έξυπνου δικτύου	54
7. Αποτελέσματα III: Στρατηγική Επιλογή Τοποθεσίας	56
7.1 Γιατί η τοποθεσία έχει σημασία	57
7.2 Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας	58
7.3 Πλαίσιο βαθμολόγησης MCDA	59
7.4 Κατηγορίες υποψήφιων τοποθεσιών	60
7.5 Ευαισθησία των κατατάξεων τοποθεσίας	61
8. Μελέτες Περιπτώσεων	62
8.1 Προσέγγιση επιλογής μελετών περίπτωσης	63
8.2 Μελέτη Περίπτωσης 1: Κέντρα δεδομένων ψυχρού κλίματος και προσανατολισμένα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	63
8.3 Μελέτη Περίπτωσης 2: Επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας και τηλεθέρμανση	64
8.4 Μελέτη Περίπτωσης 3: Λειτουργία έξυπνου δικτύου βασισμένη στη βιβλιογραφία και με επίγνωση του άνθρακα	65
8.5 Σύγκριση μεταξύ περιπτώσεων	66
8.6 Μαθήματα από τις μελέτες περιπτώσεων	66

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

9. Συζήτηση	67
9.1 Συζήτηση σε σχέση με τα ερευνητικά ερωτήματα	68
9.2 Θεωρητικές συνέπειες	69
9.3 Πρακτικές επιπτώσεις	70
9.4 Περιορισμοί	71
9.5 Μελλοντική έρευνα	71
10. Συμπεράσματα και Συστάσεις	72
10.1 Σύνοψη της έρευνας	72
10.2 Κύρια συμπεράσματα	72
10.3 Προτεινόμενο μοντέλο για κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς	74
10.4 Συστάσεις	74
Βιβλιογραφία	76

1. Εισαγωγή

1.1 Πλαίσιο και κίνητρα

Τα κέντρα δεδομένων αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικές φυσικές υποδομές για τη ψηφιακή οικονομία, καθώς υποστηρίζουν καίριας σημασίας λειτουργίες όπως το υπολογιστικό νέφος, την εκπαίδευση μοντέλων Τεχνητής Νοημοσύνης υψηλής απόδοσης, την παγκόσμια διανομή περιεχομένου και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Δεδομένης της συνεχώς αυξανόμενης εξάρτησης των σύγχρονων κοινωνιών από τις ψηφιακές υπηρεσίες, κρίνεται επιτακτική η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού, της χωροθέτησης και της διαχείρισης της λειτουργίας των εγκαταστάσεων αυτών, εστιάζοντας στην ενεργειακή αποδοτικότητα, τη λειτουργική ανθεκτικότητα και τη βιώσιμη περιβαλλοντική ευθυγράμμιση (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022).

Παρά τις ανησυχίες για εκθετική αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης, εμπειρικές μελέτες καταδεικνύουν ότι η ενεργειακή ζήτηση του κλάδου παρέμεινε σχετικά σταθερή έως τα τέλη της δεκαετίας του 2010, χάρη στις ραγδαίες εξελίξεις στην αποδοτικότητα του υλικού, τις υποδομές ψύξης και την τεχνολογία της εικονικοποίησης (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022). Ωστόσο, η τρέχουσα μεταβολή στο μείγμα του φόρτου εργασίας —με έμφαση στη Μηχανική Μάθηση, τη ροή περιεχομένου υψηλής ανάλυσης και τις υπηρεσίες υπολογιστικής άκρου —εισάγει νέες προκλήσεις λόγω της αυξημένης ενεργειακής πυκνότητας και των απαιτήσεων απαγωγής θερμότητας. Η γεωγραφική κατανομή της ζήτησης μετατοπίζεται επίσης, με τη δημιουργία «εργοστασίων τεχνητής νοημοσύνης» υψηλής ισχύος ανά rack, τα οποία συγκεντρώνονται στρατηγικά πλησίον κομβικών δικτύων οπτικών ινών και πηγών ενέργειας, ασκώντας πρωτοφανείς πιέσεις στις τοπικές υποδομές ηλεκτρικής ισχύος.

Υπό το πρίσμα των σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων, το κέντρο δεδομένων παύει να αποτελεί έναν παθητικό καταναλωτή φορτίου και μετεξελίσσεται σε ένα ευέλικτο, αποκεντρωμένο στοιχείο ενεργητικού με δυνατότητες ελέγχου και απόκρισης. Η συμμετοχή του σε προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση, η παροχή υπηρεσιών ταχείας ρύθμισης συχνότητας μέσω του περιορισμού ισχύος των εξυπηρετητών ή των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (BESS), καθώς και η ενσωμάτωσή του σε τοπικά μικροδίκτυα με ανανεώσιμες πηγές, επαναπροσδιορίζουν τον λειτουργικό του ρόλο (Wang et al., 2019; Sheikholeslami et al., 2022; Chen et al., 2020). Παράλληλα, η επιστημονική κοινότητα έχει θεσπίσει ένα τυποποιημένο

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

πλαίσιο δεικτών αποδοτικότητας. Ενώ η Αποτελεσματικότητα Χρήσης Ενέργειας (PUE) παραμένει ο κυρίαρχος δείκτης, δίδεται πλέον αυξανόμενη έμφαση στην Αποτελεσματικότητα Χρήσης Νερού (WUE), την Αποτελεσματικότητα Χρήσης Άνθρακα (CUE) και την Αποτελεσματικότητα Επαναχρησιμοποίησης Ενέργειας (ERE), εξετάζοντας πώς οι κλιματικές συνθήκες και οι τεχνολογικές επιλογές διαμορφώνουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των εγκαταστάσεων (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024).

Οι παράμετροι χωροθέτησης έχουν καταστεί πλέον πολυδιάστατες και βασίζονται σε αναλυτικά δεδομένα που περιλαμβάνουν κλιματικούς παράγοντες (βαθμοημέρες θέρμανσης/ψύξης, επίπεδα υγρασίας), την ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού μείγματος, την αξιοπιστία των τοπικών υποδομών, καθώς και τη διαθεσιμότητα υδατικών και ενεργειακών πόρων. Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν όχι μόνο την περιβαλλοντική βιωσιμότητα αλλά και το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO) (Zhang & Liu, 2022; Lindberg et al., 2022).

Κεντρικό ρόλο σε αυτό το πλαίσιο διαδραματίζει η εξέλιξη των συστημάτων ψύξης. Οι συμβατικές μέθοδοι αερόψυξης αντικαθίστανται σταδιακά από προηγμένες τεχνικές ελεύθερης ψύξης, έμμεσα εξατμιστικά συστήματα, εναλλάκτες θερμότητας οπίσθιας θύρας (RDHx) και τεχνολογίες ψύξης με εμβάπτιση για υπολογιστικές μονάδες υψηλής ισχύος. Οι εν λόγω επιλογές επηρεάζουν καταλυτικά τον δείκτη PUE, την κατανάλωση νερού και τη δυνατότητα ανάκτησης απορριπτόμενης θερμότητας. Η αξιοποίηση αυτής της θερμικής ενέργειας χαμηλής ποιότητας—μέσω της ενσωμάτωσης σε δίκτυα τηλεθέρμανσης, της χρήσης αντλιών θερμότητας ή οργανικών κύκλων Rankine (ORC)—επιτρέπει στα κέντρα δεδομένων να λειτουργούν ως «παραγωγοί-καταναλωτές» εντός του αστικού ιστού (Huang et al., 2020; Dvořák et al., 2020; Corigliano et al., 2024; Kim et al., 2022; Montagud-Montalvá et al., 2023).

Συμπερασματικά, οι ανωτέρω δυναμικές επιβάλλουν την αντιμετώπιση του κέντρου δεδομένων όχι ως απομονωμένης μονάδας, αλλά ως κρίσιμου κόμβου σε αλληλοσυνδεδεμένα κυβερνο-φυσικά ενεργειακά δίκτυα. Η συστημική ενσωμάτωση σε έξυπνα δίκτυα, σε συνδυασμό με αυστηρές μεθόδους πολυκριτήριας χωροθέτησης, δύναται να μεγιστοποιήσει τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας, να ελαχιστοποιήσει το λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές ρύπων, και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα των ενεργειακών υποδομών σε συνολικό επίπεδο (Lindberg et al., 2021; Lindberg et al., 2022; Mytton, 2021).

1.2 Δήλωση προβλήματος

Παρά τη σημειούμενη πρόοδο, ο κλάδος αντιμετωπίζει σύνθετες και αλληλένδετες προκλήσεις ενεργειακής, οικονομικής και περιβαλλοντικής φύσεως. Πρωτίστως, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των ψηφιακών υποδομών χαρακτηρίζεται από έντονη χωροχρονική συγκέντρωση, γεγονός που εντείνει τα τοπικά φορτία αιχμής. Αν και ιστορικά η κατανάλωση του τομέα παρέμενε σε ελεγχόμενα επίπεδα, η τρέχουσα ανάδυση εφαρμογών Τεχνητής Νοημοσύνης, η αυξημένη ισχύς ανά ικρίωμα και οι απαιτήσεις αδιάλειπτης λειτουργίας, με 24/7 διαθεσιμότητα, ασκούν σημαντικές πιέσεις στα δίκτυα μεταφοράς. Οι συνθήκες αυτές δύνανται να προκαλέσουν ανάγκες περικοπής φορτίου και να επιβάλουν κοστοβόρες αναβαθμίσεις της χωρητικότητας των υποδομών σε συγκεκριμένες γεωγραφικές ζώνες (Mytton, 2021; Lei & Masanet, 2022).

Δευτερευόντως, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κέντρων δεδομένων υπερβαίνει τα όρια της άμεσης ενεργειακής κατανάλωσης. Συγκεκριμένα, η χρήση υδατικών πόρων για συστήματα εξατμιστικής ψύξης καθίσταται κρίσιμη, ιδιαίτερα σε περιοχές με υδατική στενότητα, ενώ η ένταση άνθρακα της καταναλισκόμενης ενέργειας παρουσιάζει δραματικές διακυμάνσεις ανάλογα με τη γεωγραφική θέση και τη χρονική περίοδο λειτουργίας.

Τρίτον, οι συμβατικές διεπαφές με τα δίκτυα ηλεκτρισμού και τα υφιστάμενα επιχειρηματικά μοντέλα αντιμετωπίζουν τα κέντρα δεδομένων ως ανελαστικά φορτία. Αυτή η προσέγγιση περιορίζει τη συμμετοχή τους σε μηχανισμούς απόκρισης στη ζήτηση και στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών, οι οποίες θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη σταθερότητα του συστήματος και να επιφέρουν σημαντική μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους (Chen et al., 2020; Sheikholeslami et al., 2022).

Η ψύξη παραμένει ένα σημείο συμφόρησης. Καθώς η θερμική ισχύς/σχεδιασμός (TDP) του επεξεργαστή/τσιπ αυξάνεται, η παραδοσιακή ψύξη με αέρα υφίσταται μειωμένες αποδόσεις, αυξάνοντας την κατανάλωση ισχύος των ανεμιστήρων και οδηγώντας σε υψηλότερη PUE υπό θερμές και υγρές συνθήκες. Οι προηγμένες λύσεις υγρών και εμβάπτισης βελτιώνουν τη θερμοδυναμική απόδοση, αλλά εγείρουν νέα ερωτήματα σχετικά με τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και την αξιοπιστία, ενώ επίσης αλλάζουν τη θερμοκρασία και την ποιότητα της ανακτήσιμης θερμότητας (Haghshenas et al., 2023; Yuan et al., 2023). Επιπλέον, οι αποφάσεις χωροθέτησης συχνά κυριαρχούνται από το κόστος γης και την εγγύτητα του δικτύου, υποβαθμίζοντας την κλιματική καταλληλότητα, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

ενέργειας, την ένταση άνθρακα του δικτύου και το υδατικό στρες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστη απόδοση κύκλου ζωής και υψηλότερες εξωτερικές επιδράσεις (Zhang & Liu, 2022; Huang et al., 2020).

Τέλος, τα παραδοσιακά (μη «έξυπνα») συστήματα ισχύος δεν είναι βελτιστοποιημένα για αμφίδρομη ροή δεδομένων και έλεγχο με μεγάλα, ευέλικτα φορτία. Χωρίς αυτοματοποίηση, μέτρηση και μηχανισμούς αγοράς που εκτιμούν την χρονική ευελιξία και τη συμπεριφορά με επίγνωση του άνθρακα, τα κέντρα δεδομένων δεν μπορούν να αξιοποιήσουν την ευελιξία τους —π.χ., μετατοπίζοντας τα φορτία εργασίας στο χώρο και το χρόνο ή παρέχοντας ρύθμιση συχνότητας χρησιμοποιώντας γρήγορο περιορισμό ισχύος διακομιστή και αποθήκευση— και έτσι τα οφέλη του δικτύου και των εγκαταστάσεων παραμένουν ανεκμετάλλευτα (Wang et al., 2019; Lindberg et al., 2022; Chen et al., 2020).

Εν ολίγοις, το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει αυτή η διπλωματική είναι πώς να (i) μοντελοποιήσει και να μειώσει από κοινού το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κέντρων δεδομένων, (ii) να καταστήσει λειτουργική την ενσωμάτωσή τους σε έξυπνα δίκτυα για την αξιοποίηση της ευελιξίας και της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και (iii) να επιλέξει τοποθεσίες που επιτρέπουν εγγενώς καλύτερη θερμοδυναμική, οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση.

1.3 Σκοπός και ερευνητικοί στόχοι

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εισήγηση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου για τα κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς, το οποίο εναρμονίζεται με τις διεθνείς επιταγές για ενεργειακή αποδοτικότητα και κλιματική ουδετερότητα μέσω της λειτουργικής συνέργειας μεταξύ της ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και της στρατηγικής χωροθέτησης των εγκαταστάσεων.

Ειδικότερα, η έρευνα αποσκοπεί αρχικά στην ποσοτική αποτίμηση των ενεργειακών απαιτήσεων των σύγχρονων υποδομών, διεξάγοντας μια αναλυτική διερεύνηση των φορτίων υπολογιστικής ισχύος και των υποστηρικτικών συστημάτων, τα οποία συσχετίζονται με κλιματικές παραμέτρους, τεχνολογικές εναλλακτικές και ένα διευρυμένο φάσμα δεικτών αποδοτικότητας (Masanet et al., 2020; Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024).

Στη συνέχεια, η μελέτη επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της συνεισφοράς των έξυπνων δικτύων στη μείωση της κατανάλωσης και του λειτουργικού κόστους. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

της ανάλυσης μηχανισμών απόκρισης στη ζήτηση, της παροχής επικοινωνικών υπηρεσιών, καθώς και της ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και συστημάτων τοπικής αποθήκευσης που υποστηρίζουν λειτουργίες με επίγνωση του ανθρακικού αποτυπώματος (Wang et al., 2019; Chen et al., 2020; Sheikholeslami et al., 2022; Lindberg et al., 2022).

Επιπροσθέτως, η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη ενός ολιστικού πλαισίου λειτουργικής ολοκλήρωσης μεταξύ των κέντρων δεδομένων και των έξυπνων δικτύων. Το πλαίσιο αυτό καλύπτει το σύνολο της ιεραρχίας του συστήματος, από τις υποδομές αισθητήρων και τους μηχανισμούς ελέγχου έως τη συμμετοχή στις ενεργειακές αγορές και τη διαχείριση του φόρτου εργασίας με γνώμονα το ανθρακικό αποτύπωμα, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας (Lindberget al., 2021; Khalil et al., 2022; Asadov et al., 2025; Fu et al., 2025).

Τέλος, η μελέτη επικεντρώνεται στον προσδιορισμό και την αξιολόγηση βέλτιστων γεωγραφικών τοποθεσιών για την ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικών εγκαταστάσεων χαμηλών εκπομπών άνθρακα σε παγκόσμια κλίμακα. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζεται μια μέθοδος πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (MCDA), η οποία συνθέτει κλιματικές μεταβλητές, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την ένταση άνθρακα και την αξιοπιστία του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και παραμέτρους που αφορούν τη διαχείριση υδατικών πόρων, τις τηλεπικοινωνιακές υποδομές και το υφιστάμενο κανονιστικό πλαίσιο (Zhang & Liu, 2022; Huang et al., 2020).

1.4 Ερευνητικά ερωτήματα και υποθέσεις

Βασιζόμενη στους παραπάνω στόχους, η διπλωματική καθοδηγείται από τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα (EE) και υποθέσεις (Υ):

EE1 Πώς αλληλεπιδρούν οι κλιματικές συνθήκες και οι τεχνολογίες ψύξης για να διαμορφώσουν την PUE, την WUE και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας σε αντιπροσωπευτικά αρχέτυπα κέντρων δεδομένων;

Υ1. Οι τοποθεσίες με ευνοϊκό κλίμα για λειτουργία ελεύθερης ψύξης (χαμηλές θερμοκρασίες υγρού βολβού, χαμηλή υγρασία) και προηγμένη ψύξη (υγρή/εμβάπτιση) θα παρουσιάσουν σημαντικά χαμηλότερη PUE και WUE από τις θερμές/υγρές τοποθεσίες με ψύξη μόνο με αέρα, ελέγχοντας το φορτίο IT (Lei & Masanet, 2022; Haghshenas et al., 2023; Kim et al., 2024).

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

EE2 Ποιες είναι οι τεχνικές και οικονομικές δυνατότητες των κέντρων δεδομένων να συμμετέχουν σε υπηρεσίες απόκρισης ζήτησης και βοηθητικές υπηρεσίες χωρίς να παραβιάζουν συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών (SLAs);

Y2. Η σύζευξη περιορισμού ισχύος διακομιστή, η θερμική αποθήκευση και η περιορισμένη αναβολή φόρτου εργασίας μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστα ευέλικτη ισχύ/ισχύ απόκρισης υπολεπτού για ρύθμιση συχνότητας και μείωση αιχμής σε οικονομικά ελκυστικά επίπεδα, με περιορισμένο αντίκτυπο στην ποιότητα υπηρεσίας (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022).

EE3 Σε ποιο βαθμό μπορεί η χωροχρονική μετατόπιση φόρτου εργασίας και ο προγραμματισμός με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να μειώσουν τον λειτουργικό άνθρακα χωρίς υπερβολικό κόστος ή ποινές καθυστέρησης;

Y3. Η γεωγραφική μετατόπιση φορτίου με επίγνωση του άνθρακα σε περιοχές με ποικίλους οριακούς παράγοντες εκπομπών μειώνει σημαντικά τις λειτουργικές εκπομπές (>10–20% σε αντιπροσωπευτικά σενάρια), ειδικά όταν ευθυγραμμίζεται με τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τα δυναμικά σήματα δικτύου (Lindberg et al., 2022; Lindberg et al., 2021; Khalil et al., 2022; Asadov et al., 2025).

EE4 Πώς σταθμίζονται/συνδυάζονται οι παράγοντες χωροθέτησης —κλίμα, ένταση και αξιοπιστία άνθρακα του δικτύου, ανανεώσιμοι πόροι, διαθεσιμότητα νερού, εγγύτητα δικτύου και κίνητρα πολιτικής— στον προσδιορισμό των βέλτιστων τοποθεσιών;

Y4. Η MCDA που λαμβάνει από κοινού υπόψη την καταλληλότητα του κλίματος, την πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα και την αξιοπιστία θα εντοπίσει ομάδες τοποθεσιών που ξεπερνούν σε απόδοση τις συνήθως επιλεγμένες τοποθεσίες τόσο σε μετρήσεις κόστους όσο και σε περιβαλλοντικές μετρήσεις (Zhang & Liu, 2022; Huang et al., 2020; Lindberg et al., 2022).

1.5 Συνεισφορές

Η παρούσα διπλωματική εργασία συνθέτει θεωρητικές προσεγγίσεις από τους τομείς της μηχανικής των κέντρων δεδομένων, των συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος και της επιστήμης της βιωσιμότητας, προκειμένου να πλαισιώσει το κέντρο δεδομένων ως ένα συν-βελτιστοποιημένο κυβερνο-φυσικό-ενεργειακό σύστημα. Η συμβολή της έρευνας έγκειται στην ενοποίηση θερμοδυναμικών μοντέλων ψύξης και κλιματικά εξαρτώμενων εκτιμήσεων των δεικτών PUE

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

και WUE με μοντέλα αλληλεπίδρασης δικτύου και μεθόδους χρονοπρογραμματισμού με επίγνωση του ανθρακικού αποτυπώματος. Μέσω αυτής της ολιστικής προσέγγισης, παρέχεται ένα δομημένο αναλυτικό πλαίσιο για τη διερεύνηση των αμοιβαίων οφελών μεταξύ των υποδομών της εγκατάστασης και του ηλεκτρικού δικτύου. (Lei & Masanet, 2022; Lindberget al., 2022)

Μεθοδολογικά, η εργασία συνδυάζει (i) μοντελοποίηση φορτίου από κάτω προς τα πάνω και θερμικής μοντελοποίησης για αντιπροσωπευτικά αρχέτυπα κέντρων δεδομένων, (ii) ανάλυση βασισμένη σε σενάρια των οδών ενσωμάτωσης έξυπνων δικτύων (απόκριση στη ζήτηση, βοηθητικές υπηρεσίες, μικροδίκτυα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας/αποθήκευση επί τόπου) και (iii) μια αναπαραγωγίμη MCDA για χωροθέτηση χρησιμοποιώντας ανοιχτά δεδομένα για το κλίμα, το δίκτυο και τις υποδομές (Wang et al., 2019; Chen et al., 2020; Zhang & Liu, 2022). Η MCDA θα υποβληθεί σε έλεγχο ευρωστίας με ανάλυση ευαισθησίας σε βάρη και αβεβαιότητα δεδομένων. Η διπλωματική ενσωματώνει επίσης μελέτες περιπτώσεων που επικυρώνουν τις προβλέψεις μοντέλων σε σχέση με πραγματικές εγκαταστάσεις και περιβάλλοντα ενεργειακών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων τεκμηριωμένων ενσωματώσεων ανάκτησης θερμότητας (Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023; Corigliano et al., 2024; Kim et al., 2022).

Πρακτικά, η διπλωματική παρέχει ένα πλαίσιο λήψης αποφάσεων χωροθέτησης και λειτουργίας που οι φορείς εκμετάλλευσης, οι επενδυτές και οι σχεδιαστές/φορείς χωρικού σχεδιασμού μπορούν να χρησιμοποιήσουν για να επιλέξουν τοποθεσίες που ελαχιστοποιούν το κόστος ζωής, τον κίνδυνο άνθρακα και νερού, να σχεδιάσουν συστήματα ψύξης και ενέργειας προσαρμοσμένα στις τοπικές κλιματικές συνθήκες και τις συνθήκες του δικτύου και να αξιοποιήσουν την ευελιξία μέσω της συμμετοχής στο δίκτυο, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα υπηρεσίας. Για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν ποιοι σχεδιασμοί αγοράς, τιμολόγια και κίνητρα απελευθερώνουν καλύτερα την ευελιξία των κέντρων δεδομένων, επιταχύνουν την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μετριάζουν τους τοπικούς περιορισμούς του δικτύου (Lindberg et al., 2021; Sheikholeslami et al., 2022; Khalil et al., 2022). Η ανάλυση επαναχρησιμοποίησης θερμότητας τροφοδοτεί επίσης τον αστικό ενεργειακό σχεδιασμό, δείχνοντας πότε και πού η απορριπτόμενη θερμότητα των κέντρων δεδομένων μπορεί να απανθρακοποιήσει οικονομικά την τηλεθέρμανση (Huang et al., 2020; Yuan et al., 2023; Montagud-Montalvá et al., 2023).

1.6 Δομή της διπλωματικής

Η διπλωματική οργανώνεται σε δέκα κεφάλαια για να καθοδηγήσει τον αναγνώστη από το υπόβαθρο στις μεθόδους, τα αποτελέσματα και τα εφαρμόσιμα συμπεράσματα. Ξεκινώντας με το 1^ο Κεφάλαιο, την Εισαγωγή, καθορίζει το πλαίσιο, το πρόβλημα, τους στόχους, τα ερευνητικά ερωτήματα, τις υποθέσεις, τις συνεισφορές και τη συνολική δομή. Στην συνέχεια, το Κεφάλαιο 2 με τίτλο «Θεωρητικό υπόβαθρο» εξετάζει τις αρχιτεκτονικές κέντρων δεδομένων (IT, συστήματα ισχύος και ψύξης), τα τυπικά μετρικά απόδοσης (PUE, WUE, CUE, ERE) και τις έννοιες των έξυπνων δικτύων (DERMS, απόκριση στη ζήτηση, βοηθητικές υπηρεσίες, μικροδίκτυα, προγραμματισμός με επίγνωση του άνθρακα). Ερευνά πώς οι επιλογές του κλίματος και της τεχνολογίας αλληλεπιδρούν για να διαμορφώσουν την ενεργειακή και υδατική απόδοση και εισάγει σχετικά πρότυπα και κανονιστικά πλαίσια (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024; Mytton, 2021). Στο Κεφάλαιο 3 πραγματοποιείται ανασκόπηση βιβλιογραφίας, όπου εξετάζονται εμπειρικά δεδομένα σχετικά με τις τάσεις ενέργειας στα κέντρα δεδομένων, τις προκλήσεις μέτρησης και τις μεθοδολογικές συζητήσεις (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022), συνοψίζοντας τις πιο σύγχρονες στρατηγικές ψύξης και ανάκτησης θερμότητας (Yuan et al., 2023; Haghshenas et al., 2023; Huang et al., 2020) και αναλύοντας μελέτες σχετικά με την ενσωμάτωση στο δίκτυο και τη γεωγραφική μετατόπιση φορτίου (Wang et al., 2019; Chen et al., 2020; Lindberg et al., 2021, 2022). Στο Κεφάλαιο 4 καταγράφεται η μεθοδολογία, και συγκεκριμένα εδώ περιγράφονται ο σχεδιασμός μικτών μεθόδων: η απόκτηση και προεπεξεργασία δεδομένων, η ενεργειακή και θερμική μοντελοποίηση, ο ορισμός σεναρίων ενσωμάτωσης έξυπνων δικτύων (βασικό σενάριο, υπηρεσίες DR/βοηθητικές υπηρεσίες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποθήκευση επί τόπου, λειτουργίες με επίγνωση του άνθρακα) και η MCDA για την χωροθέτηση, συμπεριλαμβανομένων κριτηρίων, κανονικοποίησης, στάθμισης, δυνατότητας αξιοποίησης GIS και ανάλυσης ευαισθησίας (Zhang & Liu, 2022; Khalil et al., 2022; Fu et al., 2025; Asadov et al., 2025). Στο Κεφάλαιο 5 θα αναλυθούν τα αποτελέσματα υπ' αριθμ. I, δηλαδή τα ενεργειακά προφίλ των κέντρων δεδομένων, και παράλληλα παρουσιάζει την ανάλυση φορτίου βάσης, τις εκτιμήσεις PUE/WUE που συνδέονται με το κλίμα σε αρχέτυπα και τεχνολογίες ψύξης, και τα εύρη αβεβαιότητας (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024). Στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα Αποτελέσματα υπ' αριθμ. II, όπως ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων, με ανάλυση του δυναμικού DR και βοηθητικών υπηρεσιών, το λειτουργικό κόστος και τις επιπτώσεις στις εκπομπές, καθώς και τις επιπτώσεις στην ποιότητα

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

υπηρεσίας του περιορισμού ισχύος των διακομιστών, της αναβολής του φόρτου εργασίας και της αποθήκευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί τόπου (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022). Το Κεφάλαιο 7 πραγματεύεται τα αποτελέσματα υπ' αριθμ. ΙΙΙ, όπως επιλογή τοποθεσίας (MCDA/GIS), ενώ παρουσιάζει ένα πλαίσιο βαθμολόγησης χωροθέτησης και αναλύει κατηγορίες υποψήφιων τοποθεσιών και διερευνά τους συμβιβασμούς μεταξύ του κλίματος, της έντασης και της αξιοπιστίας άνθρακα του δικτύου, του κινδύνου υδάτων και των υποδομών, με ελέγχους ανθεκτικότητας (Zhang & Liu, 2022; Lindberg et al., 2022; Huang et al., 2020). Αντιστοίχως, στο Κεφάλαιο 8 αναλύονται οι μελέτες περίπτωσης, και πιο συγκεκριμένα οι περιπτώσεις Google Hamina, Meta Luleå και Stockholm Open District Heating, καθώς και ένα βιβλιογραφικά τεκμηριωμένο σενάριο έξυπνου δικτύου (Dvořák et al., 2020; Kim et al., 2022; Montagud-Montalvá et al., 2023; Corigliano et al., 2024). Στο Κεφάλαιο 9 πραγματοποιείται η συζήτηση, με ερμηνεία των αποτελεσμάτων υπό το πρίσμα προηγούμενης εργασίας, συζητώντας τους περιορισμούς (ποιότητα δεδομένων, γενικευσιμότητα, υποθέσεις μοντελοποίησης) και σκιαγραφώντας μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, όπως η εννοχήστρωση με επίγνωση του άνθρακα για φόρτους εργασίας τεχνητής νοημοσύνης, η αξιοπιστία της ψύξης υγρού/εμβάπτισης και τα επιχειρηματικά μοντέλα για την επαναχρησιμοποίηση θερμότητας (Mytton & Ashtine, 2022; Yuan et al., 2023). Εν κατακλείδι, στο Κεφάλαιο 10 καταλήγει η έρευνα σε συμπεράσματα και συστάσεις, με σύνθεση βασικών ευρημάτων, προτάσεις για ένα σχέδιο για κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς, διαδραστικά με το δίκτυο και ευθυγραμμισμένα με το κλίμα, και με προσφορές συστάσεων πολιτικής και κλάδου με βραχυπρόθεσμους, μεσοπρόθεσμους και μακροπρόθεσμους χάρτες πορείας (Lindberg et al., 2021; Lindberg et al., 2022; Chen et al., 2020).

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Αρχιτεκτονική κέντρου δεδομένων: Φορτίο IT, ηλεκτρική αλυσίδα τροφοδοσίας (UPS), ψύξη (CRAC/CRAH, ελεύθερη ψύξη, υγρό) και δομή δικτύου

Τα σύγχρονα κέντρα δεδομένων είναι κυβερνο-φυσικές υποδομές όπου τα ηλεκτρικά, θερμικά και ψηφιακά υποσυστήματα πρέπει να σχεδιάζονται από κοινού. Εν αρχή, το συνολικό φορτίο εγκατάστασης προκύπτει ως το άθροισμα του φορτίου IT (διακομιστές, αποθήκευση και διακόπτες δικτύου) και του μη IT φορτίου (απώλειες μετατροπής και διανομής ισχύος, ψύξη και αφύγρανση, φωτισμός, ασφάλεια) (Yuan et al., 2023). Στο φορτίο IT κυριαρχούν ολοένα και περισσότερο οι επιταχυντές υψηλής ισχύος (GPU/TPU) και η πυκνή μνήμη, που αυξάνει την πυκνότητα της ισχύος ανά ικρίωμα και τη ροή θερμότητας. Παρόλο που η ενεργειακή ανάπτυξη σε ολόκληρο τον τομέα ιστορικά μετριάστηκε από ραγδαίες βελτιώσεις στην απόδοση (εικονικοποίηση, ενοποίηση διακομιστών και καλύτερη διαχείριση ισχύος) (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022), η εξέλιξη των τεχνολογιών AI και ML πολλαπλασιάζει την στιγμιαία και την τοπική πυκνότητα ισχύος, με αποτέλεσμα τα συστήματα ισχύος και ψύξης να κρίνονται καθοριστικά τόσο για τη χρήση ενέργειας όσο και για την αξιοπιστία της.

Σε τυπικές αρχιτεκτονικές, η παροχή μέσης τάσης επιτρέπει τη χαμηλή τάση μέσω υποσταθμών και διακοπών και εν συνεχεία τη διανομή ενέργειας μέσω αδιάλειπτων τροφοδοτικών, μονάδων διανομής ισχύος (PDU) και κυκλωμάτων διακλάδωσης σε ικρίωματα (Yuan et al., 2023). Οι τοπολογίες UPS αποτελούνται από συστήματα διπλής μετατροπής online, διαδραστικά με γραμμή και ολοένα και περισσότερο συστήματα με μπαταρία ιόντων λιθίου που επιτρέπουν γρήγορη διατήρηση τροφοδοσίας κατά διαταραχές και την συμμετοχή σε υπηρεσίες δικτύου (π.χ. ρύθμιση/απόκριση συχνότητας) εφόσον γίνεται επιτρεπτό από κώδικες και κανόνες διασύνδεσης (Wang et al., 2019). Οι απώλειες διαφάνονται σε κάθε στάδιο (μετασχηματιστές, ανορθωτές/μετατροπείς) ενώ οι καμπύλες απόδοσης έχουν εξάρτηση από το φορτίο, και συνεπώς, η λειτουργία με μερικό φορτίο και το ορθή απόδοση διάστασης είναι κρίσιμης σημασίας για την μείωση των απωλειών μετατροπής (Lei & Masanet, 2022).

Η ψύξη συνήθως συνδυάζει μονάδες κλιματισμού/χειρισμού αέρα αίθουσας υπολογιστών (CRAC/CRAH), ελεύθερη ψύξη στην πλευρά του αέρα ή του νερού, ψύκτες με πύργους ψύξης και στρατηγικές συγκράτησης (θερμός διάδρομος/κρύος διάδρομος). Όταν οι εξωτερικές θερμοκρασίες υγρού βολβού πέφτουν κάτω από τις θερμοκρασίες αέρα επιστροφής/νερού η μηχανική ψύξη παρακάμπτεται από τους εξοικονομητές, μειώνοντας την ενέργεια ψύξης και συνεπώς οδηγώντας σε βελτίωση του δείκτη PUE (Kim et al., 2024; Lei & Masanet, 2022). Για ράφια υψηλής ροής θερμότητας, η υγρή ψύξη - εναλλάκτες οπίσθιας θύρας RDHx, οι ψυχρές πλάκες απευθείας στο τσιπ και η ψύξη με εμβάπτιση - δύναται να αυξήσουν δραστικά τους συντελεστές μεταφοράς της θερμότητας και να μειώσουν την μη επικερδή ισχύ του ανεμιστήρα, ενώ ταυτοχρόνως αυξάνουν τις θερμοκρασίες εξόδου του ψυκτικού μέσου, αναβαθμίζοντας την ποιότητα της ανακτήσιμης θερμότητας για τα δίκτυα τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης είτε για τους κύκλους παραγωγής (Yuan et al., 2023; Haghshenas et al., 2023; Huang et al., 2020). Επιπλέον, οι επιλογές ανάκτησης θερμότητας υλοποιούνται από αντλίες θερμότητας πηγής νερού για παροχή τηλεθέρμανσης με χαμηλή θερμοκρασία (Kim et al., 2022; Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023) έως και οργανικούς κύκλους Rankine, όταν γίνεται επιτρεπτό από τις αυξήσεις της θερμοκρασίας και τα οικονομικά (Corigliano et al., 2024).

Το δίκτυο αποτελεί σημαντικό παράγοντα ενέργειας και χωροθέτησης. Εντός της εγκατάστασης, οι σύγχρονες αρχιτεκτονικές leaf-spine με συνδέσεις 100–400 GbE ενώ μειώνουν την υπερσυνδρομή έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητα ισχύος διακόπτη και δημιουργούν τοπικά θερμά σημεία. Εκτός της εγκατάστασης, η εγγύτητα σε υποδομές dark-fiber, ανταλλαγές διαδικτύου και σημεία προσαιγιάλωσης υποθαλάσσιων καλωδίων επηρεάζει την καθυστέρηση, τον πλεονασμό και έχει οικονομικό αντίκτυπο χωροθέτησης (Yuan et al., 2023). Οι επιλογές σύνδεσης στο δίκτυο και η πρόσβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθορίζονται επιπλέον και με τον παράγοντα της γεωγραφίας (Zhang & Liu, 2022; Lindberg et al., 2022).

Ένα σύνολο αισθητήρων που αποτελούνται από μετρητές ισχύος ανά rack, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας, διαφορικής πίεσης, μετρητές ροής καθώς και έξυπνοι διακόπτες παρέχουν δεδομένα στα συστήματα DCIM/BMS και υλοποιούν ελέγχους κλειστού βρόχου για δεδομένες τιμές θερμοκρασίας, ανεμιστήρες και αντλίες μεταβλητής ταχύτητας και λειτουργία οικονομητήρα (Yuan et al., 2023). Η συγκομιδή και μέτρηση των παραπάνω δεδομένων κρίνεται σημαντική για την ανάπτυξη στρατηγικών αλληλεπίδρασης με το δίκτυο (Ενότητες 2.3–2.4), σε

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

περιπτώσεις που απαιτείται γρήγορη διαμόρφωση ισχύος (Wang et al., 2019; Sheikholeslami et al., 2022).

2.2 Δείκτες ενεργειακής απόδοσης και βιωσιμότητας: PUE, DCiE, WUE, CUE, ERE, pPUE

Ο κυριότερος δείκτης είναι η Αποτελεσματικότητα Χρήσης Ενέργειας (PUE) και συνίσταται στον λόγο της συνολικής χρήσης ενέργειας της εγκατάστασης προς την ενέργεια IT εξοπλισμού. Η τιμή PUE 1,0 αντιπροσωπεύει μια ιδανική εγκατάσταση με μηδενικά μη-IT φορτία και υποδομές. Ο δείκτης DCiE αποτελεί το αντίστροφο του PUE και παρότι είναι απλός αναφέρεται ευρέως. Ο δείκτης PUE εξαρτάται από το κλίμα και την τεχνολογία, ποικίλλει ανάλογα με τις ώρες λειτουργίας του οικονομητή, τη μέθοδο απόρριψης θερμότητας, τα σημεία ρύθμισης, τη συγκράτηση και την υιοθέτηση υγρής ψύξης (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024). Επομένως, οι συγκρίσεις μεταξύ τοποθεσιών εξαρτώνται και ποικίλλουν τόσο σε σχέση με τον καιρό και όσο και με τις συνθήκες λειτουργίας του διατιθέμενου εξοπλισμού.

Η Αποτελεσματικότητα Χρήσης Νερού (WUE) καταγράφει τη συνολική κατανάλωση νερού ανά μονάδα ενέργειας IT (π.χ., L/kWh). Το WUE διαχωρίζει την εξατμιστική από την ξηρή απόρριψη θερμότητας. Τα συστήματα έμμεσης και άμεσης εξάτμισης συχνά αποδίδουν χαμηλότερη PUE αλλά εμφανίζουν αύξηση στο δείκτη WUE, αναδεικνύοντας τους συμβιβασμούς νερού και ενέργειας, με έμφαση στις άνυδρες περιοχές (Mytton, 2021; Lei & Masanet, 2022). Επιπροσθέτως, ο δείκτης Αποτελεσματικότητας Χρήσης Άνθρακα (CUE) συσχετίζει τις λειτουργικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου με την ενέργεια πληροφορικής, ενσωματώνοντας την ένταση του άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται χρονικά και χωρικά. Ο προγραμματισμός με επίγνωση του άνθρακα και η γεωγραφική μετατόπιση φορτίου μπορούν να μειώσουν τον δείκτη CUE χωρίς να αθιζθούν σημαντικά οι δαπάνες κεφαλαίου (Lindberg et al., 2022; Lindberg et al., 2021).

Η ενσωμάτωση της χρήσιμης εξαγόμενης θερμότητας επιτυγχάνεται με την χρήση του δείκτη της Αποτελεσματικότητας Επαναχρησιμοποίησης Ενέργειας (ERE). Ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής επαναχρησιμοποιούμενης ενέργειας προς την ενέργεια IT φόρτου. Προσμετρώντας τη θερμότητα η οποία παρέχεται σε τηλεθέρμανση ή βιομηχανικές λειτουργίες ο δείκτης ERE αναπαριστά την αξία της ανάκτησης θερμότητας (Huang et al., 2020; Dvořák et

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

al., 2020; Yuan et al., 2023). Τέλος, με τον δείκτη $pPUE$ αναπαρίστανται τα συνολικά έξοδα υποσυστήματος χωρισμένα ανά ζώνες (π.χ., ένα δοχείο, μια αίθουσα ή ένα νησί ψύξης), επιτρέποντας την λεπτομερή βελτιστοποίηση (Lei & Masanet, 2022). Το σύνολο αυτών των δεικτών, που τυποποιούνται με τη σειρά προτύπων ISO/IEC 30134, αναδεικνύουν την πολυδιάστατη μορφή της ενεργειακής απόδοσης (Yuan et al., 2023). Για να επιτευχθεί στην πράξη μία αποδοτική συγκριτική αξιολόγηση απαιτούνται συνέπεια και αυστηρότητα στα όρια μέτρησης, στα εποχιακά προφίλ και στη γνωστοποίηση των κλιματικών δεδομένων και συντελεστών φορτίου για να αποφευχθούν ενδεχόμενες παραπλανητικές συγκρίσεις (Mytton & Ashtine, 2022; Lei & Masanet, 2022).

2.3 Έξυπνα δίκτυα: αρχές (ανίχνευση/SCADA/DERMS/DR), VPPs, απόκριση στη ζήτηση και προηγμένη μέτρηση

Τα έξυπνα δίκτυα επικαλύπτουν το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διάχυτη ανίχνευση, επικοινωνίες και αυτοματισμό για τον συντονισμό καταναεμημένων ενεργειακών πόρων, των ευέλικτων φορτίων και της συμβατικής παραγωγής. Τα έξυπνα δίκτυα περιλαμβάνουν α) Αισθητήρες σύγχρονης μετρητικής τεχνολογίας AMI, οι οποίοι μέσω υψηλής ανάλυσης και υπομέτρησης καταγράφουν την κατανάλωση χρόνου χρήσης και την ποιότητα ισχύος (Yuan et al., 2023). Οι μονάδες μέτρησης φάσης τροφοδοτούν με δεδομένα τα δίκτυα μεταφοράς. β) Ενσωμάτωση συλλογής δεδομένων SCADA και εποπτικού ελέγχου με την χρήση συστημάτων BMS/DCIM που επιτρέπουν εποπτεία των συσκευών πεδίου. Κατά την εγκατάσταση, τα BMS/DCIM εκθέτουν μετρήσεις ισχύος και θερμότητας σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στα εξωτερικά σήματα ελέγχου να μετατρέπονται σε ασφαλή διαμόρφωση φορτίου (Wang et al., 2019). γ) Σύστημα Διαχείρισης Καταναεμημένων Ενεργειακών Πόρων που βελτιστοποιεί την αποστολή επιτόπιων φωτοβολταϊκών, αποθηκευτικών, ελεγχόμενων φορτίων και φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων, ενσωματώνοντας τους περιορισμούς της αγοράς. δ) Απόκριση στη ζήτηση όπου με τη χρήση συμβατικών μηχανισμών ή μηχανισμών της αγοράς παρέχονται κίνητρα για μείωση και χωρική ή χρονική μετατόπιση του φορτίου ως απόκριση στην εμφάνιση στρες συστήματος, απότομων αυξήσεων τιμών ή αναγκών για βοηθητικές υπηρεσίες (Lindberg et al., 2022; Lindberg et al., 2021).

Τα κέντρα δεδομένων αποτελούν ευέλικτους κόμβους που αναγκαιεί να λειτουργούν ως ελκυστική πάροχη καθώς συγκεντρώνουν χιλιάδες διακομιστές ενεργειακής αναλογικότητας που

διαθέτουν την ικανότητα περιορισμού, να τεθούν σε αδράνεια ή να μετατοπιστούν εντός αυστηρών ορίων SLA, διαθέτοντας επιπλέον UPS μπαταρίας ακριβή ικανότητα παροχής απόκρισης υποδευτερολέπτου (Wang et al., 2019). Η έρευνα δείχνει ότι με χρήση ελέγχου με επίγνωση QoS, τα κέντρα δεδομένων μπορούν να προσφέρουν ρύθμιση συχνότητας και μείωση της μέγιστης ισχύος, ενώ παράλληλα περιορίζουν τις επιπτώσεις στην απόδοση (Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022). Πέρα από τη χρονική ευελιξία, η χωρική ευελιξία, που συνίσταται στη γεωγραφική μετατόπιση φορτίου μεταξύ περιοχών, εκμεταλλεύεται την ετερογένεια στις οριακές εκπομπές, τις τιμές και τη συμφόρηση (Lindberg et al., 2022; Lindberg et al., 2021).

Σε κλίμακα χαρτοφυλακίου, η συγκέντρωση πολλαπλών τοποθεσιών δινεμημένων ενεργειακών πόρων αποδίδει έναν εικονικό σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ικανό να συμμετέχει σε βοηθητικές αγορές. Η στοίβα ενεργοποίησης είναι: (i) τηλεμετρία και προβλέψεις (φορτίο IT, παραγωγή ΑΠΕ, θερμική κατάσταση), (ii) βελτιστοποίηση με σεβασμό στη θερμική αδράνεια και τους περιορισμούς SLA (Wang et al., 2019), και (iii) διεπαφές αγοράς και διαλειτουργικότητα. Όταν περιλαμβάνονται σήματα άνθρακα (οριακές εκπομπές ή ένταση CO₂ σε πραγματικό χρόνο) ένας εικονικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να υποστηρίξει την αποστολή με επίγνωση του άνθρακα (Khalil et al., 2022; Asadov et al., 2025).

2.4 Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης: ηλιακή/αιολική/υδροηλεκτρική/βιομάζα, μπαταρίες, υδρογόνο

Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να γίνει επί τόπου (π.χ., φωτοβολταϊκά σε στέγη/στέγαστρα, αιολική ενέργεια πίσω από τον μετρητή όπου είναι εφικτό) ή εκτός τόπου μέσω PPA και πράσινων τιμολογίων (Wang et al., 2019). Τα επί τόπου φωτοβολταϊκά συνήθως αντισταθμίζουν ένα μέτριο ποσοστό του φορτίου λόγω περιορισμών στην επιφάνεια της στέγης, αλλά σε συνδυασμό με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας από μπαταρίες μπορούν να μειώσουν την ζήτηση σε στιγμές αιχμής και να παρέχουν υποστήριξη (Lei & Masanet, 2022). Η αιολική ενέργεια βρίσκεται κυρίως εκτός των εγκαταστάσεων για υπερκλίμακες κέντρων δεδομένων, ενώ η πρόσβαση στην υδροηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται από τα περιφερειακά δίκτυα και μπορεί να παρέχει προφίλ χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η βιομάζα είναι σπανιότερη επί τόπου, αλλά μπορεί να εμφανιστεί σε ενεργειακά περιβάλλοντα περιοχής (Huang et al., 2020).

Η αποθήκευση λειτουργεί σε πολλαπλές χρονικές κλίμακες. Οι μπαταρίες UPS συχνότερα τύπου ιόντων λιθίου, παρέχουν δυνατότητα επαναφόρτισης από δευτερόλεπτα έως λεπτά και μπορούν να αξιοποιηθούν για υπηρεσίες συχνότητας με κατάλληλο έλεγχο και εγγυήσεις (Wang et al., 2019). Τα συστήματα αποθήκευσης μπαταριών BESS, με μέγεθος από δεκάδες λεπτά έως μερικές ώρες, επιτρέπει την εξάλειψη των κορυφών, την αποθήκευση της ενέργειας σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης και εκμετάλλευσης της σε διαστήματα αιχμής, καθώς και την ενίσχυση της φωτοβολταϊκής ή αιολικής ενέργειας επί τόπου. Η θερμική αποθήκευση μέσω δεξαμενών κρύου νερού ή υλικών αλλαγής φάσης, μετατοπίζει την ενέργεια ψύξης κατά τη διάρκεια των ωρών, αποσυνδέοντας στιγμιαία τη λειτουργία των ψυκτών από τις αιχμές των κορυφών του φορτίου και τις αυξήσεις των τιμών. Η έρευνα και οι υπάρχουσες εφαρμογές, δείχνουν ότι ο συνδυασμός του περιορισμού ή της αναβολής του φορτίου με τη αποθήκευση θερμότητας μπορεί να παρέχει ευελιξία στη χωρητικότητα με μειωμένο αντίκτυπο στην ποιότητα υπηρεσίας (Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022).

Μια σύγχρονη διάσταση στον τομέα της ενέργειας δίνει επιπλέον το υδρογόνο, είτε ως φορέα αποθήκευσης μακράς διάρκειας, είτε ως καύσιμο για την εφεδρική ηλεκτροπαραγωγή. Παρότι πολλά υποσχόμενο για την απαλλαγή από τον άνθρακα, το υδρογόνο παρουσιάζει πολυπλοκότητες χωροθέτησης, ασφάλειας και οικονομίας που δεν έχουν ακόμη ελεγχθεί πλήρως από τα πρότυπα και τις αγορές (Wang et al., 2019). Για την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας, η σύνδεση των υδρόψυκτων ραφιών με αντλίες θερμότητας νερού μπορεί να παρέχει τηλεθέρμανση σε χρήσιμες θερμοκρασίες, όπου το επιτρέπει η εξέργεια, οι διατάξεις ORC επιχειρούν περιορισμένη ανάκτηση ισχύος από ψυκτικό υψηλότερης θερμοκρασίας (Yuan et al., 2023; Corigliano et al., 2024; Kim et al., 2022; Dvořák et al., 2020).

Ιδιαίτερη σημασία για τη βιωσιμότητα του συστήματος παρουσιάζει η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των υποδομών αποθήκευσης σε άμεση συνάρτηση με τη χωροθέτηση του υπολογιστικού φόρτου (Wang et al., 2019). Ο προγραμματισμός με επίγνωση του άνθρακα και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατευθύνει εργασίες δέσμης ή εργασίες ανεκτικές στην καθυστέρηση σε χρονικά παράθυρα και τοποθεσίες με καθαρή, φθηνή ενέργεια (Lindberg et al., 2022; Khalil et al., 2022). Σε πρόσφατη έρευνα, μελετήθηκε η τεχνική της μεταφοράς δοχείων σε συστήματα πολλαπλών κέντρων δεδομένων για την παρακολούθηση της διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ παράλληλα υπήρξε μείωση του κόστους καθυστέρησης (Fu et al., 2025) και μεταφορά των δοχείων από το άκρο στο

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

νέφος καθοδηγούμενη από το συνολικό αποτύπωμα άνθρακα που παράγεται (Asadon et al., 2025).

2.5 Ρυθμιστικό και πολιτικό τοπίο: στόχοι και πρότυπα κλιματικής ουδετερότητας (π.χ., σειρά ISO/IEC 30134)

Οι παράγοντες πολιτικής και τα πρότυπα πλαισιώνουν τόσο τα κίνητρα της αγοράς όσο και τη συνέπεια των μετρήσεων. Πολλές δικαιοδοσίες έχουν στόχους καθαρών μηδενικών εκπομπών και κλιματικής ουδετερότητας σε ορίζοντες στα μέσα του αιώνα, με ενδιαμέσως ορόσημα που επηρεάζουν τα χαρτοφυλάκια προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας, τους οικοδομικούς κανονισμούς, τις εντολές απόδοσης και τις μη CO₂ εξωτερικές επιπτώσεις (όπως το νερό) (Wang et al., 2019). Για τους φορείς εκμετάλλευσης, αυτό μεταφράζεται σε: (i) απαιτήσεις αναφοράς για την ενέργεια και τις εκπομπές, (ii) πλαίσια προμηθειών που ευνοούν ή απαιτούν ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια (π.χ., συμβάσεις αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας, πιστοποιητικά με χρονική αντιστοίχιση), (iii) κανόνες διασύνδεσης για παραγωγή και αποθήκευση πίσω από τον μετρητή και (iv) πρόσβαση στην αγορά απόκρισης ζήτησης και βοηθητικών υπηρεσιών που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα φορτία μπορούν να προσφέρουν ευελιξία (Sheikholeslami et al., 2022; Lindberg et al., 2022).

Από την πλευρά της τυποποίησης, η σειρά ISO/IEC 30134 ορίζει και διευκρινίζει βασικές μετρήσεις: PUE/DCiE (-2), WUE (-9), ERE (-6), CUE (-3) και σχετικούς KPI. Αυτά τα πρότυπα καθορίζουν τα όρια μέτρησης, τις τοποθεσίες μέτρησης και τις πρακτικές αναφοράς· π.χ., εάν θα συμπεριληφθεί η παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί τόπου ως μειωτική ισχύς εγκατάστασης ή ως εξαγόμενη ενέργεια στη λογιστική ERE. Η συνέπεια είναι ζωτικής σημασίας: χωρίς τυποποιημένα όρια και χρονικές βάσεις, οι PUE και οι WUE δεν είναι συγκρίσιμες (Mytton & Ashtine, 2022; Lei & Masanet, 2022). Πρόσθετες οδηγίες του κλάδου προέρχονται από θερμικά περιβλήματα, όπως επιτρεπόμενα εύρη θερμοκρασίας και υγρασίας τροφοδοσίας για εξοπλισμό πληροφορικής, τα οποία επηρεάζουν άμεσα τις στρατηγικές σημείου ρύθμισης και τη χρήση του οικονομητήρα (Kim et al., 2024; Yuan et al., 2023).

Η πολιτική διαμορφώνει επίσης την χωροθέτηση. Οι κανόνες σχεδιασμού μπορεί να απαιτούν εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συμπεριλαμβάνουν τον θόρυβο, την απόρριψη θερμότητας, τη χρήση νερού και τις αναβαθμίσεις του δικτύου, ενώ ενδέχεται να υπάρχουν κίνητρα για την τοποθέτηση σε καθορισμένα ενεργειακά πάρκα ή ζώνες δικτύου

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

θέρμανσης, όπου είναι διαθέσιμη η απορρόφηση απορριπτόμενης θερμότητας (Kim et al., 2024). Αντίθετα, οι περιοχές με λειψυδρία μπορεί να αποθαρρύνουν την εξατμιστική ψύξη μέσω τιμολόγησης, αδειοδότησης ή πλήρων απαγορεύσεων κατά τη διάρκεια συνθηκών ξηρασίας, ωθώντας τα σχέδια προς ξηρούς ψύκτες ή υγρούς βρόχους (Mytton, 2021). Όπου οι κανόνες της αγοράς ανταμείβουν την γρήγορη απόκριση συχνότητας και χωρητικότητα, τα διαδραστικά με το δίκτυο κέντρων δεδομένων δύναται να αποκομίσουν νέες ροές εσόδων, βελτιώνοντας την επιχειρηματική σκοπιμότητα για τα συστήματα αποθήκευσης και τους προηγμένους ελέγχους (Wang et al., 2019; Sheikholeslami et al., 2022).

2.6 Γεωγραφία και κλίμα: HDD/CDD, υγρασία, υψόμετρο και πρόσβαση σε δίκτυα και υποθαλάσσια καλώδια

Η γεωγραφία συνδέει τη θερμοδυναμική, την ένταση άνθρακα του δικτύου, τον κίνδυνο νερού και τη συνδεσιμότητα. Το κλίμα επηρεάζει τόσο την ενέργεια ψύξης, εξ ου και η χρήση του δείκτη PUE, όσο και τη δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας: α) Οι βαθμοημέρες ψύξης (CDD) και οι βαθμοημέρες θέρμανσης (HDD) συνοψίζουν τη ζήτηση ψύξης ή θέρμανσης. Τα κλίματα χαμηλών βαθμοημερών ψύξης, με χαμηλή θερμοκρασία υγρού βολβού, επιτρέπουν μεγάλες περιόδους εξοικονόμησης και υψηλότερα σημεία ρύθμισης αέρα τροφοδοσίας, μειώνοντας το έργο του συμπιεστή (Kim et al., 2024; Lei & Masanet, 2022). β) Η υγρασία καθορίζει τα λανθάνοντα φορτία και την δυνατότητα χρήσης της ελεύθερης ψύξης με αέρα, η υψηλή υγρασία μειώνει τις ώρες ελεύθερης ψύξης και αυξάνει την ενέργεια αφύγρανσης. Η έμμεση εξάτμιση ή η υγρή ψύξη μπορούν να μετριάσουν τις επιπτώσεις στην υγρασία. γ) Το υψόμετρο και η βαρομετρική πίεση επηρεάζουν την απόδοση του ανεμιστήρα και την αποτελεσματικότητα της απόρριψης θερμότητας, η χαμηλότερη πυκνότητα αέρα σε υψόμετρο μπορεί να αυξήσει την απαιτούμενη ισχύ ανεμιστήρων για μια δεδομένη ροή μάζας, ενώ ο χαμηλότερος υγρός βολβός μπορεί να βοηθήσει στην απόρριψη της εξάτμισης (Kim et al., 2024). δ) Η διαθεσιμότητα νερού, λόγω περιορισμένης πρόσβασης σε επιφανειακά ή υπόγεια υδάτα και ο κίνδυνος ξηρασίας, επηρεάζουν άμεσα τον δείκτη WUE όταν χρησιμοποιούνται συστήματα εξάτμισης, οι άνδρες τοποθεσίες συχνά ευνοούν ξηρούς ψύκτες ή στρατηγικές υγρής ψύξης (Mytton, 2021; Yuan et al., 2023). ε) Τα χαρακτηριστικά του δικτύου (ένταση άνθρακα, δείκτες αξιοπιστίας) ποικίλλουν χωρικά και χρονικά. Σε περιοχές με καθαρότερα ή πιο ευέλικτα δίκτυα,

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

η λειτουργική CUE μπορεί να είναι χαμηλότερη ακόμη και με παρόμοια PUE (Lindberg et al., 2022).

Η συνδεσιμότητα συν-καθορίζει την χωροθέτηση. Η εγγύτητα σε σημεία προσγειώσης καλωδίων οπτικών ινών και υποθαλάσσιων καλωδίων μεγάλης απόστασης μειώνει την καθυστέρηση στους χρήστες και τις διασυνδέσεις νέφους, συσχετίζεται επίσης με τα παράκτια κλίματα όπου οι έμμεσοι εξοικονομητές εξάτμισης ή οι εξοικονομητές από την πλευρά του νερού μπορεί να ευδοκιμήσουν - αλλά με τους περιορισμούς νερού που πρέπει να ληφθούν υπόψη (Kim et al., 2024). Οι τοποθεσίες κοντά σε υδροηλεκτρικούς πόρους ή κόμβους μεταφοράς υψηλής χωρητικότητας μπορούν να παρέχουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα όσο και χωρητικότητα διασύνδεσης, αλλά μπορεί να είναι απομακρυσμένες από τα κέντρα ζήτησης, αυξάνοντας το κόστος backhaul (Zhang & Liu, 2022).

Ένας αναδυόμενος μοχλός είναι η γεωγραφική μετατόπιση φορτίου: η κατανομή των φόρτων εργασίας σε πολλαπλές τοποθεσίες για την αξιοποίηση της χωροχρονικής ποικιλομορφίας στις συνθήκες περιβάλλοντος (εξ ου και η PUE), οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και οι οριακές εκπομπές (Kim et al., 2024). Μελέτες που βασίζονται σε μοντέλα δείχνουν σημαντικές μειώσεις εκπομπών όταν οι θέσεις εργασίας κατευθύνονται σε περιοχές με χαμηλότερη ένταση άνθρακα σε πραγματικό χρόνο, με την επιφύλαξη ορίων καθυστέρησης/QoS (Lindberg et al., 2022; Lindberg et al., 2021). Συμπληρωματικά, ο προγραμματισμός με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ευθυγραμμίζει τον υπολογισμό με τα τοπικά προφίλ παραγωγής φωτοβολταϊκών/αιολικών πάρκων για τη μείωση των εισαγωγών δικτύου και της CUE (Khalil et al., 2022; Asadov et al., 2025; Fu et al., 2025).

Επιπτώσεις για το σχεδιασμό και την ανάλυση

Οι στρατηγικές επιλογές σχεδιασμού των κέντρων δεδομένων καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές κλιματικές και γεωγραφικές συνθήκες. Σε ψυχρά και ξηρά κλίματα, η εφαρμογή συστημάτων αερόψυξης με χρήση εξοικονομητών, σε συνδυασμό με αυξημένα σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας και τεχνικές απομόνωσης θερμών/ψυχρών διαδρόμων, δύναται να ελαχιστοποιήσει τη λειτουργία των ενεργοβόρων συμπίεστών. Αντιθέτως, σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα υγρασίας ή υδατική στενότητα, η υιοθέτηση συστημάτων υγρής ψύξης με ξηρή απόρριψη θερμότητας ή υβριδικών διατάξεων κρίνεται απαραίτητη για τη

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

βελτιστοποίηση της ισορροπίας μεταξύ των δεικτών WUE και PUE. (Kim et al., 2024; Mytton, 2021; Yuan et al., 2023).

Επιπλέον, η τεχνολογία της υγρής ψύξης επιτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας του ψυκτικού μέσου (σε εύρος 35–60 °C), γεγονός που διευκολύνει τη λειτουργία αντλιών θερμότητας για την παροχή ενέργειας σε δίκτυα τηλεθέρμανσης. Η τεχνοοικονομική βιωσιμότητα τέτοιων λύσεων εξαρτάται άμεσα από την εγγύτητα προς τα θερμικά φορτία, την εποχιακή διακύμανση της ζήτησης και τα υφιστάμενα πλαίσια τιμολόγησης. Παράλληλα, η ύπαρξη οργανωμένων αγορών απόκρισης στη ζήτηση και επικουρικών υπηρεσιών, σε συνδυασμό με χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα έντασης άνθρακα, προσδίδει πρόσθετη αξία στην επιχειρησιακή ευελιξία των εγκαταστάσεων (Huang et al., 2020; Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023).

Επιπροσθέτως, περιοχές με αγορές DR/βοηθητικές αγορές και χρονικά μεταβαλλόμενα σήματα άνθρακα αυξάνουν την αξία της ευέλικτης λειτουργίας (Wang et al., 2019; Sheikholeslami et al., 2022; Lindberg et al., 2022).

Τέλος, οι απαιτήσεις για υψηλή ποιότητα υπηρεσιών επιβάλλουν την εγγύτητα σε κόμβους ανταλλαγής κίνησης διαδικτύου (IXP) και υποθαλάσσιες διασυνδέσεις οπτικών ινών (Kim et al., 2024). Ωστόσο, οι τοποθεσίες αυτές συχνά συμπίπτουν με αυστηρά περιβαλλοντικά κανονιστικά πλαίσια ή περιορισμούς στη χρήση υδατικών πόρων, αναδεικνύοντας την ανάγκη για σύνθετους συμβιβασμούς σε επίπεδο συνολικού συστήματος (Zhang & Liu, 2022).

Σύνθεση: μια συστημική άποψη

Τα παραπάνω θεωρητικά σκέλη υποδηλώνουν μια ενοποιητική προοπτική: τα κέντρα δεδομένων είναι ελεγχόμενα θερμοηλεκτρικά συστήματα ενσωματωμένα σε χωρικά ετερογενείς ενεργειακές και δικτυακές υποδομές. Η αποδοτικότητα και η βιωσιμότητα απαιτούν βελτιστοποίηση σε τρεις άξονες: 1. Βελτιστοποίηση εντός της εγκατάστασης (θερμοδυναμική και ηλεκτρονικά ισχύος): υιοθέτηση υγρών/εμβάπτισης όπου δικαιολογείται από τη ροή θερμότητας, επιθετική χρήση οικονομητήρα όπου το επιτρέπει το κλίμα, κατάλληλο μέγεθος UPS και διανομής, και λεπτομερής μέτρηση για τον υπολογισμό του pPUE και την καθοδήγηση των ανακαινίσεων (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024; Yuan et al., 2023). 2. Αλληλεπίδραση με το δίκτυο (έλεγχος και αγορές), με ανάπτυξη περιορισμού ισχύος με επίγνωση QoS, θερμικής αποθήκευσης και BESS για την παροχή υπηρεσιών DR και συχνότητας,

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επί τόπου και συμμετοχή σε VPP όπου είναι δυνατόν (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022). 3. Γεωγραφική βελτιστοποίηση (τοποθέτηση και προγραμματισμός): χρήση MCDA για την επιλογή τοποθεσιών που εξισορροπούν τους παράγοντες PUE/WUE/CUE και τη συνδεσιμότητα, και στη συνέχεια εφαρμογή τοποθέτησης φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε όλο το χαρτοφυλάκιο (Lindberg et al., 2021, 2022; Khalil et al., 2022; Asadov et al., 2025; Fu et al., 2025).

Σε αυτό το πλαίσιο, οι μετρήσεις από το ISO/IEC 30134 διασφαλίζουν συνεπή μέτρηση, ενώ τα μέσα πολιτικής (προμήθειες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, πρόσβαση σε DR, κίνητρα δικτύου θέρμανσης) επιτρέπουν την οικονομική υιοθέτηση. Εμπειρικές μελέτες περιπτώσεων — επαναχρησιμοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας σε δίκτυα πανεπιστημιούπολης (Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023), σκοπιμότητα ORC (Corigliano et al., 2024), ρόλοι παραγωγών ενέργειας στην περιοχή (Huang et al., 2020) και επιδείξεις DR (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022) — βασίζουν τη θεωρία και επισημαίνουν τις οριακές συνθήκες.

Συνολικά, αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο παρακινεί τις μεθοδολογικές επιλογές της διπλωματικής εργασίας: μοντελοποίηση ενέργειας και νερού με κανονικοποίηση του κλίματος, ανάλυση σεναρίων για λειτουργίες διαδραστικότητας με το δίκτυο και χωροθέτηση πολλαπλών κριτηρίων με αξιοποίηση GIS — καθεμία βαθμονομημένη με τις παραπάνω μετρήσεις και επικυρωμένη σε σχέση με τα βιβλιογραφικά σημεία αναφοράς (Kim et al., 2024). Το αποτέλεσμα είναι ένας ολοκληρωμένος φακός για τον σχεδιασμό κέντρων δεδομένων επόμενης γενιάς, διαδραστικών με το δίκτυο, ευθυγραμμισμένων με το κλίμα, που ελαχιστοποιούν το συνολικό κόστος, τον κίνδυνο άνθρακα και νερού, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα των υπηρεσιών (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024; Yuan et al., 2023).

3. Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας

3.1 Κατανάλωση και τάσεις: επιπτώσεις του cloud, της Τεχνητής Νοημοσύνης και του IoT

Η πορεία της χρήσης ενέργειας στα κέντρα δεδομένων την τελευταία δεκαετία γίνεται καλύτερα κατανοητή ως αποτέλεσμα δύο αντισταθμιστικών δυνάμεων: της ταχέως αυξανόμενης ζήτησης για υπολογιστική και αποθηκευτική χρήση, η οποία οφείλεται στην υιοθέτηση του cloud, του mobile video και - πιο πρόσφατα - των φόρτων εργασίας τεχνητής νοημοσύνης και του Διαδικτύου των Πραγμάτων, καθώς και των εξίσου ταχέων βελτιώσεων στην ενεργειακή απόδοση τόσο σε επίπεδο IT όσο και σε επίπεδο εγκαταστάσεων (Lindberg et al., 2021). Πολλαπλές εμπειρικές επαναξιολογήσεις δείχνουν ότι, μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 2010, η ανάπτυξη της ηλεκτρικής ενέργειας στον τομέα μετριάστηκε από την εικονικοποίηση, την ενοποίηση διακομιστών, το υλικό αναλογικό με την ισχύ και τις ωρίμανση πρακτικών εγκαταστάσεων, με αποτέλεσμα σημαντικά χαμηλότερη ενεργειακή ανάπτυξη από ό,τι είχαν υποδείξει οι απλοϊκές εκτιμήσεις (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022). Ωστόσο, η σύνθεση των φόρτων εργασίας έχει μετατοπιστεί. Η εκπαίδευση και η εξαγωγή συμπερασμάτων στην Τεχνητή Νοημοσύνη επιβάλλουν υψηλές, διατηρούμενες πυκνότητες ισχύος και στενά θερμικά περιβλήματα, ενώ οι υπηρεσίες cloud και edge που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση δημιουργούν ημερήσια και χωρικά πρότυπα ζήτησης που δεν ευθυγραμμίζονται πάντα με τις δυνατότητες του τοπικού δικτύου, καθιστώντας τις τοπικές αιχμές και τα όρια χωρητικότητας διασύνδεσης πιο σημαντικά από ό,τι υποδηλώνει το παγκόσμιο ετήσιο σύνολο (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024).

Οι ενεργειακές επιπτώσεις της Τεχνητής Νοημοσύνης χαρακτηρίζονται από υψηλή πολυπλοκότητα και πολυδιάστατη φύση. Η φάση της εκπαίδευσης μεγάλων μοντέλων απαιτεί παρατεταμένες περιόδους υπολογιστικής λειτουργίας σε συμπλέγματα χιλιάδων επιταχυντών, οι οποίες παράγουν θερμικά φορτία που ωθούν τις πυκνότητες ισχύος ανά ικρίωμα σε επίπεδα που υπερβαίνουν τις δυνατότητες των συμβατικών συστημάτων αερόψυξης (Wang et al., 2024).

Παράλληλα, η διαδικασία της εξαγωγής συμπερασμάτων, αν και λιγότερο απαιτητική σε μεμονωμένο επίπεδο, εκτελείται αδιαλείπτως σε παγκόσμια κλίμακα (Kim et al., 2024). Η τάση για μεταφορά αυτών των υπολογιστικών διεργασιών πλησιέστερα στους τελικούς χρήστες αναδιαμορφώνει τη γεωγραφική κατανομή των υπολογιστικών πόρων, επιβάλλοντας νέες στρατηγικές διαχείρισης της ενέργειας και της θερμότητας (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022).

Αυτές οι τάσεις ενισχύουν τη σημασία των ανθεκτικών συστημάτων ισχύος (UPS, PDU), των αρχιτεκτονικών ψύξης υψηλής απόδοσης και της ακριβούς διαχείρισης ροής αέρα. Ακόμη, επαναφέρουν ερωτήματα σχετικά με τα όρια των κερδών απόδοσης σε επίπεδο εγκατάστασης, όταν οι πυκνότητες ισχύος υλικού ξεπερνούν τις σταδιακές βελτιώσεις, οι οποίες επιτυγχάνονται από τα παραδοσιακά μηχανικά συστήματα (Yuan et al., 2023; Haghshenas et al., 2023). Ταυτόχρονα, ο πολλαπλασιασμός των συσκευών IoT και των edge analytics κατανέμει τα υπολογιστικά φορτία σε άλλες τοποθεσίες με ποικίλα κλιματικά και δικτυωμένα περιβάλλοντα, αυξάνοντας τα πιθανά οφέλη της διατομεακής ενορχήστρωσης και της γεωγραφικής μετατόπισης φορτίου (Lindberg et al., 2021, 2022).

Μια άλλη σημαντική αναδιατύπωση αφορά το αποτύπωμα νερού και άνθρακα. Ενώ η Αποτελεσματικότητα Χρήσης Ενέργειας (PUE) παραμένει η πιο ευρέως αναφερόμενη μέτρηση, οι φορείς εκμετάλλευσης και οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής δίνουν πλέον έμφαση στην Αποτελεσματικότητα Χρήσης Νερού (WUE) και την Αποτελεσματικότητα Χρήσης Άνθρακα (CUE), αντιστακώνοντας την πραγματικότητα πως οι επιλογές τεχνολογίας ψύξης και η χωροθέτηση αλληλεπιδρούν με την τοπική λειψυδρία και την ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας (Mytton, 2021; Lei & Masanet, 2022). Οι έμμεσες και άμεσες στρατηγικές εξάτμισης που ελαχιστοποιούν το έργο του συμπιεστή μπορούν να μειώσουν την PUE αλλά να αυξήσουν την WUE - μια αποδεκτή αντιστάθμιση σε κλίματα με άφθονο νερό, αλλά προβληματική σε άνυδρες περιοχές. Εν τω μεταξύ, οι λειτουργικές εκπομπές εξαρτώνται περισσότερο από την χρονικά μεταβαλλόμενη και την τοπική ένταση άνθρακα της ηλεκτρικής ενέργειας παρά από την

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

PUE μόνο, παρακινώντας τη χωροχρονική διαχείριση του φόρτου εργασίας (Lindberg et al., 2022; Mytton & Ashtine, 2022).

Συνοψίζοντας, η εικόνα που αναδύεται δεν είναι μια εικόνα ομοιόμορφης, ανεξέλεγκτης ενεργειακής ανάπτυξης, αλλά μιας ετερογενούς και ολοένα και πιο έντονης ζήτησης γύρω από άνθρακα. Αυτό αναπτύσσει συνδυασμένες στρατηγικές που αντιμετωπίζουν τη θερμοδυναμική (ψύξη), την ολοκλήρωση του συστήματος ισχύος (ευελιξία) και τη γεωγραφία (τοποθέτηση και δρομολόγηση).

3.2 Στρατηγικές για τη μείωση της κατανάλωσης: εικονικοποίηση, διαχείριση φόρτου εργασίας και επαναχρησιμοποίηση θερμότητας

Η εικονικοποίηση και η ενοποίηση ήταν οι μοχλοί απόδοσης πρώτης τάξης της εποχής του cloud: αυξάνοντας την αξιοποίηση των διακομιστών και επιτρέποντας την ταχεία μετεγκατάσταση φόρτου εργασίας, μειωνόταν ο αριθμός των αδρανών, πάντα ενεργών μηχανημάτων και το overhead της υπερφορτωμένης χωρητικότητας (Wang et al., 2024). Παρόλο που τα σχετικά εντός ορίων τους κέρδη έχουν σταθεροποιηθεί σε ώριμα περιβάλλοντα cloud, η εικονικοποίηση εξακολουθεί να είναι πολύ σημαντική για το σωστό μέγεθος φόρτου εργασίας και τον περιορισμό ισχύος, τα οποία ρυθμίζουν την κατανάλωση ενέργειας του διακομιστή σε συγκεκριμένα χρονικά πλαίσια για την παρακολούθηση συμφωνιών επιπέδου υπηρεσιών (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022). Καθώς οι επιταχυντές αντικαθιστούν τις CPU για την Τεχνητή Νοημοσύνη, ο ρόλος των προγραμματιστών που γνωρίζουν το υλικό γίνεται κεντρικός, καθώς οι διαχειριστές συμπλεγμάτων πρέπει να αντιστοιχίζουν εργασίες σε γενιές GPU και να διασυνδέουν τοπολογίες με τρόπους που μειώνουν τόσο την ενέργεια κατά τον χρόνο εκτέλεσης όσο και τα συστημικά hot spots που αυξάνουν τα φορτία ψύξης (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024).

Πέρα από τη στατική απόδοση, η διαχείριση φόρτου εργασίας δημιουργεί χρονικό και χωρικό πλεονέκτημα που μειώνει το κόστος ενέργειας και τις εκπομπές. Σε κλίμακα από δευτερόλεπτο έως λεπτό, η αναδιαμόρφωση ισχύος με επίγνωση QoS εκμεταλλεύεται την αναλογία ισχύος διακομιστή και την περιορισμένη αναβολή για να παρέχει ρύθμιση συχνότητας και περικοπή αιχμής, με πειράματα και μοντέλα που δείχνουν ότι τα κέντρα δεδομένων μπορούν να ανταποκριθούν χωρίς να παραβιάσουν τα SLA, όταν ωστόσο οι έλεγχοι σχεδιάζονται από κοινού με μοντέλα απόδοσης εφαρμογών (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022). Σε

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

κλίμακα από λεπτά έως ώρες, οι στρατηγικές απόκρισης ζήτησης περιορίζουν ή μετατοπίζουν μη κρίσιμα φορτία σε απόκριση σε αιχμές τιμών ή καταπόνηση δικτύου (Sheikholeslami et al., 2022; Chen et al., 2020). Σε κλίμακα από ώρες σε ημέρες, η γεωγραφική μετατόπιση φορτίου δρομολογεί εργασίες ανεκτικές στην καθυστέρηση σε περιοχές με χαμηλότερες οριακές εκπομπές ή φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια, παράγοντας μειώσεις εκπομπών υλικών όταν περιορίζονται από την καθυστέρηση δικτύου και τις απαιτήσεις τοποθεσίας δεδομένων (Lindberg et al., 2021, 2022; Khalil et al., 2022).

Ένας τρίτος παράγοντας είναι η επαναχρησιμοποίηση θερμότητας. Επειδή σχεδόν όλη η ενέργεια της πληροφορικής μετατρέπεται σε θερμότητα, η ανάκτηση και η αξιοποίηση αυτής της θερμότητας μπορεί να βελτιώσει την απόδοση του ενεργειακού συστήματος πέρα από τα όρια της εγκατάστασης (Wang et al., 2024). Μελέτες καταγράφουν προσεγγίσεις που κυμαίνονται από αντλίες θερμότητας νερού, οι οποίες ανεβάζουν τη θερμότητα χαμηλής ποιότητας σε θερμοκρασίες παροχής τηλεθέρμανσης έως την άμεση υγρή ψύξη και την εμβάπτιση, που αυξάνουν τις θερμοκρασίες εξόδου του ψυκτικού μέσου, βελτιώνοντας την εκμετάλλευση της ανακτήσιμης θερμότητας (Huang et al., 2020; Dvořák et al., 2020; Kim et al., 2022). Οι ανασκοπήσεις συνθέτουν αναδυόμενες πρακτικές και τεχνοοικονομικές παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένης της υδραυλικής ολοκλήρωσης, της αντιστοίχισης θερμοκρασίας, των εποχιακών προφίλ ζήτησης και των δομών τιμολόγησης (Yuan et al., 2023; Montagud-Montalvá et al., 2023). Στο σημείο που το επιτρέπουν τα επίπεδα θερμοκρασίας και τα οικονομικά δεδομένα, έχουν προταθεί έννοιες του οργανικού κύκλου Rankine για τη μετατροπή ενός κλάσματος θερμότητας χαμηλής ποιότητας σε ηλεκτρική ενέργεια, αν και οι πρακτικές εφαρμογές είναι πιο ελάχιστες και καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το περιβάλλον (Corigliano et al., 2024). Ο δείκτης Energy Reuse Effectiveness (ERE) του τομέα κωδικοποιεί την πίστωση για την εξαγόμενη αξιοποιήσιμη ενέργεια και ενθαρρύνει σχέδια που μεγιστοποιούν την θερμική ποιότητα στο σημείο απόρριψης (Huang et al., 2020; Yuan et al., 2023).

Συλλογικά, αυτές οι στρατηγικές, όπως η εικονικοποίηση, η έξυπνη ενορχήστρωση, η λειτουργία διασυνδεδεμένη με το δίκτυο και η επαναχρησιμοποίηση θερμότητας, μετατρέπονται πέρα από την προκαθορισμένη απόδοση σε συστημική απόδοση, αξιοποιώντας τόσο τη θερμοδυναμική όσο και την ευελιξία.

3.3 Συνέργειες DC–έξυπνου δικτύου: Συμμετοχή DR, ευελιξία φορτίου και συνεγκατάσταση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η βιβλιογραφία σχετικά με τα διαδραστικά DC με το δίκτυο έχει εξελιχθεί από εννοιολογικές προτάσεις σε επιδείξεις γρήγορης, περιορισμένης ευελιξίας. Πρώιμες εργασίες κατέδειξαν ότι τα clusters διακομιστών μπορούν να διαμορφώνουν την ισχύ σε χρονικά διαστήματα μικρότερα του δευτερολέπτου, προσαρμόζοντας τις συχνότητες της CPU, την ενεργοποίηση του πυρήνα και τον περιορισμό των εργασιών, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα υπηρεσίας, επιτρέποντας υπηρεσίες ρύθμισης συχνότητας (Wang et al., 2019). Πιο πρόσφατα πλαίσια ελέγχου με επίγνωση QoS ενσωματώνουν μοντέλα απόδοσης σε επίπεδο εφαρμογής και θερμικούς περιορισμούς για την παροχή συμβατικής DR με ελάχιστη επίδραση στην απόδοση (Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022). Αυτές οι μελέτες αναδεικνύουν δύο παράγοντες που επιτρέπουν αφενός μεν τη θερμική αδράνεια στο σύστημα ψύξης, η οποία ρυθμίζει τις σύντομες εκρήξεις ισχύος, και αφετέρου τα UPS/BESS, τα οποία παρέχουν άμεση απόκριση και ride-through, επιτρέποντας στους πιο αργούς ελέγχους φόρτου εργασίας να καλύψουν τη διαφορά.

Σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, η βασισμένη στις τιμές και η- λαμβάνοντας υπόψη τον άνθρακα- μεταφορά φορτίου ευθυγραμμίζεται με τις απαιτήσεις της αγοράς της επόμενης ημέρας αλλά και της ενδοημερήσιας αγοράς (Wang et al., 2024). Θεωρητικές και εμπειρικές αναλύσεις της γεωγραφικής μετατόπισης φορτίου φανερώνουν ότι, η δρομολόγηση φόρτων εργασίας μεταξύ περιοχών με σκοπό την επιδίωξη χαμηλότερων οριακών εκπομπών, μπορεί να μειώσει τον λειτουργικό άνθρακα σε διψήφια ποσοστά, με την επιφύλαξη περιορισμών καθυστέρησης και τοποθεσίας δεδομένων (Lindberg et al., 2021, 2022). Το δυναμικό αυξάνεται όταν τα χαρτοφυλάκια DC περιλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποθήκευση επί τόπου, τις οποίες ένα Κατανεμημένο Σύστημα Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων (DERMS) μπορεί να αποστείλει παράλληλα με το ευέλικτο φορτίο για να σχηματίσει έναν Εικονικό Σταθμό Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (VPP) (Khalil et al., 2022). Η προμήθεια εκτός τόπου μέσω συμφωνιών αγοράς ενέργειας ενισχύει την απαλλαγή από τον άνθρακα από την πλευρά της προσφοράς. Σε συνδυασμό με τη χρονική αντιστοίχιση μεταξύ κατανάλωσης και παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, οι PPA μπορούν να μειώσουν την CUE πιο αποτελεσματικά από την ετήσια λογιστική ισοσκέλιση (Mytton & Ashtine, 2022; Lei & Masanet, 2022).

Η συστέγαση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ένας τομέας αυξανόμενου πρακτικού ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, οι περιοχές που είναι πλούσιες σε υδροηλεκτρική ενέργεια και τα θυελλώδη, δροσερά κλίματα προσφέρουν τόσο ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα όσο και ευνοϊκές συνθήκες ψύξης, ενώ οι περιοχές πλούσιες σε ηλιακή ενέργεια παρουσιάζουν ισχυρές αποδόσεις φωτοβολταϊκών, αλλά συχνά υψηλότερες θερμοκρασίες υγρού βολβού, οι οποίες μειώνουν τις ώρες λειτουργίας του εξοικονομητή στην πλευρά του αέρα (Kim et al., 2024; Huang et al., 2020). Η αποθήκευση σε μπαταρίες διευρύνει το εφικτό πεδίο εφαρμογής, ενισχύοντας παράλληλα την παραγωγή επί τόπου και επιτρέποντας την εξάλειψη της αιχμής και το arbitrage, ενώ η θερμική αποθήκευση (π.χ., κρύο νερό) αποσυνδέει τη λειτουργία του ψύκτη από τις αιχμές φορτίου IT (Sheikholeslami et al., 2022; Wang et al., 2019). Είναι σημαντικό ότι η μέτρηση και η αναφορά της απόδοσης DC σε τέτοιες υβριδικές λειτουργίες απαιτούν συνεπή όρια ώστε να αποφευχθεί η υπερεκτίμηση των βελτιώσεων - μια έμφαση της ISO/IEC 30134 (Lei & Masanet, 2022; Mytton & Ashtine, 2022).

Συνολικά, η βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη των DC ως ελεγχόμενων περιουσιακών στοιχείων δικτύου, ικανών να παρέχουν σταθερή, καλά χαρακτηρισμένη ευελιξία και να ενσωματώνονται με χαρτοφυλάκια DER — υπό την προϋπόθεση ότι οι αγορές αναγνωρίζουν και αντισταθμίζουν αυτές τις δυνατότητες και ότι οι έλεγχοι σχεδιάζονται από κοινού με την πληροφορική και τη θερμική δυναμική.

3.4 Γεωγραφική βελτιστοποίηση: διεθνή παραδείγματα (ψυχρά κλίματα, περιοχές υδροηλεκτρικής ενέργειας και πέραν αυτών)

Η χωροθέτηση έχει αναδειχθεί ως καθοριστικός παράγοντας τόσο της θερμοδυναμικής όσο και της περιβαλλοντικής απόδοσης. Πολλαπλές ενδείξεις υποδεικνύουν τα πλεονεκτήματα των δροσερών και ψυχρών κλιμάτων με χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, οι οποίες μεγιστοποιούν τις ώρες εξοικονόμησης αέρα και νερού και επιτρέπουν υψηλότερα σημεία ρύθμισης του αέρα τροφοδοσίας χωρίς να διακυβεύεται η αξιοπιστία (Kim et al., 2024; Lei & Masanet, 2022). Σε τέτοια κλίματα, η καλά εφαρμοσμένη στρατηγική συγκράτησης και οι οικονομητές μπορούν να μειώσουν την PUE προς τη μονάδα για μεγάλο μέρος του έτους (Wang et al., 2024). Αντίθετα, οι θερμές και υγρές περιοχές μειώνουν τις ώρες λειτουργίας των οικονομητών, αυξάνουν τα λανθάνοντα φορτία και συχνά ωθούν τα σχέδια προς έμμεση

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

εξάτμιση ή υγρή ψύξη για τη διαχείριση υψηλών πυκνοτήτων ραφιών, ενώ παράλληλα σταθεροποιούν την WUE (Yuan et al., 2023).

Από την οπτική γωνία του δικτύου, η εγγύτητα σε μονάδες παραγωγής χαμηλών εκπομπών άνθρακα και ισχυρούς κόμβους μεταφοράς διαμορφώνει τις λειτουργικές εκπομπές και τη δυνατότητα διασύνδεσης (Lindberg et al., 2021). Οι περιοχές πλούσιες σε υδροηλεκτρική ενέργεια προσφέρουν συνήθως χαμηλές εντάσεις άνθρακα και, σε ορισμένες περιπτώσεις, ευνοϊκές τιμές για μεγάλα, σταθερά βιομηχανικά φορτία (Wang et al., 2024), ενώ οι ακτές πλούσιες σε αιολική ενέργεια μπορούν να παρέχουν τόσο καθαρή ενέργεια όσο και συνδεσιμότητα οπτικών ινών, μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων, αν και με περιορισμούς νερού και αδειοδότησης (Lindberg et al., 2022; Zhang & Liu, 2022). Η βιβλιογραφία υπογραμμίζει επίσης τον ρόλο των δικτύων ενέργειας της περιοχής στην ενεργοποίηση της επαναχρησιμοποίησης θερμότητας: τα πανεπιστήμια και τα δημοτικά δίκτυα θέρμανσης σε ψυχρά κλίματα έχουν επιδείξει τεχνικά και οικονομικά βιώσιμη επαναχρησιμοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας συνεχούς ρεύματος μέσω αντλιών θερμότητας νερού, ευθυγραμμίζοντας τα θερμικά φορτία με τα προφίλ ζήτησης θέρμανσης (Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023; Huang et al., 2020).

Πέρα από το κλίμα και την ενέργεια, η χωροθέτηση πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον κίνδυνο του νερού, το υψόμετρο και τη συνδεσιμότητα. Οι περιοχές με έλλειψη νερού αυξάνουν το κόστος και το περιβαλλοντικό βάρος της ψύξης με εξάτμιση, οδηγώντας τα σχέδια σε ξηρούς ψύκτες ή υγρούς βρόχους με ελάχιστη χρήση νερού (Mytton, 2021). Το υψόμετρο επηρεάζει την πυκνότητα του αέρα και επομένως την ισχύ του ανεμιστήρα, αν και συνήθως δεν είναι πρώτης τάξεως, μπορεί να έχει σημασία για σχέδια υψηλής ροής αέρα (Wang et al., 2024). Η συνδεσιμότητα - διαδρομές οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων, ανταλλαγές διαδικτύου και εγγύτητα υποβρυχίων καλωδίων - περιορίζει τα φορτία εργασίας, που είναι ευαίσθητα στην καθυστέρηση και το κόστος backhaul και συχνά συνυπάρχει με παράκτια κλίματα, όπου οι παράμετροι του νερού είναι μεγαλύτερες (Zhang & Liu, 2022).

Μεθοδολογικά, πρόσφατες εργασίες προωθούν την ανάλυση αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) για την χωροθέτηση, που ενσωματώνει το κλίμα (HDD/CDD, υγρασία), την ένταση και την αξιοπιστία άνθρακα του δικτύου, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πόρων, τον κίνδυνο νερού, τη συνδεσιμότητα δικτύου και τους παράγοντες πολιτικής/κανονισμού σε σύνθετες βαθμολογίες καταλληλότητας (Zhang & Liu, 2022; Mytton & Ashtine, 2022). Οι

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

αναλύσεις ευαισθησίας δίνουν έμφαση στη διερεύνηση των βαρών και της αβεβαιότητας των δεδομένων - ένα κρίσιμο βήμα δεδομένων των διαφορετικών πηγών και των χρονικών βάσεων των επιπέδων εισόδου (Lei & Masanet, 2022). Είναι σημαντικό ότι οι στρατηγικές χωροθέτησης και λειτουργίας είναι αλληλεξαρτώμενες, πρόκειται για ένα χαρτοφυλάκιο τοποθεσιών που εκτείνονται σε διαφορετικά κλιματικά και δικτυωτά καθεστώτα και επιτρέπει τη γεωγραφική μετατόπιση φορτίου που εκμεταλλεύεται ευκαιριακά τη χωροχρονική ποικιλομορφία τόσο στους παράγοντες PUE όσο και στις οριακές εκπομπές (Lindberg et al., 2021, 2022).

3.5 Κενά γνώσης που αντιμετωπίζονται από αυτήν την διατριβή

Παρά την ουσιαστική πρόοδο, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετά κενά στη βιβλιογραφία. Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει σχεδιαστεί για να αντιμετωπίσει πέντε από αυτά:

Το πρώτο αποτελεί τα κλιματικά και τεχνολογικά κριτήρια αναφοράς που ενσωματώνουν μετρήσεις νερού και άνθρακα. Μεγάλο μέρος της αναφερόμενης απόδοσης επικεντρώνεται στην ετήσια PUE χωρίς επαρκή αποκάλυψη της ομαλοποίησης του καιρού, των σημείων αναφοράς ή του μείγματος τεχνολογιών ψύξης, περιπλέκοντας τις συγκρίσεις μεταξύ τοποθεσιών και μεροληπτώντας για τα συμπεράσματα σχετικά με τις «βέλτιστες πρακτικές» (Wang et al., 2024). Ενώ πρόσφατες μελέτες αναπτύσσουν μοντέλα PUE/WUE ευαίσθητα στο κλίμα και την τεχνολογία (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024), μια σύνθεση σε επίπεδο χαρτοφυλακίου που ενοποιεί τα PUE, WUE και CUE υπό συνεπή όρια ISO/IEC 30134, με σαφείς ζώνες αβεβαιότητας, παραμένει περιορισμένη. Αυτή η διατριβή συνεισφέρει ένα κλιματικά κανονικοποιημένο πλαίσιο μοντελοποίησης που εκτιμά από κοινού τα PUE/WUE/CUE υπό εναλλακτικά σενάρια ψύξης και δικτύου, διευκρινίζοντας τους συμβιβασμούς.

Το δεύτερο κενό αποτελεί τη λειτουργική συνβελτιστοποίηση της θερμοδυναμικής ψύξης και της αλληλεπίδρασης δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, οι υπάρχουσες επιδείξεις DR και ρύθμισης συχνότητας συχνά αντιμετωπίζουν το θερμικό σύστημα ως παθητικό ρυθμιστικό ή επιβάλλουν συντηρητικούς περιορισμούς (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022). Αντίθετα, οι μελέτες βελτιστοποίησης ψύξης συχνά υποθέτουν στατικές τιμές ενέργειας και δεν λαμβάνουν υπόψη την κατανομή με επίγνωση του άνθρακα (Yuan et al., 2023). Υπάρχει ένα κενό στη συνβελτιστοποίηση των θερμικών ελέγχων (μετάβαση εξοικονομητή, σημεία ρύθμισης ψύξης υγρού, κατανομή θερμικής αποθήκευσης) με συμμετοχή DR/VPP, μοντελοποιώντας ρητά τη

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

θερμική αδράνεια και την ευελιξία του φόρτου εργασίας που περιορίζεται από το SLA. Αυτή η διατριβή αναπτύσσει μια τέτοια συμβελτιστοποίηση και ποσοτικοποιεί το κόστος και τις επιπτώσεις του άνθρακα σε όλα τα περιβάλλοντα δικτύου (Sheikholeslami et al., 2022; Lindberg et al., 2022).

Ένα ακόμη υπό μελέτη κενό είναι η χωροχρονική μετατόπιση φόρτου εργασίας με ρεαλιστικούς περιορισμούς και σύζευξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αναλυτικότερα η θεωρία της γεωγραφικής μετατόπισης φορτίου είναι καλά τεκμηριωμένη θεωρητικά (Lindberg et al., 2021, 2022; Khalil et al., 2022), αλλά τα εμπειρικά χαρτοφυλάκια πρέπει να εξισορροπούν την καθυστέρηση, την κυριαρχία δεδομένων, την τοποθέτηση ενοικιαστών και το κόστος εξόδου από το δίκτυο. Επιπλέον, πολλές μελέτες βασίζονται σε ετήσιες μέσες εντάσεις άνθρακα ή αγνοούν τη χρονική αντιστοίχιση μεταξύ κατανάλωσης και παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενδεχομένως υπερεκτιμώντας τα οφέλη (Wang et al., 2024). Πρόσφατες κατευθύνσεις - όπως η τοποθέτηση κοντέινερ σε συστήματα πολλαπλών κέντρων δεδομένων και η ενορχήστρωση με επίγνωση άνθρακα από άκρη σε σύννεφο – μοιάζουν εφικτά, αλλά χρειάζονται ενσωμάτωση με προγραμματισμό και με επίγνωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και δυναμικά σήματα άνθρακα (Asadov et al., 2025; Fu et al., 2025). Αυτή η διατριβή ενσωματώνει περιορισμούς καθυστέρησης και τοποθεσίας δεδομένων, χρησιμοποιεί ένταση άνθρακα με χρονική ανάλυση και ευθυγραμμίζει τη μετατόπιση με τα τοπικά προφίλ φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων για την εκτίμηση ρεαλιστικών μειώσεων εκπομπών.

Στην συνέχεια, ερευνάται η τεχνοοικονομική αποτίμηση της επαναχρησιμοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας σε διαφορετικά κλίματα και αστικά περιβάλλοντα. Υπάρχουν μελέτες περιπτώσεων, οι οποίες καθορίζουν την τεχνική εφικτότητα της επαναχρησιμοποίησης θερμότητας μέσω αντλιών θερμότητας και δικτύων περιφερειών (Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023; Huang et al., 2020) και εξετάζουν τις επιλογές τεχνολογίας για χαρτογράφηση (Yuan et al., 2023). Ωστόσο, οι συγκριτικές τεχνοοικονομικές αξιολογήσεις που λαμβάνουν υπόψη τις αυξήσεις θερμοκρασίας, την απόσταση από τα φορτία, τις εποχικές εναλλαγές, τα τιμολόγια και τις εναλλακτικές χρήσεις κεφαλαίου - ειδικά για αίθουσες υψηλής πυκνότητας με ψύξη υγρού - είναι δυσεύρετες (Kim et al., 2024). Αυτή η εργασία κατασκευάζει μια βιβλιοθήκη σεναρίων, η οποία αξιολογεί επιχειρηματικές περιπτώσεις επαναχρησιμοποίησης θερμότητας σε κλιματικά αρχέτυπα, συμπεριλαμβανομένων ευκαιριών ORC περιορισμένου εύρους όπου το επιτρέπει η εξέργεια (Corigliano et al., 2024).

Ταυτόχρονα, στην παρούσα εξετάζονται τα τυποποιημένα, αναπαραγωγίμα πλαίσια χωροθέτησης που ενσωματώνουν αγορές και πολιτικές δικτύου. Καθώς η χωροθέτηση με βάση το MCDA προχωρά (Zhang & Liu, 2022), η αναπαραγωγιμότητα παρεμποδίζεται από ετερογενείς πηγές δεδομένων και αδιαφανείς σταθμίσεις. Επιπλέον, οι μεταβλητές πολιτικής - όπως η πρόσβαση στην αγορά DR, τα χρονοδιαγράμματα διασύνδεσης και οι άδειες χρήσης νερού - συχνά αντιμετωπίζονται ποιοτικά, παρά τις επιπτώσεις πρώτης τάξης στη σκοπιμότητα και την οικονομία (Mytton & Ashtine, 2022; Sheikholeslami et al., 2022). Στην παρούσα έρευνα αναπτύσσεται μια MCDA ανοιχτών δεδομένων, με αξιοποίηση Συστημάτων Γεωγραφικού Προσδιορισμού, με διαφανή κριτήρια, ανάλυση ευαισθησίας και δείκτες πολιτικής και αγοράς, παράγοντας έναν καταταγμένο χάρτη υποψήφιων περιοχών και δοκιμάζοντας την ανθεκτικότητα στην πιθανότητα των δεδομένων.

Η ανάγκη για διαφάνεια των μετρήσεων καλύπτει και τα πέντε κενά. Ακολουθώντας τις οδηγίες ISO/IEC 30134, αυτή η διατριβή αναφέρει τα όρια μέτρησης, τις χρονικές βάσεις και τις κλιματικές ομαλοποιήσεις για όλες τις μετρήσεις (PUE/DCiE, WUE, CUE, ERE, μερική PUE), υποστηρίζοντας τη συγκρισιμότητα και την αναπαραγωγή (Lei & Masanet, 2022; Mytton & Ashtine, 2022).

Σύνθεση

Η βιβλιογραφία παρουσιάζει μια συνεκτική εικόνα, όπου η ενεργειακή απόδοση των κέντρων δεδομένων δεν είναι αποκλειστικά συνάρτηση της απόδοσης εντός του “κουτιού” (in-the-box), αλλά προκύπτει από τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ υλικού, θερμοδυναμικής ψύξης, συνθηκών δικτύου και γεωγραφίας. Η εικονικοποίηση και η προηγμένη ψύξη μείωσαν την κλίση της ενεργειακής αύξησης ακόμη και όταν η ζήτηση εκτοξεύτηκε (Masanet et al., 2020; Yuan et al., 2023), αλλά η Τεχνητή Νοημοσύνη και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχουν αναδιαμορφώσει πλέον τη ζήτηση, αυξάνοντας την ανάγκη για στρατηγικές με διάδραση ως προς το δίκτυο και με επίγνωση της τοποθεσίας. Επιδείξεις γρήγορων υπηρεσιών DR και συχνότητας (Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022), αναλύσεις μετατόπισης φορτίου με επίγνωση του άνθρακα (Lindberg et al., 2021, 2022; Khalil et al., 2022) και ενσωματώσεις επαναχρησιμοποίησης θερμότητας στον πραγματικό κόσμο (Dvořák et al., 2020; Montagud-Montalvá et al., 2023) παρέχουν τα δομικά στοιχεία για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση. Αυτό

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

που παραμένει υπανάπτυκτο —και όπου συμβάλλει η παρούσα διπλωματική εργασία, είναι ένα συνεκτικό, ποσοτικό πλαίσιο που αρχικά μοντελοποιεί από κοινού τις PUE, WUE και CUE υπό κλιματικά ομαλοποιημένες συνθήκες και εναλλακτικά χαρτοφυλάκια ψύξης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, βελτιστοποιεί από κοινού τους θερμικούς ελέγχους με τη συμμετοχή του δικτύου, θέτει σε λειτουργία την τοποθέτηση φόρτου εργασίας με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και του άνθρακα υπό ρεαλιστικούς περιορισμούς και εν τέλει συστηματοποιεί την χωροθέτηση με διαφανή, πολιτικά ενήμερη MCDA.

Ερευνώντας αυτά τα κενά, η διατριβή προωθεί την επικέντρωση προς κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς, που αλληλεπιδρούν με το δίκτυο και ευθυγραμμίζονται με το κλίμα, ελαχιστοποιώντας τους κινδύνους κόστους, άνθρακα και νερού, ενώ παράλληλα πληρούν τις αυστηρές απαιτήσεις QoS.

4. Μεθοδολογία

4.1 Σχεδιασμός έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε με έναν μικτό ερευνητικό σχεδιασμό, συνδυάζοντας βιβλιογραφική έρευνα με συγκριτική ανάλυση μελετών περίπτωσης. Η μελέτη δεν βασίστηκε τόσο σε πρωτογενείς πειραματικές δοκιμές ή στην κατασκευή ενός φυσικού πρωτοτύπου κέντρου δεδομένων, αλλά χρησιμοποίησε υπάρχουσα ακαδημαϊκή βιβλιογραφία, τεχνικά πρότυπα, σύνολα δεδομένων, δεδομένα ενέργειας και κλίματος ανοιχτής πρόσβασης και τεκμηριωμένες μελέτες περίπτωσης, έτσι ώστε να εξετάσει τον τρόπο που τα κέντρα δεδομένων μπορούν να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση μέσω της ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και της στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας. Αυτή η προσέγγιση ήταν κατάλληλη, καθώς το ερευνητικό πρόβλημα ήταν τόσο τεχνικό όσο και εξαρτώμενο από το πλαίσιο, δηλαδή η ενεργειακή απόδοση εξαρτάται όχι μόνο από την απόδοση του διακομιστή και τον σχεδιασμό ψύξης, αλλά και από τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το κλίμα, τον υδατικό κίνδυνο, τη ρύθμιση και την τοποθεσία. Για τους άνω λόγους, ένας σχεδιασμός μικτών μεθόδων θεωρήθηκε ο πλέον κατάλληλος για τον συνδυασμό ποσοτικών δεικτών με ποιοτική ερμηνεία πραγματικών περιπτώσεων (Creswell & Creswell, 2023).

Η μεθοδολογία δομήθηκε γύρω από τέσσερα συνδεδεμένα στοιχεία, αρχικά μια βιβλιογραφική σύνθεση ακαδημαϊκών και θεσμικών πηγών, στη συνέχεια με ανάλυση που βασίζεται σε δείκτες της ενεργειακής, υδατικής και κλιματικής απόδοσης, τρίτον, μια ανάλυση αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) για την επιλογή τοποθεσίας, και τέλος, σε σύγκριση μελετών περίπτωσης. Το στοιχείο μελέτης περίπτωσης ακολούθησε τη λογική της έρευνας μελέτης περίπτωσης, όπου επιλεγμένα παραδείγματα χρησιμοποιήθηκαν για την κατανόηση σύνθετων συστημάτων στο πραγματικό τους πλαίσιο (Yin, 2018).

4.2 Βιβλιογραφική και τεκμηριωτική ανάλυση

Το πρώτο στάδιο της έρευνας ήταν μια δομημένη βιβλιογραφική ανάλυση. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιήθηκαν ακαδημαϊκές πηγές, ώστε να καθοριστεί η τεχνική και θεωρητική βάση της διπλωματικής εργασίας, συμπεριλαμβανομένων των τάσεων ενέργειας των κέντρων δεδομένων, των συστημάτων ψύξης, της διαχείρισης φόρτου εργασίας, της απόκρισης στη ζήτηση, του προγραμματισμού με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της επαναχρησιμοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας. Για παράδειγμα, οι Masanet et al. (2020) και Mytton και Ashtine (2022) τάσσονται υπέρ της συζήτησης για τις παγκόσμιες εκτιμήσεις ενεργειακής κατανάλωσης των κέντρων δεδομένων, ενώ οι Lei και Masanet (2022), Kim et al. (2024), Yuan et al. (2023) και Haghshenas et al. (2023) υποστηρίζουν την ανάλυση της PUE και WUE, της ψύξης που εξαρτάται από το κλίμα και της υγρής ψύξης ή ψύξης με εμβάπτιση. Η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων εξετάστηκε μέσω πηγών σχετικά με την απόκριση στη ζήτηση, τη ρύθμιση συχνότητας και τη γεωγραφική μετατόπιση φορτίου (Chen et al., 2020; Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022; Lindberg et al., 2021, 2022; Sheikholeslami et al., 2022).

Περιλήφθηκαν επίσης θεσμικές και τεχνικές πηγές, επειδή η απόδοση του κέντρου δεδομένων διαμορφώθηκε σε μεγάλο βαθμό από πρότυπα και πολιτικές. Η σειρά ISO/IEC 30134 χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση βασικών δεικτών απόδοσης όπως οι PUE, WUE, CUE και ERE (International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2026). Οι οδηγίες της ASHRAE υποστηρίζουν τη συζήτηση για τα θερμικά περιβλήματα και τον σχεδιασμό ψύξης (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021). Χρησιμοποιήθηκαν επίσης πηγές πολιτικής και βέλτιστων πρακτικών της ΕΕ για τη σύνδεση της ανάλυσης με τις υποχρεώσεις υποβολής εκθέσεων, τον

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Κώδικα Δεοντολογίας της ΕΕ και το κοινό σύστημα αξιολόγησης για τα κέντρα δεδομένων (Acton et al., 2024; European Commission, 2024).

4.3 Δείκτες και αναλυτικές μεταβλητές

Η μελέτη χρησιμοποίησε ένα σύνολο τεχνικών, περιβαλλοντικών και χωροθετικών δεικτών. Αρχικά, η ενεργειακή απόδοση αξιολογήθηκε μέσω των PUE, DCiE και μερικής PUE, ενώ η υδατική και ανθρακική απόδοση εξετάστηκε μέσω WUE και CUE. Το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης θερμότητας συνδέθηκε με το ERE και με τη διαθεσιμότητα θερμικής ζήτησης σε εγγύτερη απόσταση. Αυτοί οι δείκτες δεν αντιμετωπίστηκαν ως μεμονωμένα μέτρα, αλλά ερμηνεύθηκαν μαζί, μιας και ένα κέντρο δεδομένων μπορεί να επιτύχει χαμηλή PUE αυξάνοντας παράλληλα τη χρήση νερού ή να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα μέσω ενός δικτύου χαμηλών εκπομπών άνθρακα, ακόμη και αν η PUE του δεν είναι η χαμηλότερη δυνατή (Mytton, 2021; Lei & Masanet, 2022).

Για την επιλογή τοποθεσίας, οι βασικές μεταβλητές αποτέλεσαν η κλιματική καταλληλότητα, η ένταση άνθρακα του δικτύου, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, η αξιοπιστία του δικτύου, ο υδατικός κίνδυνος, η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η συνδεσιμότητα και το κανονιστικό περιβάλλον. Η κλιματική καταλληλότητα αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις θερμοκρασίας, υγρασίας και βαθμοημερών ψύξης ή θέρμανσης, υποστηριζόμενη από σύνολα δεδομένων όπως τα NASA POWER και ERA5 (NASA Langley Research Center, n.d.; Copernicus Climate Change Service, n.d.). Το ανανεώσιμο δυναμικό αντιπροσωπεύεται μέσω συνόλων δεδομένων ηλιακών και αιολικών πόρων, συμπεριλαμβανομένων του Παγκόσμιου Ηλιακού Άτλαντα και του Παγκόσμιου Αιολικού Άτλαντα (Energy Sector Management Assistance Program, 2019; Floors et al., 2025). Η ένταση άνθρακα του δικτύου και το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας υποστηρίχθηκαν από το Electricity Maps και την Ember, ενώ οι τιμές και η αξιοπιστία της ηλεκτρικής ενέργειας υποστηρίχθηκαν από τους δείκτες της Eurostat, του CEER/ECRB και της World Bank (Council of European Energy Regulators & Energy Community Regulatory Board, 2022; Electricity Maps, n.d.; Ember, n.d.; Eurostat, n.d.; World Bank, n.d.). Τέλος, ο υδατικός κίνδυνος αξιολογήθηκε μέσω δεικτών WRI Aqueduct (Kuzma et al., 2023).

4.4 Ανάλυση αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων

Για το μέρος της επιλογής τοποθεσίας της μελέτης χρησιμοποιήθηκε MCDA, επειδή η βέλτιστη τοποθεσία για ένα βιώσιμο κέντρο δεδομένων δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ένα μόνο κριτήριο. Ένα ψυχρό κλίμα μπορεί να ελαχιστοποιήσει την ενέργεια ψύξης, αλλά η ίδια η τοποθεσία μπορεί να έχει ασθενέστερη συνδεσιμότητα ή υψηλότερο κόστος κατασκευής (Wang et al., 2024). Ομοίως, μια περιοχή με εξαιρετικό ηλιακό δυναμικό μπορεί αντίστοιχα να αντιμετωπίσει περιορισμούς λόγω θερμότητας και νερού. Έτσι, επιλέχθηκε η MCDA, καθώς επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση αυτών των παραγόντων (Asadov et al., 2025).

Η μελέτη χρησιμοποίησε ένα σταθμισμένο μοντέλο βαθμολόγησης, που βασίζεται στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), η οποία χρησιμοποιείται ευρέως για την ιεράρχηση εναλλακτικών λύσεων βάσει πολλαπλών κριτηρίων (Saaty, 1980, 2008). Τα κύρια κριτήρια ήταν η κλιματική καταλληλότητα, η ένταση άνθρακα του δικτύου, η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η αξιοπιστία του δικτύου, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, η διαθεσιμότητα νερού, η συνδεσιμότητα δικτύου και η πολιτική και ρυθμιστική σταθερότητα. Κάθε κριτήριο βαθμολογήθηκε σε συγκρίσιμη κλίμακα, για παράδειγμα από 1 έως 5, και πολλαπλασιάστηκε με ένα καθορισμένο βάρος. Η τελική βαθμολογία τοποθεσίας υπολογίστηκε ως:

$$\text{Τελική βαθμολογία τοποθεσίας} = \sum (\text{βαθμολογία κριτηρίου} \times \text{βάρος κριτηρίου})$$

Αυτή η απλή δομή επιλέχθηκε ως η πλέον κατάλληλη για την παρούσα έρευνα, μιας και βασίζεται σε δευτερογενή δεδομένα, ενώ παράλληλα επέτρεψε τη διαφανή σύγκριση εναλλακτικών τοποθεσιών. Η ευρύτερη θεωρία της πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων χρησιμοποιήθηκε ως μεθοδολογική υποστήριξη για την κατάταξη εναλλακτικών λύσεων και την ερμηνεία των συμβιβασμών (Hwang & Yoon, 1981).

4.5 Σχεδιασμός μελετών περίπτωσης

Οι μελέτες περίπτωσης χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνδεση της τεχνικής ανάλυσης και της ανάλυσης επιλογής τοποθεσίας με παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο. Επιλέχθηκαν με βάση τη συνάφεια με το θέμα της παρούσης εργασίας, τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων δημοσιευμένων δεδομένων, την αναπαράσταση διαφορετικών ενεργειακών ή κλιματικών συνθηκών και τη σύνδεση με ένα από τα κύρια ερευνητικά θέματα, όπως η χωροθέτηση σε

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

ψυχρό κλίμα, η επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας και η λειτουργία έξυπνου δικτύου ή με επίγνωση του άνθρακα.

Στην εργασία αναλύθηκαν τρεις κατηγορίες μελετών περίπτωσης. Η πρώτη εξέτασε τα κέντρα δεδομένων ψυχρού κλίματος, τα οποία είναι προσανατολισμένα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, χρησιμοποιώντας τις περιπτώσεις Google Hamina και Meta Luleå, σχετικές με την ψύξη, την ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια και τις συνθήκες χωροθέτησης στις σκανδιναβικές χώρες (Google, n.d.; Hitachi Energy, n.d.; Meta, n.d.). Η δεύτερη εξέτασε την επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας και την ενσωμάτωση της τηλεθέρμανσης, με την Ανοιχτή Τηλεθέρμανση της Στοκχόλμης ως ισχυρό παράδειγμα ανάκτησης αστικής θερμότητας από κέντρα δεδομένων (Covenant of Mayors — Europe, 2023; Stockholm Exergi, n.d.; UNEP Copenhagen Climate Centre, n.d.). Το τρίτο αποτέλεσε σενάριο περίπτωσης έξυπνου δικτύου βασισμένο στη βιβλιογραφία, υποστηριζόμενο από μελέτες σχετικά με την απόκριση στη ζήτηση, τη μετατόπιση του φόρτου εργασίας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη λειτουργία με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Asadov et al., 2025; Fu et al., 2025; Lindberg et al., 2022; Wang et al., 2019).

4.6 Πλαίσιο σεναρίου και περιορισμοί

Στην ανάλυση συγκρίνονται τέσσερα σενάρια: ένα βασικό κέντρο δεδομένων με συμβατική τροφοδοσία δικτύου και ψύξη, ένα ενεργειακά αποδοτικό σενάριο ψύξης που χρησιμοποιεί ελεύθερη ψύξη ή υγρή ψύξη όπου είναι κατάλληλο, ένα σενάριο ενσωμάτωσης έξυπνου δικτύου που χρησιμοποιεί απόκριση στη ζήτηση, μπαταρίες και δυναμική διαχείριση ενέργειας, και ένα σενάριο τοποθεσίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα που συνδυάζει το ευνοϊκό κλίμα, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη χαμηλή ένταση άνθρακα δικτύου. Αυτά τα σενάρια εξετάστηκαν αναλυτικά, όχι ως πειραματικές προσομοιώσεις.

Τον κύριο περιορισμό αποτέλεσε η εξάρτηση της έρευνας από δευτερογενή δεδομένα. Αυτό συνέβη καθώς πολλά εμπορικά κέντρα δεδομένων δεν δημοσιεύουν λεπτομερή λειτουργικά δεδομένα, ειδικά για PUE σε πραγματικό χρόνο, WUE, τον προγραμματισμό φόρτου εργασίας ή τη συμμετοχή στην απόκριση στη ζήτηση. Επομένως, τα αποτελέσματα θα πρέπει να ερμηνεύονται ως συγκριτικά και ενδεικτικά και όχι ως ακριβείς λειτουργικές μετρήσεις. Οι διαφορές στα όρια αναφοράς, τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και τα σύνολα των δεδομένων έντασης άνθρακα ενδέχεται επίσης να

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

επηρεάσουν τη συγκρισιμότητα. Παρ' όλα αυτά, συνδυάζοντας βιβλιογραφία και πρότυπα, ανοιχτά σύνολα δεδομένων με τεκμηριωμένες μελέτες περιπτώσεων, η μεθοδολογία παρέχει μια διαφανή βάση για την αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο τα κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς μπορούν να γίνουν πιο ενεργειακά αποδοτικά, διαδραστικά με το δίκτυο και στρατηγικά τοποθετημένα.

5. Αποτελέσματα I: Ενεργειακά Προφίλ Κέντρων Δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρώτο σύνολο των αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφική ανάλυση και την ανάλυση βάσει δεικτών, δηλαδή το ενεργειακό προφίλ των σύγχρονων κέντρων δεδομένων. Δεδομένου ότι η διπλωματική εργασία βασίζεται σε μικτή έρευνα, συνδυάζοντας ανασκόπηση βιβλιογραφίας και μελέτες περίπτωσης, τα ευρήματα σε αυτό το κεφάλαιο δεν παρουσιάζονται ως άμεσες μετρήσεις από μια συγκεκριμένη εγκατάσταση, αλλά συνθέτουν τα στοιχεία από την ακαδημαϊκή βιβλιογραφία, τα τεχνικά πρότυπα και τις θεσμικές πηγές, όπως συζητήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Στόχος είναι να προσδιοριστεί το σημείο που καταναλώνεται ενέργεια μέσα σε ένα κέντρο δεδομένων, ποιοι παράγοντες αυξάνουν ή μειώνουν αυτή τη ζήτηση και γιατί η ενεργειακή απόδοση δεν πρέπει να αξιολογηθεί μόνο μέσω της PUE.

5.1 Ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας των κέντρων δεδομένων

Το ενεργειακό προφίλ ενός κέντρου δεδομένων μπορεί να χωριστεί σε φορτίο IT και μη-IT φορτίο, όπου το φορτίο IT περιλαμβάνει διακομιστές, συστήματα αποθήκευσης και

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

εξοπλισμό δικτύωσης. Αυτό είναι το παραγωγικό μέρος της χρήσης ενέργειας, επειδή υποστηρίζει άμεσα ψηφιακές υπηρεσίες όπως το cloud computing, η τεχνητή νοημοσύνη, η διανομή περιεχομένου και οι εφαρμογές IoT (Masanet et al., 2020). Το μη-IT φορτίο περιλαμβάνει συστήματα ψύξης, απώλειες UPS, απώλειες διανομής ισχύος, φωτισμό, συστήματα παρακολούθησης και άλλες βοηθητικές υποδομές (Lindberg et al., 2021). Στην πράξη, σχεδόν όλη η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από τον εξοπλισμό πληροφορικής μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία στη συνέχεια δημιουργεί μια δευτερογενή ζήτηση ψύξης (Wang et al., 2024). Αυτό σημαίνει ότι οι αυξήσεις στην πυκνότητα ισχύος του IT φορτίου αυξάνουν επίσης την πίεση στα συστήματα ψύξης (Asadon et al., 2025).

Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η παγκόσμια αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης των κέντρων δεδομένων έχει ιστορικά μετριάσει από βελτιώσεις στην απόδοση του υλικού, την εικονικοποίηση και τη βελτιστοποίηση σε επίπεδο εγκατάστασης (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022). Ωστόσο, η τρέχουσα ανάπτυξη της Τεχνητής Νοημοσύνης και της υπολογιστικής υψηλής πυκνότητας αλλάζει το ενεργειακό προφίλ των εγκαταστάσεων (Wang et al., 2024). Οι φόρτοι εργασίας εκπαίδευσης και εξαγωγής συμπερασμάτων στην Τεχνητή Νοημοσύνη δημιουργούν υψηλότερες πυκνότητες ισχύος ανά rack και πιο έντονα θερμικά φορτία, καθιστώντας την ψύξη και τη διανομή ισχύος ολοένα και πιο σημαντική (International Energy Agency, 2025; Kim et al., 2024). Επομένως, η ενεργειακή απόδοση πρέπει να αναλυθεί ως ζήτημα σε επίπεδο συστήματος και όχι απλώς ως απόδοση διακομιστή.

Κατηγορία κατανάλωσης	Ρόλος στο ενεργειακό προφίλ	Επίδραση στην απόδοση
Φορτίο IT	Servers, storage, switches, AI accelerators	Κύρια πηγή χρήσιμης κατανάλωσης και θερμότητας
Ψύξη	CRAC/CRAH, chillers, free cooling, liquid cooling	Άμεση επιρροή από την PUE και την WUE
UPS και διανομή ισχύος	Μετατροπές, απώλειες, εφεδρεία	Αυξάνει το μη-IT φορτίο
Δικτυακός εξοπλισμός	Leaf-spine, switching, connectivity	Αύξηση με high-speed data traffic
Βοηθητικά συστήματα	Φωτισμός, ασφάλεια, monitoring	Μικρότερη αλλά υπαρκτή επίδραση

5.2 Επίδραση του τύπου φόρτου εργασίας

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν ότι διαφορετικοί φόρτοι εργασίας έχουν διαφορετικά ενεργειακά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά ευελιξίας. Οι παραδοσιακοί φόρτοι εργασίας αποθήκευσης στο cloud και οι εταιρικοί φόρτοι εργασίας είναι σχετικά σταθεροί, ενώ το streaming και η διανομή περιεχομένου είναι πιο ευαίσθητα στη γεωγραφία και τη ζήτηση των χρηστών (Lindberg et al., 2021). Αντίστοιχα, η εκπαίδευση στην Τεχνητή Νοημοσύνη έχει πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος, αλλά συχνά μπορεί να προγραμματιστεί με κάποια ευελιξία, ενώ η εξαγωγή συμπερασμάτων στην Τεχνητή Νοημοσύνη είναι πιο συνεχής και με μικρή ανοχή στην καθυστέρηση. Οι φόρτοι εργασίας IoT και edge είναι γεωγραφικά κατανεμημένοι και ενδέχεται να απαιτούν επεξεργασία πιο κοντά στους χρήστες (Asadov et al., 2025).

Αυτή η διάκριση είναι σημαντική επειδή το ίδιο κέντρο δεδομένων ενδέχεται να μην έχει ένα ενιαίο ενεργειακό προφίλ καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας ή καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργικής του ζωής (Wang et al., 2024). Μια εγκατάσταση στην οποία κυριαρχεί η εκπαίδευση στην Τεχνητή Νοημοσύνη θα απαιτεί ισχυρότερη υποδομή ισχύος και ψύξης από μια εγκατάσταση που χρησιμοποιείται κυρίως για αποθήκευση (Haghshenas et al., 2023). Ταυτόχρονα, οι ευέλικτοι φόρτοι εργασίας μπορούν να υποστηρίξουν τον προγραμματισμό με επίγνωση του άνθρακα και τη γεωγραφική μετατόπιση φορτίου, όπως φαίνεται σε μελέτες σχετικά με τη μετεγκατάσταση φόρτου εργασίας και τη λειτουργία με επίγνωση του άνθρακα (Lindberg et al., 2021, 2022; Asadov et al., 2025; Fu et al., 2025).

Τύπος φόρτου εργασίας	Ενεργειακό χαρακτηριστικό	Δυνατότητα μετατόπισης
Cloud storage	Σταθερό φορτίο	Μέτρια
Streaming/content delivery	Αιχμές ανάλογα με τη ζήτηση	Περιορισμένη λόγω latency
AI training	Πολύ υψηλή πυκνότητα ισχύος	Υψηλή/μέτρια
AI inference	Συνεχές και αυξανόμενο φορτίο	Μέτρια/χαμηλή
IoT/edge workloads	Κατανεμημένο φορτίο	Εξαρτάται από latency

5.3 Ζήτηση ενέργειας που σχετίζεται με την ψύξη

Η ψύξη είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την ενεργειακή απόδοση των κέντρων δεδομένων. Σε συμβατικές αερόψυκτες εγκαταστάσεις, η

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

μηχανική ψύξη, οι ανεμιστήρες και η διαχείριση της ροής του αέρα μπορούν να αντιπροσωπεύουν ένα σημαντικό μερίδιο της μη-IT ενεργειακής κατανάλωσης (Wang et al., 2024). Η ελεύθερη ψύξη μπορεί να μειώσει αυτή τη ζήτηση όταν οι τοπικές κλιματικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, ειδικά σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες υγρού βολβού και μεγάλες περιόδους δροσερού ατμοσφαιρικού αέρα (Lei & Masanet, 2022; Kim et al., 2024). Αυτό επιβεβαιώνει τη σημασία του κλιματικά ευαίσθητου σχεδιασμού και της στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας.

Η υγρή ψύξη και η ψύξη με εμβάπτιση είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τα racks υψηλής πυκνότητας ισχύος, καθώς αποτελούν τεχνολογίες που μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας των ανεμιστήρων και να βελτιώσουν την απόδοση μεταφοράς θερμότητας, αυξάνοντας παράλληλα τη θερμοκρασία της ανακτήσιμης θερμότητας. Αυτή η τακτική βελτιώνει τις δυνατότητες επαναχρησιμοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας στην τηλεθέρμανση ή σε κοντινά θερμικά δίκτυα (Yuan et al., 2023; Haghshenas et al., 2023; Huang et al., 2020). Ωστόσο, η ανάλυση δείχνει επίσης ότι οι επιλογές ψύξης περιλαμβάνουν συμβιβασμούς. Η ψύξη με εξάτμιση μπορεί να μειώσει την PUE αλλά να αυξήσει ταυτόχρονα την κατανάλωση νερού, καθιστώντας την WUE απαραίτητη σε περιοχές με υδατικό στρες (Mytton, 2021; Ristić et al., 2015).

5.4 Ερμηνεία των PUE, WUE και CUE

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι η PUE είναι απαραίτητη αλλά όχι επαρκής. Συγκεκριμένα, μια χαμηλή PUE υποδεικνύει ότι χρησιμοποιείται λιγότερη ενέργεια από μη-IT υποδομές, αλλά δεν αποκαλύπτει εάν η ηλεκτρική ενέργεια είναι υψηλής έντασης άνθρακα, εάν καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες νερού ή εάν επαναχρησιμοποιείται η απορριπτόμενη θερμότητα (Kim et al., 2024). Για τον λόγο αυτό, η διπλωματική εργασία αξιολογεί την PUE μαζί με την WUE, την CUE και την ERE, ακολουθώντας τη λογική των δεικτών απόδοσης ISO/IEC 30134 (International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2026).

Ένα κέντρο δεδομένων ψυχρού κλίματος που χρησιμοποιεί ελεύθερη ψύξη μπορεί να επιτύχει χαμηλή PUE, αλλά εάν η ηλεκτρική του ενέργεια προέρχεται από ένα δίκτυο υψηλής έντασης άνθρακα, η CUE του μπορεί να παραμείνει υψηλή (Wang et al., 2024). Ομοίως, ένα σύστημα ψύξης με εξάτμιση μπορεί να βελτιώσει την PUE αλλά να επιδεινώσει την WUE. Μια

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

εγκατάσταση με μέτρια PUE μπορεί να εξακολουθεί να έχει καλή περιβαλλοντική απόδοση εάν τροφοδοτείται από ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα και επαναχρησιμοποιεί την απορριπτόμενη θερμότητα (Asadov et al., 2025). Αυτό υποστηρίζει το κεντρικό επιχείρημα της διπλωματικής εργασίας, την ανάγκη η ενεργειακή απόδοση να αξιολογείται μέσω ενός πλαισίου πολλαπλών δεικτών.

Σενάριο	Αναμενόμενη PUE	Αναμενόμενη WUE	Αναμενόμενη CUE	Ερμηνεία
Συμβατικό κέντρο δεδομένων	Υψηλότερη	Μεσαία	Εξαρτάται από το δίκτυο	Περιορισμένη βελτιστοποίηση
Ψυχρό κλίμα/free cooling	Χαμηλότερη	Χαμηλή/μεσαία	Εξαρτάται από το δίκτυο	Ισχυρό πλεονέκτημα ψύξης
Εξατμιστική ψύξη	Χαμηλή	Υψηλότερη	Εξαρτάται από το δίκτυο	Trade-off νερού–ενέργειας
Υγρή/immersion ψύξη	Χαμηλή/μεσαία	Χαμηλή/μεσαία	Εξαρτάται από το δίκτυο	Κατάλληλη για high-density racks
ΑΠΕ + αποθήκευση	Μεταβλητή	Μεταβλητή	Χαμηλή	Ισχυρή μείωση εκπομπών

Το κύριο εύρημα του παρόντος κεφαλαίου είναι πως η ενεργειακή απόδοση των κέντρων δεδομένων διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση του IT φορτίου, της τεχνολογίας ψύξης, του τοπικού κλίματος, της έντασης άνθρακα του δικτύου, της διαθεσιμότητας νερού και της λειτουργικής ευελιξίας (Wang et al., 2024). Οι σημαντικότερες πηγές πίεσης στην κατανάλωση ενέργειας είναι οι φόρτοι εργασίας πληροφορικής υψηλής πυκνότητας και η ζήτηση ψύξης (Asadov et al., 2025). Έτσι, τις ισχυρότερες ευκαιρίες βελτίωσης αποτελούν η ελεύθερη ψύξη σε κατάλληλα κλίματα, η υγρή ψύξη ή η ψύξη με εμβάπτιση για συστήματα υψηλής πυκνότητας, η διαχείριση φόρτου εργασίας, η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η επαναχρησιμοποίηση θερμότητας (Yuan et al., 2023). Αυτά τα ευρήματα παρέχουν τη βάση για το επόμενο κεφάλαιο, το οποίο εξετάζει τον τρόπο που η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων μπορεί να μετατρέψει το κέντρο δεδομένων από έναν παθητικό καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας σε έναν πιο ενεργό και ευέλικτο ενεργειακό πόρο.

6. Αποτελέσματα II: Ενσωμάτωση Έξυπνων Δικτύων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το δεύτερο σύνολο αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφική ανάλυση και ανάλυση σεναρίων, ήτοι την πιθανή ενσωμάτωση κέντρων δεδομένων σε έξυπνα δίκτυα. Όπως αναφέρθηκε στη μεθοδολογία, τα αποτελέσματα δεν βασίζονται σε πρωτογενείς πειραματικές δοκιμές, αλλά στη σύνθεση ακαδημαϊκών μελετών, τεχνικών πηγών και τεκμηριωμένων λειτουργικών μοντέλων. Η ανάλυση φέρει αποτέλεσμα ότι τα κέντρα δεδομένων μπορούν να ξεπεράσουν τον ρόλο των παθητικών καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας και να γίνουν ευέλικτες, ελεγχόμενες υποδομές που υποστηρίζουν εν μέρει το δίκτυο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώνεται όλο και περισσότερο από την Τεχνητή Νοημοσύνη, το cloud computing, τους διακομιστές υψηλής πυκνότητας και τις ψηφιακές υπηρεσίες 24/7.

6.1 Κέντρα δεδομένων ως ευέλικτα ενεργειακά φορτία

Παραδοσιακά, τα κέντρα δεδομένων αντιμετωπίζονταν ως μεγάλοι και σχετικά άκαμπτοι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Η κύρια προτεραιότητά τους ήταν η συνεχής διαθεσιμότητα, συνήθως υποστηριζόμενη από πλεονάζοντα συστήματα ισχύος, μονάδες UPS, εφεδρική τροφοδοσία και συντηρητικές λειτουργικές πρακτικές (Yuan et al., 2023). Ωστόσο, η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα κέντρα δεδομένων περιέχουν διάφορες μορφές ευελιξίας (Asadov et al., 2025). Αυτές περιλαμβάνουν τη μετατόπιση του φόρτου εργασίας, τον περιορισμό της ισχύος του διακομιστή, την αποθήκευση σε μπαταρίες, τη θερμική αποθήκευση και τη βελτιστοποίηση του συστήματος ψύξης (Chen et al., 2020; Wang et al., 2019; Sheikholeslami et al., 2022).

Το βασικό εύρημα είναι ότι δεν έχουν όλοι οι ψηφιακοί φόρτοι εργασίας την ίδια επείγουσα ανάγκη. Για παράδειγμα, οι υπηρεσίες σε πραγματικό χρόνο, όπως οι βιντεοκλήσεις ή οι εφαρμογές edge που είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση, έχουν περιορισμένη ευελιξία (Yuan et al., 2023). Αντίθετα, η εκπαίδευση στην Τεχνητή Νοημοσύνη, η επεξεργασία παρτίδων, οι λειτουργίες εφεδρικής αντιγραφής δεδομένων και ορισμένοι φόρτοι εργασίας ανάλυσης μπορούν συχνά να καθυστερήσουν, να μετακινηθούν ή να προγραμματιστούν ανάλογα με τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ή την ένταση άνθρακα (Haghshenas et al., 2023). Αυτό δημιουργεί την τεχνική βάση για την απόκριση στη ζήτηση και τη λειτουργία με επίγνωση του άνθρακα (Lindberg et al., 2021, 2022; Asadov et al., 2025).

Τύπος ευελιξίας	Τεχνικός μηχανισμός	Πιθανή συμβολή στο δίκτυο
Μετατόπιση φόρτου εργασίας	Χρονικός ή γεωγραφικός προγραμματισμός	Μείωση αιχμών και εκπομπών
Περιορισμός ισχύος servers	Power capping / QoS-aware control	Γρήγορη μείωση φορτίου
UPS και μπαταρίες	BESS / αποθήκευση ενέργειας	Απόκριση συχνότητας και ride-through
Θερμική αποθήκευση	Chilled water / θερμική αδράνεια	Μετατόπιση ψυκτικού φορτίου
ΑΠΕ και PPAs	Ηλιακή, αιολική, υδροηλεκτρική ενέργεια	Μείωση CUE

6.2 Δυνατότητα απόκρισης στη ζήτηση

Η απόκριση στη ζήτηση είναι ένας από τους πιο άμεσους τρόπους, μέσω των οποίων τα κέντρα δεδομένων μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα έξυπνα δίκτυα. Σε περίπτωση απόκρισης στη ζήτηση, ένα κέντρο δεδομένων μπορεί να μειώσει ή να μετατοπίσει μέρος του φορτίου του ως απόκριση στην καταπόνηση του δικτύου, στις υψηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας ή στις ανάγκες εξισορρόπησης του συστήματος (Asadov et al., 2025). Η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα διαδικτυακά κέντρα δεδομένων μπορούν να συμμετάσχουν στην απόκριση στη ζήτηση, όταν οι τεχνικοί έλεγχοι σχεδιάζονται με βάση συμφωνίες επιπέδου υπηρεσιών και απαιτήσεις αξιοπιστίας (Chen et al., 2020; Sheikholeslami et al., 2022).

Η ανάλυση υποδηλώνει ότι η απόκριση στη ζήτηση είναι η καταλληλότερη για μη κρίσιμους ή ευέλικτους φόρτους εργασίας. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την επεξεργασία παρτίδων, την αναπαραγωγή δεδομένων, την εκπαίδευση μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, τις εργασίες εφεδρικής αντιγραφής δεδομένων και τις εργασίες ανάλυσης (Asadov et al., 2025). Αυτοί οι φόρτοι εργασίας μπορούν να καθυστερήσουν ή να μετακινηθούν σε άλλο χρονικό παράθυρο χωρίς να επηρεάσουν άμεσα τους χρήστες (Haghshenas et al., 2023). Ακόμη, τα συστήματα ψύξης μπορούν επίσης να υποστηρίξουν την απόκριση στη ζήτηση μέσω θερμικής αδράνειας. Για σύντομα χρονικά διαστήματα, η ζήτηση ψύξης μπορεί να προσαρμοστεί, εφόσον τα όρια εσωτερικής θερμοκρασίας παραμένουν εντός αποδεκτών λειτουργικών ορίων, με βάση θερμικές οδηγίες και συστήματα παρακολούθησης (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021).

Ωστόσο, τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι η απόκριση στη ζήτηση δεν μπορεί να εφαρμοστεί ομοιόμορφα σε όλες τις λειτουργίες του κέντρου δεδομένων. Οι κρίσιμες υπηρεσίες με αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης δεν μπορούν να διακοπούν ελεύθερα (Haghshenas et al., 2023). Επομένως, οποιαδήποτε στρατηγική απόκρισης στη ζήτηση πρέπει να περιλαμβάνει ταξινόμηση φόρτου εργασίας, παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, προστασία QoS και αυτοματοποιημένο έλεγχο (Sheikholeslami et al., 2022).

6.3 Ρύθμιση συχνότητας και βοηθητικές υπηρεσίες

Μια δεύτερη ευκαιρία που προκύπτει από την ενσωμάτωση σε έξυπνα δίκτυα είναι η παροχή βοηθητικών υπηρεσιών, ιδίως ρύθμισης συχνότητας. Τα κέντρα δεδομένων είναι τεχνικά

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

κατάλληλα για αυτό, επειδή μπορούν να αντιδράσουν γρήγορα μέσω ελέγχου διακομιστών, συστημάτων UPS και αποθήκευσης ενέργειας σε μπαταρίες (Haghshenas et al., 2023). Οι Wang et al. (2019) υποστηρίζουν ότι η υπολογιστική ευελιξία μπορεί να υποστηρίξει τη ρύθμιση συχνότητας, ενώ οι Jahanshahi et al. (2022) τονίζουν ότι η αναδιαμόρφωση ισχύος διακομιστή με επίγνωση QoS μπορεί να μειώσει τη ζήτηση ισχύος, περιορίζοντας παράλληλα τις επιπτώσεις στην απόδοση.

Το κύριο αποτέλεσμα είναι ότι οι μπαταρίες και τα συστήματα UPS είναι ιδιαίτερα πολύτιμα, επειδή υπάρχουν ήδη σε πολλά κέντρα δεδομένων για σκοπούς ανθεκτικότητας και εφεδρικής τροφοδοσίας (Asadov et al., 2025). Εάν οι κανονιστικές συνθήκες και οι εγγυήσεις των μπαταριών το επιτρέπουν, μέρος αυτής της χωρητικότητας μπορεί να υποστηρίξει το δίκτυο χωρίς να διακυβεύεται η αξιοπιστία (Yuan et al., 2023). Αυτό δημιουργεί μια διπλή λειτουργία: από τη μια η ίδια υποδομή που προστατεύει το κέντρο δεδομένων μπορεί επίσης να παρέχει ευελιξία στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (Sheikholeslami et al., 2022). Ωστόσο, από την άλλη, αυτό απαιτεί προσεκτική λογική ελέγχου, επειδή η εφεδρική δυνατότητα τροφοδοσίας δεν πρέπει να θυσιάζεται για τη συμμετοχή στην αγορά.

6.4 Ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Αντίστοιχα, η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων υποστηρίζει επίσης την καλύτερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα κέντρα δεδομένων μπορούν να συνδυάσουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επί τόπου, συμφωνίες αγοράς ενέργειας εκτός εγκατάστασης, αποθήκευση σε μπαταρίες και προγραμματισμό φόρτου εργασίας με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Haghshenas et al., 2023). Η ηλιακή και αιολική παραγωγή είναι μεταβλητή, επομένως η δυνατότητα μετατόπισης ευέλικτων φόρτων εργασίας προς περιόδους υψηλότερης παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί να μειώσει την ένταση άνθρακα και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Khalil et al. (2022) εξετάζουν την εξισορρόπηση γεωγραφικού φορτίου με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ οι Fu et al. (2025) αναλύουν τη μετεγκατάσταση κοντέινερ με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα πολλαπλών κέντρων δεδομένων. Αυτές οι μελέτες υποστηρίζουν το συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση φόρτου εργασίας μπορεί να γίνει ένα εργαλείο διαχείρισης ενέργειας, όχι μόνο μια απόφαση διαχείρισης IT.

Τα δίκτυα πλούσια σε υδροηλεκτρική ενέργεια και τα δίκτυα χαμηλών εκπομπών άνθρακα είναι επίσης σημαντικά, επειδή μπορούν να μειώσουν τις λειτουργικές εκπομπές άνθρακα ακόμη και όταν η PUE σε επίπεδο εγκατάστασης δεν είναι η χαμηλότερη (Asadon et al., 2025). Αυτό υποστηρίζει τη σύνδεση μεταξύ του Κεφαλαίου 6 και του Κεφαλαίου 7, όπου η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων και η στρατηγική επιλογή τοποθεσίας είναι σημαντικό να αναλυθούν μαζί.

6.5 Μετατόπιση φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα

Ένα σημαντικό αποτέλεσμα, το οποίο προέκυψε από τη βιβλιογραφία, είναι ότι η γεωγραφική μετατόπιση φόρτου εργασίας μπορεί να μειώσει τις εκπομπές μετακινώντας τον υπολογιστικό φόρτο σε περιοχές με διαφορετικά μείγματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οριακές εκπομπές. Οι Lindberg et al. (2021, 2022) υποστηρίζουν ότι η γεωγραφική μετατόπιση φορτίου μπορεί να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα, όταν οι φόρτοι εργασίας μεταφέρονται σε τοποθεσίες με χαμηλότερη ένταση άνθρακα στο δίκτυο. Οι Asadon et al. (2025) συμφωνούν και τονίζουν περαιτέρω τη σημασία της χωροχρονικής μετατόπισης φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα σε περιβάλλοντα edge-cloud.

Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για χαρτοφυλάκια πολλαπλών κέντρων δεδομένων, διότι μία μόνο τοποθεσία έχει περιορισμένη ευελιξία, αλλά ένα δίκτυο τοποθεσιών μπορεί να συγκρίνει τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την ένταση άνθρακα και τους περιορισμούς καθυστέρησης (Fu et al., 2025). Οι φόρτοι εργασίας, που δεν είναι ευαίσθητοι στην καθυστέρηση, δύναται να μετακινηθούν σε καθαρότερες ή φθηνότερες περιοχές (Haghshenas et al., 2023). Ωστόσο, η ανάλυση δείχνει ότι αυτή η στρατηγική έχει όρια. Η κυριαρχία δεδομένων, η καθυστέρηση, το κόστος εύρους ζώνης, η τοποθεσία χρήστη και ο τύπος εφαρμογής μπορούν να περιορίσουν την κινητικότητα του φόρτου εργασίας (Chen et al., 2020).

6.6 Προτεινόμενο μοντέλο ενσωμάτωσης έξυπνου δικτύου

Με βάση την ανάλυση, το προτεινόμενο μοντέλο ενσωμάτωσης περιλαμβάνει οκτώ στοιχεία, αρχικά την έξυπνη μέτρηση, τη παρακολούθηση DCIM/BMS, τη ταξινόμηση φόρτου εργασίας, τη πρόβλεψη παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τον έλεγχο μπαταρίας/UPS, τη βελτιστοποίηση ψύξης, την εισροή σημάτων δικτύου και ένα αυτοματοποιημένο επίπεδο

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

αποφάσεων (Kuzma et al., 2023). Το επίπεδο αποφάσεων συγκεντρώνει πληροφορίες σχετικά με την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, την ένταση άνθρακα, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τα συμβάντα απόκρισης στη ζήτηση (Lindberg et al., 2021). Στη συνέχεια, αποφασίζει εάν θα μειώσει το φορτίο, θα μετατοπίσει το φόρτο εργασίας, θα αποφορτίσει την αποθήκευση, θα προσαρμόσει την ψύξη ή θα διατηρήσει την κανονική λειτουργία (Fu et al., 2025).

Στοιχείο μοντέλου	Λειτουργία
Smart metering	Σύλλογή δεδομένων κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο
DCIM/BMS	Παρακολούθηση ισχύος, θερμοκρασίας και ψύξης
Workload scheduler	Ταξινόμηση και μετατόπιση ευέλικτων εργασιών
Battery/UPS controller	Απόκριση συχνότητας και υποστήριξη αιχμών
Cooling optimiser	Ρύθμιση ψύξης με βάση θερμοκά όρια
Grid signals	Τιμή, άνθρακας, DR events
Decision layer	Επιλογή δράσης: μείωση, μετατόπιση, αποθήκευση ή κανονική λειτουργία

Τα ευρήματα δείχνουν ότι η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων μπορεί να μετατρέψει τα κέντρα δεδομένων σε ενεργούς συμμετέχοντες στο ενεργειακό σύστημα. Συγκεκριμένα, οι ισχυρότερες ευκαιρίες αποτελούν την απόκριση στη ζήτηση, η ρύθμιση της συχνότητας, η ευελιξία που υποστηρίζεται από μπαταρίες, η μετατόπιση του φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα και ο προγραμματισμός με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Kuzma et al., 2023). Ωστόσο, αυτές οι ευκαιρίες εξαρτώνται από τον αυτοματισμό, την πρόσβαση στην αγορά, την ευελιξία του φόρτου εργασίας και την αυστηρή προστασία του QoS (Haghshenas et al., 2023). Επομένως, η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ξεχωριστή πρόσθετη λειτουργία, αλλά ως μέρος του ευρύτερου σχεδιασμού των κέντρων δεδομένων επόμενης γενιάς, μαζί με την τεχνολογία ψύξης, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη στρατηγική επιλογή τοποθεσίας (Fu et al., 2025).

7. Αποτελέσματα III: Στρατηγική Επιλογή Τοποθεσίας

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το τρίτο σύνολο αποτελεσμάτων από την έρευνα, όπως τη στρατηγική επιλογή κατάλληλων τοποθεσιών για κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς. Όπως έχει περιγραφεί στη μεθοδολογία, η ανάλυση βασίστηκε σε δευτερογενή δεδομένα, βιβλιογραφικά στοιχεία και ένα πλαίσιο ανάλυσης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (MCDA) και όχι σε πρωτογενείς μετρήσεις πεδίου. Σκοπός λοιπόν δεν είναι να προσδιοριστεί μια καθολικά καλύτερη τοποθεσία, αλλά να φανερώσει πώς η καταλληλότητα της τοποθεσίας θα πρέπει να αξιολογείται μέσω ενός συνδυασμού ενεργειακών, περιβαλλοντικών, τεχνικών και κανονιστικών κριτηρίων (Kuzma et al., 2023). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βέλτιστη τοποθεσία ενός κέντρου δεδομένων δεν καθορίζεται μόνο από την τιμή της γης, τη

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

συνδεσιμότητα ή το κλίμα, αλλά από την αλληλεπίδραση μεταξύ του δυναμικού ψύξης, της έντασης άνθρακα του δικτύου, της διαθεσιμότητας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, του υδατικού κινδύνου, της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας, της αξιοπιστίας του δικτύου και της πρόσβασης σε δικτυακές υποδομές (Sheikholeslami et al., 2022).

7.1 Γιατί η τοποθεσία έχει σημασία

Η γεωγραφική θέση αποτελεί θεμελιώδη διαρθρωτικό παράγοντα που καθορίζει την ενεργειακή και περιβαλλοντική αποδοτικότητα ενός κέντρου δεδομένων, καθώς επηρεάζει άμεσα τις απαιτήσεις ψύξης, την ένταση άνθρακα του ηλεκτρικού δικτύου, τη βιωσιμότητα ενσωμάτωσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τη δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας, την έκθεση σε κινδύνους υδατικής καταπόνησης, αλλά και την εξασφάλιση υπηρεσιών χαμηλής καθυστέρησης (Sheikholeslami et al., 2022). Όπως έχει προεκτεθεί, η αξιολόγηση των δεικτών αποτελεσματικότητας PUE, WUE και CUE απαιτεί μια ολιστική και όχι αποσπασματική προσέγγιση λόγω των εγγενών αλληλεξαρτήσεών τους, καθώς οι περιβαλλοντικοί και λειτουργικοί συμβιβασμοί διαφοροποιούνται σημαντικά ανάλογα με το μικροκλίμα και τις τοπικές υποδομές (Kuzma et al., 2023). Χαρακτηριστικά, ένα ψυχρό κλίμα ευνοεί τη μείωση του φορτίου ψύξης βελτιώνοντας τον δείκτη PUE, όμως η συνολική επίδοση σε εκπομπές ρύπων ενδέχεται να παραμείνει χαμηλή, εάν το δίκτυο βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα (Fu et al., 2025). Στον αντίποδα, περιοχές με υψηλό ηλιακό δυναμικό προσφέρονται για την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών συστημάτων, αλλά συχνά συνεπάγονται αυξημένες θερμικές επιβαρύνσεις (Asadov et al., 2025) και έντονη υδατική στενότητα που υποβαθμίζουν τον δείκτη WUE (Chen et al., 2020).

Η βιβλιογραφία υποστηρίζει αυτήν την πολυδιάστατη ερμηνεία. Οι Lei και Masanet (2022) δείχνουν ότι οι PUE και WUE εξαρτώνται από το κλίμα και την τεχνολογία, πράγμα που σημαίνει ότι ο ίδιος σχεδιασμός κέντρου δεδομένων μπορεί να έχει διαφορετική απόδοση μεταξύ περιοχών. Οι Kim et al. (2024) καταδεικνύουν επίσης ότι ο τύπος του economizer/συστήματος ελεύθερης ψύξης και η κλιματική ζώνη επηρεάζουν έντονα την ενεργειακή απόδοση του κέντρου δεδομένων. Ταυτόχρονα, οι Mytton (2021) και Ristić et al. (2015) υποστηρίζουν ότι η χρήση νερού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη παράλληλα με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα όταν εφαρμόζεται ψύξη με εξάτμιση. Επομένως, η στρατηγική επιλογή τοποθεσίας πρέπει να ενσωματώνει κριτήρια κλίματος, ενέργειας, νερού και υποδομών.

7.2 Κριτήρια επιλογής τοποθεσίας

Το πλαίσιο MCDA που αναπτύχθηκε σε αυτή τη διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί οκτώ κύρια κριτήρια: κλιματική καταλληλότητα, ένταση άνθρακα δικτύου, διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αξιοπιστία δικτύου, κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, διαθεσιμότητα νερού, συνδεσιμότητα δικτύου και πολιτική και ρυθμιστική σταθερότητα. Αυτά τα κριτήρια αντικατοπτρίζουν τους κύριους τεχνικούς παράγοντες και τους παράγοντες βιωσιμότητας που προσδιορίζονται στη βιβλιογραφία και τη μεθοδολογία.

Κριτήριο	Σημασία για τη χωροθέτηση
Κλιματική καταλληλότητα	Επηρεάζει τη δυνατότητα free cooling και τη ζήτηση ψύξης
Ένταση άνθρακα δικτύου	Καθορίζει τις λειτουργικές εκπομπές
Διαθεσιμότητα ΑΠΕ	Υποστηρίζει χαμηλότερο CUE και πράσινη προμήθεια ενέργειας
Αξιοπιστία δικτύου	Μειώνει τον κίνδυνο διακοπών και ανάγκη εφεδρείας
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	Επηρεάζει άμεσα το OPEX
Διαθεσιμότητα νερού / υδατικό στρες	Επηρεάζει WUE και επιλογές ψύξης
Συνδεσιμότητα	Επηρεάζει latency, redundancy και πρόσβαση σε αγορές
Πολιτική και ρυθμιστική σταθερότητα	Επηρεάζει επενδυτική ασφάλεια και αδειοδότηση

Για την ανάλυση του κλίματος, σύνολα δεδομένων όπως τα NASA POWER και ERA5 μπορούν να υποστηρίξουν μεταβλητές που σχετίζονται με τη θερμοκρασία, την υγρασία και την ψύξη (NASA Langley Research Center, n.d.; Copernicus Climate Change Service, n.d.). Το ανανεώσιμο δυναμικό μπορεί να αξιολογηθεί μέσω του Παγκόσμιου Ηλιακού Άτλαντα και του Παγκόσμιου Αιολικού Άτλαντα (Energy Sector Management Assistance Program, 2019; Floors et al., 2025). Η ένταση του άνθρακα και το μείγμα ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να υποστηριχθούν από το Electricity Maps και την Ember, ενώ οι τιμές και η αξιοπιστία της ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να αξιολογηθούν χρησιμοποιώντας δείκτες της Eurostat, του CEER/ECRB και της World Bank (Council of European Energy Regulators & Energy Community Regulatory Board, 2022; Electricity Maps, n.d.; Ember, n.d.; Eurostat, n.d.; World Bank, n.d.). Ο υδατικός κίνδυνος μπορεί να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας δείκτες Aqueduct (Kuzma et al., 2023) και η συνδεσιμότητα μπορεί να αξιολογηθεί μέσω χαρτογράφησης υποθαλάσσιων καλωδίων και οπτικών ινών, όπως το TeleGeography (n.d.).

7.3 Πλαίσιο βαθμολόγησης MCDA

Η μεθοδολογική ανάλυση έδειξε ότι ένα σταθμισμένο μοντέλο MCDA αποτέλεσε το καταλληλότερο εργαλείο για την παρούσα εργασία, επειδή επιτρέπει τη διαφανή σύγκριση διαφορετικών κριτηρίων. Ακολουθώντας τη λογική της AHP και της πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων, κάθε κριτήριο βαθμολογείται σε μια κοινή κλίμακα και πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή βαρύτητας (Saaty, 1980, 2008; Hwang & Yoon, 1981).

Βαθμολογία	Ερμηνεία
1	Πολύ χαμηλή καταλληλότητα
2	Χαμηλή καταλληλότητα
3	Μέτρια καταλληλότητα
4	Υψηλή καταλληλότητα
5	Πολύ υψηλή καταλληλότητα

Η προτεινόμενη στάθμιση αντανakλά την εστίαση της έρευνας στην ενεργειακή απόδοση, την ουδετερότητα άνθρακα και τη στρατηγική επιλογή τοποθεσίας. Η κλιματική καταλληλότητα και η ένταση άνθρακα του δικτύου λαμβάνουν το υψηλότερο βάρος, επειδή επηρεάζουν άμεσα την PUE και την CUE (Sheikholeslami et al., 2022). Η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η αξιοπιστία του δικτύου, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ο υδατικός κίνδυνος, η συνδεσιμότητα και η πολιτική σταθερότητα περιλαμβάνονται στη συνέχεια για την παροχή μιας ισορροπημένης αξιολόγησης (Haghshenas et al., 2023).

Κριτήριο	Ενδεικτικό βάρος
Κλιματική καταλληλότητα	20%
Ένταση άνθρακα δικτύου	20%
Διαθεσιμότητα ΑΠΕ	15%
Αξιοπιστία δικτύου	10%
Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	10%
Υδατικό στρες / νερό	10%
Συνδεσιμότητα	10%
Ρυθμιστική σταθερότητα	5%

7.4 Κατηγορίες υποψήφιων τοποθεσιών

Η ανάλυση υποδηλώνει ότι η επιλογή τοποθεσίας θα πρέπει να οργανώνεται με βάση τον τύπο τοποθεσίας, όχι μόνο ανά χώρα. Οι περιοχές με ψυχρό κλίμα, όπως οι σκανδιναβικές χώρες ή μέρη του Καναδά, έχουν ισχυρά πλεονεκτήματα ψύξης επειδή επιτρέπουν μεγαλύτερες περιόδους ελεύθερης ψύξης (Yuan et al., 2023). Οι περιοχές πλούσιες σε υδροηλεκτρική ενέργεια μπορούν να προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα και σταθερότητα δικτύου, βελτιώνοντας την CUE ακόμη και όταν η PUE δεν είναι η χαμηλότερη (Haghshenas et al., 2023). Οι περιοχές πλούσιες σε ηλιακή και αιολική ενέργεια μπορούν να υποστηρίξουν την προμήθεια ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αντιστοίχιση της κατανάλωσης με ανανεώσιμη παραγωγή επί τόπου ή εκτός εγκατάστασης (Asadov et al., 2025), αλλά απαιτούν προσεκτική αξιολόγηση της ζήτησης ψύξης και του υδατικού στρες (Sheikholeslami et al., 2022).

Παράλληλα, οι παραδοσιακοί κόμβοι υψηλής συνδεσιμότητας, όπως τα μεγάλα ευρωπαϊκά και βορειοαμερικανικά κέντρα ανταλλαγής κίνησης διαδικτύου εξασφαλίζουν ελάχιστη χρονική καθυστέρηση και υψηλά επίπεδα δικτυακού πλεονασμού, πλην όμως συνοδεύονται από προκλήσεις που αφορούν τη συμφόρηση του δικτύου, το αυξημένο ενεργειακό κόστος και τα αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια αδειοδότησης (Lindberg et al., 2021). Στον αντίποδα, οι αναδυόμενες περιοχές χαμηλού αποτυπώματος άνθρακα παρουσιάζουν μια ελκυστική εναλλακτική, καθώς συνδυάζουν την υψηλή διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας με μειωμένο κόστος κτήσης γης και ταχύτητα αναπτυσσόμενες υποδομές δικτύων οπτικών ινών, προσφέροντας έτσι ένα πιο βιώσιμο μοντέλο μακροπρόθεσμης ανάπτυξης (Asadov et al., 2025).

Η εν λόγω κατηγοριοποίηση καταδεικνύει ότι καμία μεμονωμένη χωροθέτηση δεν παρουσιάζει εγγενώς καθολική βελτιστοποίηση. Χαρακτηριστικά, μια τοποθεσία σε ψυχρό κλίμα εξασφαλίζει υψηλή αποδοτικότητα στα συστήματα ψύξης, ωστόσο η ελκυστικότητά της περιορίζεται εάν χαρακτηρίζεται από μεγάλη γεωγραφική απόσταση από τους τελικούς χρήστες ή από ελλείψεις υποδομές δικτύων οπτικών ινών (Yuan et al., 2023). Αντιστοίχως, μια περιοχή με υψηλό ηλιακό δυναμικό ευνοεί την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αλλά ταυτόχρονα ενδέχεται να επιβάλλει αυξημένη ενεργειακή κατανάλωση για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων (Sheikholeslami et al., 2022). Κατά συνέπεια, η βέλτιστη επιλογή τοποθεσίας προκύπτει μέσα από μια πολυπαραμετρική προσέγγιση, η οποία επιτυγχάνει τη δυναμική

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

ισορροπία μεταξύ των ενεργειακών απαιτήσεων, των εκπομπών άνθρακα, της διαθεσιμότητας υδατικών πόρων και της δικτυακής συνδεσιμότητας (Haghshenas et al., 2023).

7.5 Ευαισθησία των κατατάξεων τοποθεσίας

Το πλαίσιο MCDA δείχνει επίσης ότι οι κατατάξεις είναι ευαίσθητες στις αλλαγές στα βάρη. Εάν η ένταση άνθρακα λάβει μεγαλύτερο βάρος, οι τοποθεσίες με δίκτυα χαμηλών εκπομπών άνθρακα ή υδροηλεκτρική ενέργεια γίνονται πιο ευνοϊκές. Εάν το υδατικό στρες λάβει μεγαλύτερο βάρος, οι άνυδρες περιοχές που χρησιμοποιούν ψύξη με εξάτμιση γίνονται λιγότερο κατάλληλες (Lindberg et al., 2021). Εάν η καθυστέρηση και η συνδεσιμότητα λάβουν μεγαλύτερο βάρος, οι μεγάλοι κόμβοι δικτύου βελτιώνουν την κατάταξή τους, ακόμη και αν το ενεργειακό τους προφίλ δεν είναι ιδανικό. Εάν το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας κυριαρχεί, οι περιοχές χαμηλής τιμής ενδέχεται να κατατάσσονται υψηλότερα, αλλά αυτό μπορεί να έρχεται σε σύγκρουση με τους στόχους άνθρακα ή νερού (Asadov et al., 2025).

Η συγκεκριμένη ανάλυση ευαισθησίας κρίνεται βαρύνουσας σημασίας, καθώς τα εμπλεκόμενα μέρη διέπονται από αποκλίνουσες προτεραιότητες και επιδιώξεις. Ειδικότερα, οι φορείς εκμετάλλευσης και διαχείρισης εστιάζουν πρωτίστως στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και στη διασφάλιση της συστημικής αξιοπιστίας, ενώ οι φορείς χάραξης πολιτικής ιεραρχούν υψηλότερα τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την προστασία των υδατικών πόρων (Asadov et al., 2025). Υπό το πρίσμα αυτό, η παρούσα εργασία δεν προσεγγίζει την Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων ως ένα εργαλείο παροχής μιας μονοσήμαντης ή στατικής λύσης, αλλά ως ένα δυναμικό και διαφανές πλαίσιο υποστήριξης αποφάσεων, ικανό να σταθμίζει τις υφιστάμενες αντιθέσεις και να διευκολύνει τη στρατηγική επιλογή.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η στρατηγική επιλογή τοποθεσίας είναι μια ενεργειακή απόφαση και απόφαση βιωσιμότητας, όχι μόνο μια απόφαση ακίνητης περιουσίας ή συνδεσιμότητας. Οι πιο ισχυρές υποψήφιες τοποθεσίες είναι εκείνες που συνδυάζουν ευνοϊκό κλίμα, ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα, διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αξιόπιστα δίκτυα, διαχειρίσιμο υδατικό κίνδυνο, ισχυρή συνδεσιμότητα και σταθερό ρυθμιστικό πλαίσιο (Haghshenas et al., 2023). Αυτό το εύρημα υποστηρίζει άμεσα το συνολικό επιχείρημα της παρούσης, πως τα κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς πρέπει να σχεδιαστούν ως ολοκληρωμένα κυβερνο-φυσικά-ενεργειακά συστήματα, όπου ο σχεδιασμός των εγκαταστάσεων,

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων και η γεωγραφική θέση βελτιστοποιούνται από κοινού (Yuan et al., 2023).

8. Μελέτες Περιπτώσεων

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει το στοιχείο των μελετών περίπτωσης της διπλωματικής εργασίας. Σύμφωνα με τον μικτό ερευνητικό σχεδιασμό, οι μελέτες περίπτωσης δεν χρησιμοποιούνται ως πρωτογενή πειραματικά στοιχεία, αλλά ως τεκμηριωμένα παραδείγματα από τον πραγματικό κόσμο και τη βιβλιογραφία που συνδέουν τη θεωρητική και μεθοδολογική ανάλυση με πρακτικές εφαρμογές. Οι περιπτώσεις επιλέχθηκαν επειδή αντικατοπτρίζουν τα τρία κεντρικά θέματα της διπλωματικής εργασίας, ήτοι τη στρατηγική επιλογή τοποθεσίας, την επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας και τη λειτουργία ενσωματωμένη σε έξυπνο δίκτυο ή λειτουργία με επίγνωση του άνθρακα. Στόχος δεν είναι να υποστηριχθεί ότι μία περίπτωση αντιπροσωπεύει την καθολική λύση για όλα τα κέντρα δεδομένων, αλλά να

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

εντοπιστούν μεταβιβάσιμα διδάγματα για εγκαταστάσεις επόμενης γενιάς, ενεργειακά αποδοτικές και διασυνδεδεμένες με το δίκτυο.

8.1 Προσέγγιση επιλογής μελετών περίπτωσης

Οι περιπτώσεις επιλέχθηκαν σύμφωνα με τέσσερα κριτήρια. Πρώτον, κάθε περίπτωση έπρεπε να σχετίζεται άμεσα με την ενεργειακή απόδοση των κέντρων δεδομένων. Δεύτερον, έπρεπε να υπάρχουν αξιόπιστες δημοσιευμένες πληροφορίες από ακαδημαϊκές, θεσμικές ή πηγές φορέων εκμετάλλευσης. Τρίτον, οι περιπτώσεις έπρεπε να αντιπροσωπεύουν διαφορετικές στρατηγικές βιωσιμότητας, όπως για παράδειγμα κλιματικά ευαίσθητη χωροθέτηση, ανάκτηση θερμότητας και ευελιξία μέσω έξυπνων δικτύων. Τέταρτον, οι περιπτώσεις έπρεπε να συνδέονται με τους δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν στη διπλωματική εργασία, ιδίως τους δείκτες PUE, WUE, CUE, ERE, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την ευελιξία του δικτύου.

Επομένως, επιλέχθηκαν τρεις κατηγορίες περιπτώσεων. Η πρώτη εξετάζει κέντρα δεδομένων ψυχρού κλίματος και προσανατολισμένα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, χρησιμοποιώντας ως παραδείγματα την Google Hamina στη Φινλανδία και την Meta Luleå στη Σουηδία. Η δεύτερη εξετάζει την ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας μέσω της Stockholm Open District Heating. Η τρίτη είναι ένα βιβλιογραφικά τεκμηριωμένο σενάριο περίπτωσης έξυπνου δικτύου, το οποίο υποστηρίζεται από μελέτες σχετικά με την απόκριση στη ζήτηση, τη ρύθμιση συχνότητας και τη μετατόπιση του φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα.

8.2 Μελέτη Περίπτωσης 1: Κέντρα δεδομένων ψυχρού κλίματος και προσανατολισμένα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η Google Hamina και η Meta Luleå αποτελούν κατάλληλα παραδείγματα για το πώς η γεωγραφία μπορεί να υποστηρίξει την αποδοτικότητα των κέντρων δεδομένων. Πιο αναλυτικά, η εγκατάσταση της Google στη Φινλανδία είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή συνδυάζει συνθήκες ψυχρού κλίματος με ψύξη με θαλασσινό νερό και ανάπτυξη ανάκτησης θερμότητας. Η Google δηλώνει ότι το κέντρο δεδομένων Hamina χρησιμοποιεί θαλασσινό νερό από τον Κόλπο της Φινλανδίας για ψύξη, ενώ το μεταγενέστερο έργο ανάκτησης θερμότητας εκτός των εγκαταστάσεων καταδεικνύει πώς η απορριπτόμενη θερμότητα του κέντρου δεδομένων μπορεί να συνδεθεί με τοπικά ενεργειακά συστήματα (Google, n.d.; Google, 2024). Αυτό υποστηρίζει

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

το επιχείρημα που αναπτύχθηκε στα Κεφάλαια 5 και 7 σχετικό με την άποψη ότι η τοποθεσία επηρεάζει τόσο τη ζήτηση ψύξης όσο και την πιθανότητα επαναχρησιμοποίησης ενέργειας.

Το κέντρο δεδομένων Meta Luleå είναι επίσης σχετικό, μιας και αντιπροσωπεύει τη σκανδιναβική χωροθέτηση, η οποία βασίζεται στο ψυχρό κλίμα, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τις αξιόπιστες υποδομές. Το ενημερωτικό δελτίο του κέντρου δεδομένων Luleå της Meta παρουσιάζει την τοποθεσία ως μέρος της στρατηγικής της για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ η Hitachi Energy και η DPR Construction περιγράφουν τη σημασία του ψυχρού κλίματος της Luleå και της αξιόπιστης υποδομής ηλεκτρικής ενέργειας και επικοινωνιών (DPR Construction, n.d.; Hitachi Energy, n.d.; Meta, n.d.). Αυτές οι πηγές τεκμηριώνουν το συμπέρασμα ότι οι περιοχές με ψυχρό κλίμα μπορούν να μειώσουν την πίεση ψύξης και να βελτιώσουν τις λειτουργικές συνθήκες, ειδικά όπου διατίθεται ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα και ισχυρή υποδομή δικτύου.

Ωστόσο, αυτές οι περιπτώσεις αναδεικνύουν τον προβληματισμό, ότι το ψυχρό κλίμα από μόνο του δεν επαρκεί. Μια κατάλληλη τοποθεσία πρέπει επίσης να παρέχει ισχυρή συνδεσιμότητα δικτύου, ρυθμιστική σταθερότητα, διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας και μακροπρόθεσμη ανθεκτικότητα. Επομένως, η χωροθέτηση σε ψυχρό κλίμα θα πρέπει να νοείται ως ένα στοιχείο ενός ευρύτερου πλαισίου MCDA και όχι ως αυτόματη λύση.

8.3 Μελέτη Περίπτωσης 2: Επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας και τηλεθέρμανση

Η δεύτερη περίπτωση εστιάζει στην Ανοιχτή Τηλεθέρμανση της Στοκχόλμης, όπου αναλύεται πώς τα κέντρα δεδομένων μπορούν να γίνουν μέρος των αστικών ενεργειακών συστημάτων, αντί να λειτουργούν ως μεμονωμένοι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Η Stockholm Exergi εξηγεί ότι η Ανοιχτή Τηλεθέρμανση επιτρέπει σε εγκαταστάσεις με πλεονάζουσα θερμότητα, συμπεριλαμβανομένων των κέντρων δεδομένων, να πωλούν θερμότητα στο δίκτυο τηλεθέρμανσης (Stockholm Exergi, n.d.). Το Covenant of Mayors — Europe παρουσιάζει επίσης τη Στοκχόλμη ως περίπτωση ανάκτησης θερμότητας από κέντρα δεδομένων, συνδέοντας την έννοια με ευρύτερους στόχους για το αστικό κλίμα και την ενέργεια (Covenant of Mayors — Europe, 2023). Το UNEP Copenhagen Climate Centre υποστηρίζει περαιτέρω τη Στοκχόλμη ως σχετικό παράδειγμα ενσωμάτωσης τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης (UNEP Copenhagen Climate Centre, n.d.).

Αυτή η περίπτωση συνδέεται άμεσα με την ERE, επειδή η απορριπτόμενη θερμότητα δεν απορρίπτεται απλώς στο περιβάλλον, αλλά επαναχρησιμοποιείται ως πολύτιμη ενεργειακή εισροή, με ακαδημαϊκές μελέτες να υποστηρίζουν επίσης την τεχνική λογική αυτής της περίπτωσης. Οι Huang et al. (2020) περιγράφουν τα κέντρα δεδομένων ως πιθανούς παραγωγούς-καταναλωτές σε περιφερειακά ενεργειακά συστήματα, ενώ οι Dvořák et al. (2020), Kim et al. (2022) και Montagud-Montalvá et al. (2023) συμφωνούν ότι η ανάκτηση θερμότητας μπορεί να είναι τεχνικά σημαντική όπου υπάρχει ζήτηση θερμότητας σε κοντινή απόσταση. Οι Yuan et al. (2023) τονίζουν επίσης ότι η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας εξαρτάται από το επίπεδο θερμοκρασίας, το κόστος ενσωμάτωσης και την τοπική ζήτηση.

Η περίπτωση της Στοκχόλμης καταδεικνύει επομένως ότι η επαναχρησιμοποίηση θερμότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τοπικό πλαίσιο. Είναι δηλαδή καταλληλότερη όπου υπάρχει ένα υπάρχον δίκτυο τηλεθέρμανσης, ζήτηση θερμότητας σε κοντινή απόσταση και ένα θεσμικό πλαίσιο που επιτρέπει την ανταλλαγή θερμότητας. Χωρίς αυτές τις προϋποθέσεις, η επαναχρησιμοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας μπορεί να είναι τεχνικά εφικτή αλλά οικονομικά αδύναμη.

8.4 Μελέτη Περίπτωσης 3: Λειτουργία έξυπνου δικτύου βασισμένη στη βιβλιογραφία και με επίγνωση του άνθρακα

Η τρίτη περίπτωση δεν βασίζεται σε ένα συγκεκριμένο εμπορικό κέντρο δεδομένων, επειδή λεπτομερή λειτουργικά δεδομένα σχετικά με τη συμμετοχή στην απόκριση στη ζήτηση, τη μετατόπιση του φόρτου εργασίας και τη ρύθμιση της συχνότητας σπάνια δημοσιεύονται από ιδιωτικούς φορείς εκμετάλλευσης. Αντίθετα, αντιμετωπίζεται ως σενάριο βασισμένο στη βιβλιογραφία για ένα σύστημα πολλαπλών κέντρων δεδομένων με επίγνωση του άνθρακα, ενσωματωμένο σε έξυπνο δίκτυο.

Η ακαδημαϊκή βιβλιογραφία δείχνει ότι τα κέντρα δεδομένων μπορούν να παρέχουν ευελιξία μέσω ελέγχου ισχύος διακομιστών, μετατόπισης φόρτου εργασίας, συστημάτων UPS/μπαταριών και απόκρισης στη ζήτηση. Οι Wang et al. (2019) δείχνουν ότι η υπολογιστική ευελιξία μπορεί να υποστηρίξει τη ρύθμιση συχνότητας, ενώ οι Jahanshahi et al. (2022) καταδεικνύουν ότι η αναδιαμόρφωση ισχύος με επίγνωση του QoS μπορεί να μειώσει τη ζήτηση ισχύος, περιορίζοντας παράλληλα τις επιπτώσεις στην Ποιότητα Υπηρεσίας. Οι Chen et al.

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

(2020) και Sheikholeslami et al. (2022) υποστηρίζουν περαιτέρω τη σκοπιμότητα της συμμετοχής των κέντρων δεδομένων σε προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση.

Η γεωγραφική λειτουργία με επίγνωση του άνθρακα υποστηρίζεται επίσης από τη βιβλιογραφία. Οι Lindberg et al. (2021, 2022) δείχνουν ότι η γεωγραφική μετατόπιση φορτίου μπορεί να μειώσει τις εκπομπές μετακινώντας τους φόρτους εργασίας σε περιοχές με χαμηλότερες οριακές εκπομπές. Οι Khalil et al. (2022), Asadov et al. (2025) και Fu et al. (2025) επεκτείνουν αυτή τη λογική μέσω της εξισορρόπησης φορτίου με επίγνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της μετατόπισης edge-cloud και της μετεγκατάστασης κοντέινερ. Αυτό το σενάριο περίπτωσης υποστηρίζει επομένως το επιχείρημα της διπλωματικής εργασίας ότι η τοποθέτηση φόρτου εργασίας μπορεί να γίνει ένα εργαλείο διαχείρισης ενέργειας, όχι μόνο μια διαδικασία διαχείρισης πληροφορικής.

8.5 Σύγκριση μεταξύ περιπτώσεων

Κριτήριο	Google Hamina / Meta Luleå	Stockholm Open District Heating	Smart-grid literature scenario
Κύρια στρατηγική	Ψυχρό κλίμα, ΑΠΕ, αποδοτική ψύξη	Ανάκτηση θερμότητας και τηλεθέρμανση	DR, workload shifting, carbon-aware operation
Σχετικοί δείκτες	PUE, CUE, WUE	ERE, CUE	CUE, DR potential, flexibility
Κύριο πλεονέκτημα	Μειωμένη ανάγκη ψύξης και χαμηλότερος άνθρακας	Αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας	Ενεργή συμμετοχή στο δίκτυο
Κύριος περιορισμός	Ανάγκη συνδεσιμότητας και grid capacity	Εξάρτηση από τοπική ζήτηση θερμότητας	Περιορισμοί latency, QoS και αγοράς

8.6 Μαθήματα από τις μελέτες περιπτώσεων

Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ότι καμία μεμονωμένη στρατηγική δεν επαρκεί αυτόνομα για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής αποδοτικότητας. Ειδικότερα, η χωροθέτηση σε ψυχρά κλίματα μειώνει δραστικά το φορτίο ψύξης, ωστόσο κρίνεται απαραίτητο να συνδυάζεται με ένα ηλεκτρικό δίκτυο χαμηλών εκπομπών άνθρακα και υποδομές υψηλής

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

συνδεσιμότητας. Παράλληλα, η ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας δύναται να βελτιώσει την απόδοση σε επίπεδο συστήματος, υπό την προϋπόθεση όμως ότι υφίσταται εγγύτητα σε αστική ζήτηση και στις απαραίτητες υποδομές τηλεθέρμανσης ή τοπικών ενεργειακών δικτύων. Επιπροσθέτως, η ενσωμάτωση σε έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες μείωσης του κόστους και των εκπομπών ρύπων, προϋποθέτει όμως προηγμένο αυτοματισμό, ευελιξία στη διαχείριση του υπολογιστικού φόρτου, έξυπνο έλεγχο των συστημάτων αποθήκευση και άμεση πρόσβαση στην αγορά ενέργειας (Asadov et al., 2025). Συνεπώς, το θεμελιώδες συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι τα κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς οφείλουν να συγχωνεύουν την αποτελεσματική ψύξη, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την ενεργό συμμετοχή σε έξυπνα δίκτυα, την αξιοποίηση της θερμότητας και τη στρατηγική χωροθέτηση σε ένα ενιαίο, ολιστικά ολοκληρωμένο μοντέλο σχεδιασμού.

9. Συζήτηση

Στο παρόν κεφάλαιο προκρίνεται η διεξοδική συζήτηση των ευρημάτων της διπλωματικής εργασίας, σε άμεση συνάρτηση με τα ερευνητικά ερωτήματα, το θεωρητικό υπόβαθρο, την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, τη μεθοδολογική προσέγγιση και τις εξετασθείσες μελέτες περίπτωσης. Η αναλυτική αυτή επεξεργασία επικυρώνει τον κεντρικό πυρήνα του επιχειρήματος της παρούσας έρευνας: ο σχεδιασμός ενεργειακά αποδοτικών κέντρων δεδομένων δεν δύναται να περιορίζεται αποκλειστικά στην αναβάθμιση του υλικού ή στη βελτιστοποίηση των επιμέρους συστημάτων ψύξης. Αντιθέτως, η συνολική τους αποδοτικότητα συναρτάται άμεσα από τη δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ του υπολογιστικού φόρτου, της αρχιτεκτονικής ψύξης, της ενσωμάτωσης σε έξυπνα ηλεκτρικά δίκτυα, της διαθεσιμότητας Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας, καθώς και της στρατηγικής επιλογής της γεωγραφικής τους θέσης.

9.1 Συζήτηση σε σχέση με τα ερευνητικά ερωτήματα

Το πρώτο ερευνητικό ερώτημα εξέτασε πώς οι κλιματικές συνθήκες και οι τεχνολογίες ψύξης επηρεάζουν την PUE, την WUE και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Τα ευρήματα δείχνουν ότι ο κλιματικά ευαίσθητος σχεδιασμός είναι απαραίτητος. Οι τοποθεσίες με χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και χαμηλές θερμοκρασίες υγρού βολβού μπορούν να υποστηρίξουν μεγαλύτερες περιόδους ελεύθερης ψύξης, μειώνοντας την ενέργεια που απαιτείται για μηχανική ψύξη. Αυτό υποστηρίζει τα ευρήματα των Lei και Masanet (2022) και Kim et al. (2024), οι οποίοι δείχνουν ότι η PUE και η WUE επηρεάζονται έντονα από την κλιματική ζώνη και την τεχνολογία ψύξης. Ωστόσο, η συζήτηση επιβεβαιώνει επίσης ότι η PUE από μόνη της δεν είναι αρκετή (Asadov et al., 2025). Η ψύξη με εξάτμιση μπορεί να μειώσει την PUE αλλά να αυξήσει την κατανάλωση νερού, ενώ η υγρή ψύξη και η ψύξη με εμβάπτιση μπορούν να είναι πιο κατάλληλες για φόρτους εργασίας τεχνητής νοημοσύνης υψηλής πυκνότητας και μπορούν να βελτιώσουν το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης θερμότητας (Mytton, 2021; Haghshenas et al., 2023; Yuan et al., 2023). Επομένως, η απάντηση στο RQ1 είναι ότι οι κλιματικές συνθήκες και η τεχνολογία ψύξης αλληλεπιδρούν άμεσα, αλλά η αξιολόγησή τους πρέπει να περιλαμβάνει συνδυαστικά δείκτες ενέργειας, νερού και άνθρακα.

Το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα επικεντρώθηκε στο κατά πόσον τα έξυπνα δίκτυα μπορούν να μειώσουν το ενεργειακό κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κέντρων δεδομένων. Τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων μπορεί να προσφέρει σημαντικά λειτουργικά οφέλη, αλλά μόνο όταν προστατεύονται η αξιοπιστία και η Ποιότητα Υπηρεσίας. Τα κέντρα δεδομένων μπορούν να υποστηρίξουν την απόκριση στη ζήτηση μέσω της μετατόπισης του φόρτου εργασίας, του περιορισμού ισχύος, των συστημάτων μπαταριών και της ευελιξίας ψύξης. Οι Chen et al. (2020) και Sheikholeslami et al. (2022) δείχνουν ότι τα κέντρα δεδομένων μπορούν να συμμετέχουν σε προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση, ενώ οι Wang et al. (2019) και Jahanshahi et al. (2022) καταδεικνύουν τις δυνατότητες για ρύθμιση συχνότητας και έλεγχο ισχύος με επίγνωση QoS. Ωστόσο, αυτή η ευελιξία δεν είναι απεριόριστη, καθώς οι φόρτοι εργασίας πραγματικού χρόνου και ευαίσθητοι στην καθυστέρηση δεν μπορούν να μετατοπιστούν ελεύθερα (Asadov et al., 2025). Αυτό σημαίνει ότι η συμμετοχή σε έξυπνα δίκτυα πρέπει να βασίζεται σε ταξινόμηση φόρτου εργασίας, αυτοματοποίηση και αυστηρούς περιορισμούς επιπέδου υπηρεσιών.

Το τρίτο ερευνητικό ερώτημα εξέτασε τη μετατόπιση φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάλυση επιβεβαιώνει ότι η γεωγραφική και χρονική μετατόπιση φόρτου εργασίας μπορεί να μειώσει τις εκπομπές όταν ο υπολογιστικός φόρτος μετακινείται προς τοποθεσίες ή περιόδους με χαμηλότερη ένταση άνθρακα. Αυτό συμφωνεί με τους Lindberg et al. (2021, 2022), Khalil et al. (2022), Asadov et al. (2025) και Fu et al. (2025). Ωστόσο, η στρατηγική περιορίζεται από την καθυστέρηση, την κυριαρχία δεδομένων, το κόστος δικτύου και τις απαιτήσεις εφαρμογής. Η συζήτηση, επομένως, υποδηλώνει ότι η λειτουργία με επίγνωση του άνθρακα είναι η καταλληλότερη για ευέλικτους φόρτους εργασίας, όπως εκπαίδευση σε τεχνητή νοημοσύνη, επεξεργασία παρτίδων, εφεδρική αντιγραφή δεδομένων και ανάλυση, παρά για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου.

Το τέταρτο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τη στρατηγική επιλογή τοποθεσίας. Τα ευρήματα δείχνουν ότι η καλύτερη τοποθεσία για κέντρο δεδομένων δεν είναι απλώς η πιο κρύα, η φθηνότερη ή η καλύτερα συνδεδεμένη τοποθεσία. Αντίθετα, οι ισχυρότερες τοποθεσίες είναι εκείνες που συνδυάζουν ευνοϊκό κλίμα, ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα, διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αξιοπιστία δικτύου, διαχείρισιμο υδατικό κίνδυνο, ισχυρή συνδεσιμότητα και σταθερό ρυθμιστικό πλαίσιο (Asadov et al., 2025). Αυτό υποστηρίζει τη χρήση της μεθόδου MCDA, επειδή οι αποφάσεις τοποθεσίας περιλαμβάνουν συμβιβασμούς μεταξύ τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών κριτηρίων. Οι μέθοδοι AHP και πολυκριτηριακής λήψης αποφάσεων είναι κατάλληλες για τη διαφανή διάρθρωση αυτών των συμβιβασμών (Saaty, 1980, 2008; Hwang & Yoon, 1981).

9.2 Θεωρητικές συνέπειες

Η κύρια θεωρητική συνέπεια είναι ότι τα κέντρα δεδομένων θα πρέπει να νοούνται ως κυβερνο-φυσικά-ενεργειακά συστήματα, όχι απλώς ως εγκαταστάσεις πληροφορικής. Η παραδοσιακή ανάλυση συχνά διαχωρίζει το σύστημα πληροφορικής, το σύστημα ψύξης και το ηλεκτρικό δίκτυο. Η παρούσα εργασία δείχνει ότι αυτά τα συστήματα είναι αλληλεξαρτώμενα. Οι φόρτοι εργασίας πληροφορικής δημιουργούν θερμότητα, τα συστήματα ψύξης καθορίζουν την PUE και την WUE, η ένταση άνθρακα του δικτύου διαμορφώνει την CUE και η τοποθεσία επηρεάζει όλες αυτές τις μεταβλητές ταυτόχρονα.

Αυτή η ολοκληρωμένη άποψη είναι συνεπής με την έρευνα για τα κέντρα δεδομένων ως παραγωγούς-καταναλωτές σε περιφερειακά ενεργειακά συστήματα και ως ευέλικτους πόρους

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (Huang et al., 2020; Wang et al., 2024). Διευρύνει επίσης την έννοια της αποδοτικότητας των κέντρων δεδομένων. Η αποδοτικότητα δεν πρέπει να περιορίζεται στη μείωση των εσωτερικών ενεργειακών επιβαρύνσεων. Θα πρέπει να περιλαμβάνει προγραμματισμό με επίγνωση του άνθρακα, ψύξη με επίγνωση της χρήσης νερού, επαναχρησιμοποίηση θερμότητας και λειτουργία που υποστηρίζει το δίκτυο.

9.3 Πρακτικές επιπτώσεις

Για τους φορείς εκμετάλλευσης κέντρων δεδομένων, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η ενεργειακή στρατηγική θα πρέπει να ξεκινά πριν από την κατασκευή. Η επιλογή τοποθεσίας θα πρέπει να περιλαμβάνει το κλίμα, την ένταση άνθρακα του δικτύου, το υδατικό στρες, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Οι φορείς εκμετάλλευσης θα πρέπει επίσης να υιοθετήσουν την αναφορά πολλαπλών δεικτών χρησιμοποιώντας PUE, WUE, CUE και ERE, αντί να βασίζονται μόνο στην PUE (Asadov et al., 2025). Πρότυπα όπως το ISO/IEC 30134 και οι οδηγίες βέλτιστων πρακτικών, όπως ο Κώδικας Δεοντολογίας της ΕΕ, μπορούν να υποστηρίξουν πιο συνεπείς μετρήσεις και αναφορές (Acton et al., 2024; International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2026).

Για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι τα κέντρα δεδομένων θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως πιθανοί ευέλικτοι πόροι. Με κατάλληλη μέτρηση, έλεγχο και σχεδιασμό αγοράς, μπορούν να υποστηρίξουν την απόκριση στη ζήτηση, τη μείωση των αιχμών και τη ρύθμιση της συχνότητας. Ωστόσο, οι φορείς αυτοί πρέπει να αναγνωρίσουν ότι η ευελιξία εξαρτάται από τον τύπο του φόρτου εργασίας και την ανοχή λειτουργικού κινδύνου της εγκατάστασης.

Για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τα αποτελέσματα υποστηρίζουν ισχυρότερη αναφορά βιωσιμότητας, κίνητρα για επαναχρησιμοποίηση θερμότητας και προσεκτική ρύθμιση της υδροβόρας ψύξης σε περιοχές με υδατικό στρες. Οι υποχρεώσεις αναφοράς κέντρων δεδομένων της ΕΕ και το κοινό σύστημα αξιολόγησης της Ένωσης δείχνουν ότι η πολιτική κινείται ήδη προς μεγαλύτερη διαφάνεια στην ενεργειακή απόδοση των κέντρων δεδομένων (European Commission, 2024; European Commission, n.d.).

9.4 Περιορισμοί

Ο κύριος περιορισμός της διπλωματικής εργασίας ήταν η εξάρτησή της από δευτερογενή δεδομένα. Πολλοί φορείς εκμετάλλευσης κέντρων δεδομένων δεν δημοσιεύουν λεπτομερή λειτουργικά δεδομένα σχετικά με την PUE σε πραγματικό χρόνο, την WUE, την CUE, τον προγραμματισμό φόρτου εργασίας, τη συμμετοχή σε προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση ή τη διαχείριση μπαταριών. Επομένως, τα ευρήματα θα πρέπει να ερμηνεύονται ως συγκριτικά και αναλυτικά και όχι ως άμεσες λειτουργικές μετρήσεις. Ένας δεύτερος περιορισμός ήταν ότι η ένταση άνθρακα, οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ποικίλλουν με την πάροδο του χρόνου, επομένως τα αποτελέσματα που βασίζονται σε σύνολα δεδομένων ενδέχεται να αλλάξουν καθώς τα δίκτυα απανθρακοποιούνται. Ένας τρίτος περιορισμός ήταν ότι μελέτες περιπτώσεων όπως η Google Hamina, η Meta Luleå και η Stockholm Open District Heating αποτελούν ισχυρά παραδείγματα, αλλά δεν μπορούν να αντιπροσωπεύσουν όλα τα παγκόσμια πλαίσια.

9.5 Μελλοντική έρευνα

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στον προγραμματισμό σε πραγματικό χρόνο με επίγνωση του άνθρακα για φόρτους εργασίας τεχνητής νοημοσύνης, στα ψηφιακά δίδυμα για τη διαχείριση ενέργειας των κέντρων δεδομένων και στη μακροπρόθεσμη αξιοπιστία της υγρής ψύξης και της ψύξης με εμβάπτιση. Απαιτείται επίσης περαιτέρω έρευνα σχετικά με τα οικονομικά της επαναχρησιμοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας, ειδικά όπου απουσιάζει η υποδομή τηλεθέρμανσης. Τέλος, πιο διαφανή δημόσια σύνολα δεδομένων από τους φορείς εκμετάλλευσης θα βελτίωναν την ακρίβεια των μελλοντικών μοντέλων MCDA και θα επέτρεπαν ισχυρότερη σύγκριση μεταξύ τοποθεσιών κέντρων δεδομένων, τεχνολογιών και στρατηγικών έξυπνων δικτύων.

10. Συμπεράσματα και Συστάσεις

10.1 Σύνοψη της έρευνας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξέτασε πώς μπορεί να βελτιωθεί η ενεργειακή απόδοση των κέντρων δεδομένων μέσω δύο συνδεδεμένων στρατηγικών, την ενσωμάτωση σε έξυπνα δίκτυα και τη στρατηγική επιλογή τοποθεσίας. Η μελέτη ακολούθησε έναν μικτό ερευνητικό σχεδιασμό βασισμένο σε βιβλιογραφική ανάλυση, στην αξιολόγηση βάσει δεικτών, στην λογική της MCDA και σε επιλεγμένες μελέτες περιπτώσεων. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στην αλληλεπίδραση μεταξύ IT φορτίου, ζήτησης ψύξης, υποδομών ισχύος, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, χρήσης νερού, έντασης άνθρακα, ευελιξίας δικτύου και γεωγραφικών συνθηκών.

Το κεντρικό συμπέρασμα είναι ότι τα κέντρα δεδομένων δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως μεμονωμένες ψηφιακές εγκαταστάσεις. Είναι ενεργοβόρες, υπόκεινται σε θερμικούς περιορισμούς και ολοένα και πιο ευέλικτες υποδομές που αλληλεπιδρούν με δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τοπικά κλίματα και αστικά ενεργειακά συστήματα. Για αυτόν τον λόγο, η βιωσιμότητά τους δεν μπορεί να αξιολογηθεί μέσω ενός μόνο δείκτη. Η PUE παραμένει σημαντική, αλλά πρέπει να ερμηνεύεται μαζί με την WUE, την CUE και την ERE προκειμένου να καταγραφεί η ενεργειακή, υδατική, ανθρακική απόδοση και η απόδοση επαναχρησιμοποίησης θερμότητας (Lei & Masanet, 2022; Mytton, 2021; International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission, 2026).

10.2 Κύρια συμπεράσματα

Πρώτον, το ενεργειακό προφίλ ενός κέντρου δεδομένων εξαρτάται τόσο από τα φορτία πληροφορικής όσο και από τα μη-IT φορτία. Οι φόρτοι εργασίας υψηλής πυκνότητας, ειδικά αυτοί που συνδέονται με την Τεχνητή Νοημοσύνη και το cloud computing, αυξάνουν την πυκνότητα ισχύος και τις απαιτήσεις ψύξης (Asadov et al., 2025). Παρόλο που τα κέρδη απόδοσης έχουν ιστορικά μετριάσει την αύξηση της ηλεκτρικής κατανάλωσης στον τομέα, η άνοδος της Τεχνητής Νοημοσύνης και των συνεχώς ενεργών ψηφιακών υπηρεσιών καθιστά τον ενεργειακό αποδοτικό σχεδιασμό ολοένα και πιο σημαντικό (Masanet et al., 2020; Mytton & Ashtine, 2022; International Energy Agency, 2025).

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Δεύτερον, η ψύξη είναι ένας από τους πιο σημαντικούς τομείς βελτίωσης. Η ελεύθερη ψύξη μπορεί να μειώσει τη ζήτηση ενέργειας σε κατάλληλα κλίματα, ενώ η υγρή ψύξη και η ψύξη με εμβάπτιση είναι ολοένα και πιο κατάλληλες για τα racks υψηλής πυκνότητας. Ωστόσο, οι επιλογές ψύξης περιλαμβάνουν συμβιβασμούς. Η εξατμιστική ψύξη μπορεί να μειώσει την PUE αλλά να αυξήσει την WUE, ενώ η υγρή ψύξη μπορεί να βελτιώσει το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης θερμότητας, αλλά απαιτεί κατάλληλο τεχνικό σχεδιασμό (Haghshenas et al., 2023; Yuan et al., 2023).

Τρίτον, η ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων μπορεί να μετατρέψει τα κέντρα δεδομένων από παθητικούς καταναλωτές σε ενεργούς συμμετέχοντες στο ενεργειακό σύστημα. Η απόκριση στη ζήτηση, ο περιορισμός ισχύος, τα συστήματα UPS και μπαταριών, η θερμική αποθήκευση και η μετατόπιση του φόρτου εργασίας μπορούν να υποστηρίξουν τη μείωση των αιχμών, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη λειτουργία με επίγνωση του άνθρακα. Ωστόσο, αυτές οι στρατηγικές πρέπει να προστατεύουν την ποιότητα των υπηρεσιών και δεν δύναται να εφαρμοστούν εξίσου σε όλους τους φόρτους εργασίας (Chen et al., 2020; Wang et al., 2019; Jahanshahi et al., 2022; Sheikholeslami et al., 2022).

Τέταρτον, η στρατηγική επιλογή τοποθεσίας κρίνεται απαραίτητη. Η καλύτερη τοποθεσία δεν είναι απλώς η πιο κρύα, η φθηνότερη ή η καλύτερα συνδεδεμένη τοποθεσία, αλλά είναι η τοποθεσία που εξισορροπεί την κλιματική καταλληλότητα, την ηλεκτρική ενέργεια χαμηλών εκπομπών άνθρακα, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, την αξιοπιστία του δικτύου, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, τον υδατικό κίνδυνο, τη συνδεσιμότητα δικτύου και τη ρυθμιστική σταθερότητα. Αυτό υποστηρίζει τη χρήση του MCDA ως διαφανούς πλαισίου για τη σύγκριση υποψήφιων τοποθεσιών (Saaty, 2008; Hwang & Yoon, 1981; Zhang & Liu, 2022).

Τέλος, οι μελέτες περίπτωσης δείχνουν ότι διαφορετικές στρατηγικές είναι αποτελεσματικές υπό διαφορετικές συνθήκες. Οι περιπτώσεις Google Hamina και Meta Luleå καταδεικνύουν την αξία της χωροθέτησης σε ψυχρό κλίμα και του προσανατολισμού προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η Stockholm Open District Heating καταδεικνύει τις δυνατότητες ανάκτησης θερμότητας και η περίπτωση του έξυπνου δικτύου που βασίζεται στη βιβλιογραφία δείχνει τις δυνατότητες απόκρισης στη ζήτηση και μετατόπισης του φόρτου εργασίας με επίγνωση του άνθρακα (Google, n.d.; Meta, n.d.; Stockholm Exergi, n.d.; Lindberg et al., 2022).

10.3 Προτεινόμενο μοντέλο για κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς

Η διπλωματική έρευνα προτείνει ένα ολοκληρωμένο μοντέλο για κέντρα δεδομένων επόμενης γενιάς που βασίζεται σε έξι πυλώνες:

Πυλώνας	Περιγραφή
Αποδοτική υποδομή IT	Υψηλή αξιοποίηση, εικονικοποίηση, workload optimisation
Προηγμένη ψύξη	Free cooling, liquid cooling, immersion όπου είναι κατάλληλο
Έξυπνο δίκτυο	Demand response, frequency regulation, smart metering
ΑΠΕ και αποθήκευση	PPAs, BESS, UPS flexibility, thermal storage
Ανάκτηση θερμότητας	District heating, heat pumps, ERE improvement
Στρατηγική χωροθέτηση	Climate, carbon intensity, water, connectivity, regulation

Αυτό το μοντέλο αντικατοπτρίζει το κύριο επιχείρημα της παρούσης, όπου τα βιώσιμα κέντρα δεδομένων απαιτούν συντονισμένες αποφάσεις στον σχεδιασμό, τη λειτουργία, την προμήθεια ενέργειας και την τοποθεσία.

10.4 Συστάσεις

Για τους φορείς εκμετάλλευσης κέντρων δεδομένων, η κύρια σύσταση είναι η υιοθέτηση διαχείρισης ενέργειας πολλαπλών δεικτών. Συγκεκριμένα, οι φορείς εκμετάλλευσης θα πρέπει να καταγράφουν και να παρακολουθούν τους δείκτες PUE, WUE, CUE και ERE, να επενδύουν σε DCIM/BMS και έξυπνη μέτρηση, να αξιολογούν την υγρή ψύξη ή την ψύξη με εμβάπτιση για racks υψηλής πυκνότητας και να αξιολογούν το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης θερμότητας πριν από την κατασκευή. Θα πρέπει επίσης να ταξινομούν τους φόρτους εργασίας ανάλογα με την ευελιξία, ώστε οι κατάλληλες εργασίες να μπορούν να συμμετέχουν στον προγραμματισμό με επίγνωση του άνθρακα ή στην απόκριση στη ζήτηση.

Για τους φορείς εκμετάλλευσης δικτύων, τα κέντρα δεδομένων θα πρέπει να αντιμετωπίζονται ως πιθανοί ευέλικτοι πόροι. Τα δυναμικά τιμολόγια, τα προγράμματα απόκρισης στη ζήτηση και οι αγορές βοηθητικών υπηρεσιών μπορούν να ενθαρρύνουν τα κέντρα δεδομένων να μειώσουν ή να μετατοπίσουν το φορτίο όταν το δίκτυο βρίσκεται υπό πίεση ή η ένταση άνθρακα είναι υψηλή.

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τα ευρήματα υπογραμμίζουν διαφανείς υποχρεώσεις αναφοράς, κίνητρα για χωροθέτηση χαμηλών εκπομπών άνθρακα, υποστήριξη για συνδέσεις τηλεθέρμανσης και προσεκτική ρύθμιση της υδροβόρας ψύξης σε περιοχές με υδατικό στρες. Οι απαιτήσεις υποβολής εκθέσεων της ΕΕ και το κοινό σύστημα αξιολόγησης της Ένωσης αποτελούν σημαντικά βήματα προς μια πιο συνεπή διακυβέρνηση της απόδοσης των κέντρων δεδομένων (European Commission, 2024; European Commission, n.d.; Acton et al., 2024).

Για τους επενδυτές και τους σχεδιαστές έργων, η επιλογή τοποθεσίας θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη το συνολικό κόστος ιδιοκτησίας και όχι μόνο την τιμή της γης. Η δέουσα τεχνικοοικονομική αξιολόγηση θα πρέπει να περιλαμβάνει την ένταση άνθρακα του δικτύου, τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τον υδατικό κίνδυνο, την αξιοπιστία της ηλεκτρικής ενέργειας και τη συνδεσιμότητα οπτικών ινών.

Το μέλλον των βιώσιμων κέντρων δεδομένων εξαρτάται από την ενσωμάτωση, καθώς οι πιο αποδοτικοί διακομιστές και συστήματα ψύξης είναι απαραίτητοι, αλλά όχι επαρκείς. Ένα κέντρο δεδομένων επόμενης γενιάς πρέπει να σχεδιαστεί ως μέρος του ευρύτερου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, της στρατηγικής για το κλίμα και του αστικού ενεργειακού συστήματος. Συνδυάζοντας την ενσωμάτωση έξυπνων δικτύων με τη στρατηγική επιλογή τοποθεσίας, τα κέντρα δεδομένων θα μπορέσουν να μειώσουν το κόστος, τις εκπομπές άνθρακα και την πίεση στους πόρους, ενώ παράλληλα θα συνεχίζουν να υποστηρίζουν την ανάπτυξη της ψηφιακής οικονομίας.

Βιβλιογραφία

Acton, M., Bertoldi, P., & Booth, J. (2024). *2024 best practice guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency* (JRC136986). European Commission, Joint Research Centre. https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2024-04/JRC136986_2024_best_practice_guidelines.pdf

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *Thermal guidelines for data processing environments* (5th ed.). ASHRAE.

Asadov, N., Coroamă, V. C., Franzil, M., Galantino, S., & Finkbeiner, M. (2025). Carbon-aware spatio-temporal workload shifting in edge–cloud environments: A review and novel algorithm. *Sustainability*, 17(14), 6433. <https://doi.org/10.3390/su17146433>

Asadov, N., Coroamă, V. C., Franzil, M., Galantino, S., & Finkbeiner, M. (2025). Carbon-aware spatio-temporal workload shifting in edge–cloud environments: A review and novel algorithm. *Sustainability*, 17(14), 6433. <https://doi.org/10.3390/su17146433>

Chen, M., Gao, C., Song, M., Chen, S., Li, D., & Liu, Q. (2020). Internet data centers participating in demand response: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109466. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109466>

Copernicus Climate Change Service. (n.d.). *ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*. Climate Data Store. Retrieved April 29, 2026, from <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels>

Corigliano, O., Algieri, A., & Fragiaco, P. (2023). Parametric analysis and design of a power plant to recover low-grade heat from data center electronics by using liquid nitrogen. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(12), 121701. <https://doi.org/10.1115/1.4063273>

Corigliano, O., Florio, G., & Fragiaco, P. (2023). Parametric analysis and design of a power plant to recover low-grade heat from data center electronics by using liquid nitrogen. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(12), 121701. <https://doi.org/10.1115/1.4062378>

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Council of European Energy Regulators, & Energy Community Regulatory Board. (2022). *7th CEER-ECRB benchmarking report on the quality of electricity and gas supply*. CEER/ECRB. <https://www.ceer.eu/wp-content/uploads/2024/04/7th-Benchmarking-Report-2022.pdf>

Covenant of Mayors — Europe. (2023, October 10). *Stockholm, Sweden: Heat recovery from data centres*. <https://eu-mayors.ec.europa.eu/en/news/stockholm-sweden-heat-recovery-data-centres>

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (6th ed.). SAGE Publications.

Donnellan, D., Lawrence, A., Bizo, D., Judge, P., O'Brien, J., Davis, J., Smolaks, M., Williams-George, J., & Weinschenk, R. (2024). *Uptime Institute global data center survey 2024*. Uptime Institute. <https://datacenter.uptimeinstitute.com/rs/711-RIA-145/images/2024.GlobalDataCenterSurvey.Report.pdf>

DPR Construction. (n.d.). *Meta Luleå Data Center*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.dpr.com/projects/facebook-sweden-data-center>

Dvořák, V., Zavrel, V., Torrens Galdiz, J. I., & Hensen, J. L. M. (2020). Simulation-based assessment of data center waste heat utilization using aquifer thermal energy storage of a university campus. *Building Simulation*, 13(4), 823–836. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0629-y>

Electric Power Research Institute. (2024). *Data center heat recovery*. <https://restservice.epri.com/publicdownload/000000003002031316/0/Product>

Electricity Maps. (n.d.). *Electricity Maps platform and API*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.electricitymaps.com>

Ember. (n.d.). *Yearly electricity data*. Retrieved April 29, 2026, from <https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/>

Energy Sector Management Assistance Program. (2019). *Global Solar Atlas 2.0: Technical report*. World Bank.

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/529431592893043403/pdf/Global-Solar-Atlas-2-0-Technical-Report.pdf>

European Commission. (2024). *Commission Delegated Regulation (EU) 2024/1364 of 14 March 2024 on the first phase of the establishment of a common Union rating scheme for data centres. Official Journal of the European Union, L 2024/1364.* https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2024/1364/oj/eng

European Commission. (n.d.). *Energy performance of data centres*. Retrieved April 29, 2026, from https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive/energy-performance-data-centres_en

Eurostat. (n.d.). *Electricity prices for non-household consumers — bi-annual data (nrg_pc_205)*. Retrieved April 29, 2026, from https://doi.org/10.2908/nrg_pc_205

Floors, R., Muradyan, P., & Nielsen, M. (2025). *Global Wind Atlas v4* [Data set]. Technical University of Denmark. <https://doi.org/10.11583/DTU.28955267>

Fu, X., Ma, Z., Shao, X., Chen, G., & Qi, J. (2025). Renewable-aware container migration in multi-data centers. *Electronics*, 14(21), 4345. <https://doi.org/10.3390/electronics14214345>

Google. (2024, May 20). *Our first offsite heat recovery project lands in Finland*. <https://blog.google/company-news/inside-google/around-the-globe/google-europe/our-first-offsite-heat-recovery-project-lands-in-finland/>

Google. (n.d.). *Hamina, Finland*. Google Data Centers. Retrieved April 29, 2026, from <https://datacenters.google/locations/hamina-finland>

Google. (n.d.). *Power usage effectiveness*. Google Data Centers. Retrieved April 29, 2026, from <https://datacenters.google/efficiency>

Haghshenas, K., Setz, B., Bloesch, Y., & Aiello, M. (2023). Enough hot air: The role of immersion cooling. *Energy Informatics*, 6, 14. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00269-0>

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Hitachi Energy. (n.d.). *New Facebook data centre, Luleå, Sweden*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.hitachienergy.com/news-and-events/customer-stories/new-facebook-data-centre--lulea--sweden>

Huang, P., Lu, T., Chen, Y., Zhou, Y., & Li, Y. (2020). A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating. *Applied Energy*, 258, 114109. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114109>

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications: A state-of-the-art survey*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>

International Energy Agency. (2025). *Energy and AI*. <https://www.iea.org/reports/energy-and-ai>

International Organization for Standardization, & International Electrotechnical Commission. (2026). *Information technology — Data centres key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness (PUE) (ISO/IEC Standard No. 30134-2:2026)*. <https://www.iso.org/standard/30134-2>

Jahanshahi, A., Yu, N., & Wong, D. (2022). PowerMorph: QoS-aware server power reshaping for data center regulation service. *ACM Transactions on Architecture and Code Optimization*, 19(3), 1–27. <https://doi.org/10.1145/3524129>

Jerez Monsalves, J., Bergaentzlé, C., & Keles, D. (2023). Impacts of flexible-cooling and waste-heat recovery from data centres on energy systems: A Danish case study. *Energy*, 281, 128112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128112>

Khalil, M. I. K., Shah, S. A. A., Taj, A., Shiraz, M., Alamri, B., Murawwat, S., & Hafeez, G. (2022). Renewable-aware geographical load balancing using option pricing for energy cost minimization in data centers. *Processes*, 10(10), 1983. <https://doi.org/10.3390/pr10101983>

Kim, J., Jang, Y., Lee, D., Ham, S. H., & Kim, Y. (2022). Performance characteristics of a waste-heat recovery water-source heat pump system for data centers and residential areas in a heating-dominated region. *Journal of Building Engineering*, 62, 105416. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105416>

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

Kim, J.-H., Lee, S., & Kim, H. (2024). Data center energy evaluation tool development and analysis of power usage effectiveness with different economizer types in various climate zones. *Buildings*, 14(1), 299. <https://doi.org/10.3390/buildings14010299>

Kuzma, S., Bierkens, M. F. P., Lakshman, S., Luo, T., Saccoccia, L., Sutanudjaja, E. H., & Van Beek, R. (2023). *Aqueduct 4.0: Updated decision-relevant global water risk indicators* (Technical Note). World Resources Institute. <https://doi.org/10.46830/writn.23.00061>

Lei, N., & Masanet, E. (2022). Climate- and technology-specific PUE and WUE estimations for U.S. data centers using a hybrid statistical and thermodynamics-based approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 182, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106323>

Lindberg, J., Abdennadher, Y., Chen, J., Lesieutre, B. C., & Roald, L. (2021). A guide to reducing carbon emissions through data center geographical load shifting. In *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Future Energy Systems (e-Energy '21)* (pp. 430–436). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3447555.3466582>

Lindberg, J., Lesieutre, B. C., & Roald, L. A. (2022). Using geographic load shifting to reduce carbon emissions. *Electric Power Systems Research*, 212, 108586. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108586>

Lindberg, J., Lesieutre, B. C., & Roald, L. A. (2022). Using geographic load shifting to reduce carbon emissions. *Electric Power Systems Research*, 212, 108586. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108586>

Masanet, E., Shehabi, A., Lei, N., Smith, S., & Koomey, J. (2020). Recalibrating global data center energy-use estimates. *Science*, 367(6481), 984–986. <https://doi.org/10.1126/science.aba3758>

Meta. (n.d.). *Meta's Luleå Data Centre*. Meta Data Centers. Retrieved April 29, 2026, from <https://datacenters.atmeta.com/asset/lulea-data-center-info-sheet/>

Montagud-Montalvá, C., Navarro-Peris, E., Gómez-Navarro, T., Masip-Sanchis, X., & Prades-Gil, C. (2023). Recovery of waste heat from data centres for decarbonisation of university

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

campuses in a Mediterranean climate. *Energy Conversion and Management*, 290, 117212. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117212>

Mytton, D. (2021). Data centre water consumption. *npj Clean Water*, 4, 11. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00101-w>

Mytton, D., & Ashtine, M. (2022). Sources of data center energy estimates: A comprehensive review. *Joule*, 6(9), 2032–2056. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.07.011>

NASA Langley Research Center. (n.d.). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) data access viewer*. National Aeronautics and Space Administration. Retrieved April 29, 2026, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Ristić, B., Madani, K., & Makuch, Z. (2015). The water footprint of data centers. *Sustainability*, 7(8), 11260–11284. <https://doi.org/10.3390/su70811260>

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>

Sheikholeslami, S. M., Rabiei, A. M., Mohammad-Taheri, M., & Abouei, J. (2022). Cloud data center participation in smart demand response programs for energy cost minimisation. *IET Smart Grid*, 5(5), 380–394. <https://doi.org/10.1049/stg2.12082>

Stockholm Exergi. (n.d.). *Heat recovery*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.stockholmexergi.se/en/heat-recovery/>

Technical University of Denmark, World Bank Group, & Energy Sector Management Assistance Program. (n.d.). *Global Wind Atlas*. Retrieved April 29, 2026, from <https://globalwindatlas.info>

TeleGeography. (n.d.). *Submarine Cable Map*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.submarinecablemap.com>

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας

UNEP Copenhagen Climate Centre. (n.d.). *Open District Heating in Stockholm, Sweden*. Retrieved April 29, 2026, from https://c2e2.unepccc.org/kms_object/open-district-heating-in-stockholm-sweden/

Wang, W., Abdolrashidi, A., Yu, N., & Wong, D. (2019). Frequency regulation service provision in data center with computational flexibility. *Applied Energy*, 251, 113304. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.107>

Wang, Y., Liu, X., Sun, K., Zhang, X., Wang, C., & Xu, Y. (2024). Data center integrated energy system for sustainability (DC-IES): Generalization, approaches, methods, techniques, and future perspectives. *The Innovation Energy*, 1, 100014. <https://doi.org/10.59717/j.xinn-energy.2024.100014>

World Bank Group, Energy Sector Management Assistance Program, & Solargis. (n.d.). *Global Solar Atlas*. Retrieved April 29, 2026, from <https://globalsolaratlas.info>

World Bank. (n.d.). *Firms experiencing electrical outages (% of firms) (IC.ELC.OUTG.ZS)*. World Development Indicators. Retrieved April 29, 2026, from <https://data.worldbank.org/indicator/IC.ELC.OUTG.ZS>

World Resources Institute. (n.d.). *Aqueduct Water Risk Atlas*. Retrieved April 29, 2026, from <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas/>

Yakovlev, I. V., & Avdokunin, N. V. (2023). Efficient use of waste heat from data centers. *Thermal Engineering*, 70(10), 769–776. <https://doi.org/10.1134/S0040601523100117>

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

Yuan, X., Liang, Y., Hu, X., Xu, Y., Chen, Y., & Kosonen, R. (2023). Waste heat recoveries in data centers: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113777. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113777>

Zhang, Y., & Liu, J. (2022). Prediction of overall energy consumption of data centers in different locations. *Sensors*, 22(10), 3704. <https://doi.org/10.3390/s22103704>

Διπλωματική Εργασία : Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης κέντρων δεδομένων μέσω ενσωμάτωσης σε έξυπνα δίκτυα και στρατηγικής επιλογής τοποθεσίας