



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΤΜΗΜΑ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Δ. Πασχαλίδης

Επιβλέπων : Δημήτριος Ασκούνης

Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Αθήνα, Ιούλιος 2025





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΤΜΗΜΑ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



## ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηλίας Δ. Πασχαλίδης

Επιβλέπων : Δημήτριος Ασκούνης

Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7<sup>η</sup> Ιουλίου 2025.

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....  
Δημήτριος Ασκούνης  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Ψαρράς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ευάγγελος Μαρινάκης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2025

.....

Ηλίας Δ. Πασχαλίδης

Διπλωματούχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος «ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

Copyright © Ηλίας Πασχαλίδης, 2025. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Περίληψη

Η βιομηχανική δραστηριότητα μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές ευκαιρίες για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, ιδίως μέσω συστηματικής ανάλυσης και αναδιάρθρωσης των ροών ενέργειας. Η παραμετροποίηση των διαδικασιών και η υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών μπορούν να διατελέσουν προπομπό για σημαντικές ενεργειακές βελτιώσεις, ενώ η εφαρμογή μεθόδων συγκριτικής ενεργειακής αξιολόγησης παραμένει περιορισμένη σε επίπεδο έρευνας και πρακτικής. Βασικό ζητούμενο αποτελεί η δημιουργία δομικών μοντέλων που να συνδέουν τη βιωσιμότητα με την ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς οι βιομηχανίες στρέφονται σε πιο ολοκληρωμένες λύσεις για τη μακροπρόθεσμη λειτουργία τους. Η αξιοποίηση δομικών εξισώσεων ανοίγει τον δρόμο για βαθύτερη κατανόηση των σχέσεων ανάμεσα σε τεχνολογικούς, οικονομικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες, διευκολύνοντας έτσι τη λήψη αποφάσεων σχετικά με επενδύσεις σε τεχνολογίες που είναι ενεργειακά αποδοτικές. Επιπλέον είναι σημαντικό η μελλοντική έρευνα να λάβει υπόψη και τα μη ενεργειακά οφέλη κατά την αξιολόγηση των μέτρων ενεργειακής απόδοσης, ώστε να αποτυπώνεται η πλήρης αξία τους. Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι δεν υπάρχει μία ενιαία βέλτιστη στρατηγική, αλλά απαιτείται ένας υβριδικός συνδυασμός προσεγγίσεων για τη μέγιστη ενεργειακή βελτίωση και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα. Τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS) αναδεικνύονται ως θεμελιώδη για την οργανωσιακή αλλαγή και τη μείωση εκπομπών CO<sub>2</sub> με χαμηλό κόστος, ενώ οι λύσεις Industry 4.0 και Ψηφιοποίηση αποτελούν τον πυρήνα για μια έξυπνη και βιώσιμη βιομηχανία του μέλλοντος, προσφέροντας ολιστική εξοικονόμηση και δραστική μείωση εκπομπών.

**Λέξεις Κλειδιά:** Βελτιστοποίηση Ενεργειακής Απόδοσης, Βιομηχανική Ενεργειακή Διαχείριση, Τεχνολογίες Industry 4.0, Τεχνητή Νοημοσύνη & Big Data, Εργαλεία LCA & MILP, Πολιτικές & Ρυθμιστικά Πλαίσια, Χρηματοδοτικά Εργαλεία & Κίνητρα, Μη Ενεργειακά Οφέλη & Βιωσιμότητα



## **Abstract**

Industrial activity can create significant opportunities for improving energy efficiency, particularly through the systematic analysis and restructuring of energy flows. The parametrization of processes and the adoption of innovative technologies can serve as a precursor to substantial energy improvements, while the application of comparative energy assessment methods remains limited at both research and practical levels. A key challenge lies in developing structural models that link sustainability with energy efficiency, as industries turn to more integrated solutions for their long-term operations. Leveraging structural equations paves the way for a deeper understanding of the relationships between technological, economic, and environmental factors, thereby facilitating decision-making regarding investments in energy-efficient technologies. Furthermore, it is important for future research to consider non-energy benefits when evaluating energy efficiency measures, in order to capture their full value. In conclusion, it is concluded that there is no single optimal strategy, but a hybrid combination of approaches is required for maximum energy improvement and long-term sustainability. Energy Management Systems (EnMS) are emerging as fundamental for organizational change and low-cost CO<sub>2</sub> emission reduction, while Industry 4.0 and Digitalization solutions are the core for a smart and sustainable industry of the future, offering holistic savings and drastic emission reduction.

Keywords: Energy Efficiency Optimization, Industrial Energy Management, Industry 4.0 Technologies, Artificial Intelligence & Big Data, LCA & MILP Tools, Policies & Regulatory Frameworks, Financial Instruments & Incentives, Non-Energy Benefits & Sustainability





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τη συμβολή όλων όσοι με υποστήριξαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας «Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία».

Πρώτα, ευχαριστώ θερμά τον καθηγητή κ. Δημήτριο Ασκούνη, Διευθυντή του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Τεχνοοικονομικά Συστήματα» του ΕΜΠ, για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση και τη διαρκή εμπιστοσύνη που έδειξε στις δυνατότητές μου.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στον υποψήφιο διδάκτορα κ. Κωνσταντίνο Αλεξάκη, για την ακούραστη υποστήριξη και το mentoring, που με βοήθησαν να εξελίξω την έρευνά μου.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στον φίλο μου, κ. Κωνσταντίνο Κασσελούρη, για τη διπλή βοήθεια που μου προσέφερε σε όλα τα στάδια, καθώς και για την αμέριστη ενθάρρυνση που μου έδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειας.

Σε όλους όσοι στήριξαν αυτό το έργο, εκφράζω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη. Η συμβολή τους υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη .....	5
Abstract .....	7
Πίνακας Εικόνων .....	13
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή .....	14
1.1 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας .....	14
1.2 Μεθοδολογική Προσέγγιση .....	15
1.3 Δομή της Εργασίας .....	16
Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	18
2.1 Ηλεκτρική Ενέργεια στη Βιομηχανία .....	18
2.1.1 Ορισμός και Σημασία της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία.....	20
2.2 Το Ενεργειακό Πρόβλημα και Προκλήσεις.....	24
2.2.1 Ενεργειακό Μείγμα και Διαμόρφωση .....	26
2.2.2 Επέκταση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ο Ρόλος τους .....	29
2.2.3 Προκλήσεις στην Ελληνική Κατανάλωση Ενέργειας .....	31
2.3 Στρατηγικές Βελτιστοποίησης Ενεργειακής Απόδοσης .....	33
2.3.1 Ορισμός και Εύρος Στρατηγικών .....	33
2.3.2 Ο Περιβαλλοντικός Ρόλος των Στρατηγικών Ενεργειακής Απόδοσης .....	34
2.4 Οικονομικές Επιπτώσεις .....	39
2.4.1 Οικονομικές Επιπτώσεις της Ενεργειακής Απόδοσης.....	39
Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία Έρευνας .....	41
3.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία.....	41
3.2 Μέθοδος Αναζήτησης Βιβλιογραφίας (Snowballing) .....	41
3.3 Λέξεις Κλειδιά .....	42
3.4 Εργαλεία Χαρτογράφησης και Οργάνωσης.....	42

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

3.5 Κριτήρια Ένταξης Πηγών.....	44
3.6 Κριτήρια Αποκλεισμού Πηγών.....	44
3.7 Σύνοψη Διαδικασίας & Διάγραμμα Ροής.....	46
Κεφάλαιο 4: Στρατηγικές και Μέθοδοι Βελτίωσης Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία.....	47
4.1 Εισαγωγή .....	47
4.2 Κύριες Στρατηγικές και Μέθοδοι Ενεργειακής Απόδοσης .....	48
4.2.1 Διαχείριση Ζήτησης (Demand-Side Management - DSM) & Απόκριση Ζήτησης (Demand Response - DR).....	48
4.2.2 Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις και Βελτιστοποίηση Διεργασιών .....	51
4.2.3 Ψηφιακός Μετασχηματισμός και Τεχνολογίες Industry 4.0 .....	55
4.2.4 Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (Energy Management Systems - EnMS) και Πρότυπα.....	57
4.3 Συνδυασμός Μεθόδων για Βέλτιστα Αποτελέσματα .....	58
4.4 Συγκριτική Ανάλυση και Κριτικά Συμπεράσματα .....	63
Κεφάλαιο 5: Συγκριτική Αξιολόγηση Στρατηγικών Ενεργειακής Βελτίωσης.....	67
5.1 Εισαγωγή .....	67
5.2 Καθορισμός Κριτηρίων Σύγκρισης .....	68
5.2.1 Τεχνικά/Ενεργειακά Κριτήρια: .....	68
5.2.2 Συμφραζόμενα/Πλαισιακά Κριτήρια: .....	69
5.3 Συγκριτική Ανάλυση (Ανά Στρατηγική) .....	71
5.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας & Συμπεράσματα Κεφαλαίου .....	74
5.4.1 Μεθοδολογία Κατάρτισης του Πίνακα.....	74
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	78
6.1 Εισαγωγή .....	78

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

6.2 Βασικά Ευρήματα και Συμπεράσματα .....	78
6.3 Συνεισφορά της Εργασίας.....	81
6.4 Περιορισμοί της Μελέτης.....	81
6.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	82
Βιβλιογραφία .....	84
Παράρτημα Α.....	97
Παράρτημα Β.....	99
Παράρτημα Γ .....	102

## Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (2012-2022).....	19
Εικόνα 2 Συνολική Κατανάλωση ανά Κλάδο Παγκοσμίως .....	25
Εικόνα 3 Ενεργειακό Μείγμα 2013 2023 .....	26
Εικόνα 4 Ενεργειακό Μείγμα Ελλάδος 2023 .....	27
Εικόνα 5 Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ (2017-2023) .....	30
Εικόνα 6 Ενεργειακή Εξάρτηση Στην Ευρώπη 2023 .....	31
Εικόνα 7 Δικτυωτό Διάγραμμα Βιβλιογραφίας.....	43
Εικόνα 8 Διάγραμμα Ροής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	46
Εικόνα 9 Διαχωρισμός Βιβλιογραφίας .....	47
Εικόνα 10 Electricity and Heat Demand in Steel Industry Technological Processes.....	53
Εικόνα 11 διάγραμμα venn στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης.....	60
Εικόνα 12 Γεωγραφική Προέλευση των Μελετών της Συστηματικής Ανασκόπησης.....	63

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η βιομηχανική παραγωγή αποτελεί τον πυρήνα της σύγχρονης οικονομίας [1], ωστόσο η υψηλή ενεργειακή της ένταση συνιστά μια κρίσιμη τεχνο-οικονομική πρόκληση [2] [3]. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας συνεπάγεται αφενός την ανάγκη υιοθέτησης προηγμένων - και συχνά δαπανηρών - τεχνολογικών λύσεων, αφετέρου σημαντικούς οικονομικούς πόρους για τη χρηματοδότηση των απαιτούμενων επενδύσεων. Ταυτόχρονα, οι επιχειρήσεις καλούνται να ισορροπήσουν ανάμεσα σε τεχνική επάρκεια, χρηματοδοτική δυνατότητα και αυστηρή κανονιστική συμμόρφωση, γεγονός που αναδεικνύει την ενεργειακή αποδοτικότητα σε καίριο ζήτημα με ταυτόχρονες τεχνολογικές και οικονομικές συνιστώσες [4]. Στο πλαίσιο της παγκόσμιας μετάβασης προς βιώσιμα μοντέλα ανάπτυξης και της επιτακτικής ανάγκης για μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης στον βιομηχανικό τομέα δεν αποτελεί πλέον απλώς μια επιλογή αλλά και στρατηγική αναγκαιότητα [5]. Η αποτελεσματική διαχείριση της ενέργειας μετασχηματίζεται σε θεμελιώδη παράγοντα για τη διασφάλιση της ανταγωνιστικότητας, τη μείωση του λειτουργικού κόστους και την εναρμόνιση με τα ολοένα και πιο αυστηρά ρυθμιστικά πλαίσια [6]. Η παρούσα διπλωματική εργασία εμβαθύνει στο σύνθετο αυτό πεδίο, επιχειρώντας μια συστηματική ανάλυση και αξιολόγηση των στρατηγικών που μπορούν να οδηγήσουν σε ουσιαστικές βελτιώσεις, συνθέτοντας την τεχνική σκοπιά του μηχανικού με την οικονομική ανάλυση του οικονομολόγου.

### 1.1 Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας

Ο πρωταρχικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συστηματική διερεύνηση, η κριτική ανάλυση και η συγκριτική αξιολόγηση των σύγχρονων στρατηγικών βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης στον βιομηχανικό τομέα μέσα από ένα τεχνο-οικονομικό πρίσμα. Η έρευνα δεν περιορίζεται στην απλή καταγραφή μεθόδων αλλά αποσκοπεί στη σύνθεση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου που θα επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για την υιοθέτηση των πλέον κατάλληλων και οικονομικά βιώσιμων λύσεων.

Για την επίτευξη αυτού του σκοπού τέθηκαν συγκεκριμένοι αλληλένδετοι στόχοι. Αρχικά, επιδιώκεται η χαρτογράφηση του θεωρητικού υποβάθρου και των υφιστάμενων προκλήσεων, αναλύοντας το ενεργειακό πρόβλημα, τη διάρθρωση του ενεργειακού μείγματος και τις οικονομικές επιπτώσεις που αντιμετωπίζει η σύγχρονη βιομηχανία. Στη συνέχεια, η έρευνα εστιάζει στην αναγνώριση και κατηγοριοποίηση των κυριότερων στρατηγικών, όπως η Διαχείριση και Απόκριση Ζήτησης (DSM/DR), οι τεχνολογικές αναβαθμίσεις σε εξοπλισμό και διεργασίες, ο ψηφιακός μετασχηματισμός μέσω τεχνολογιών Industry 4.0 και η εφαρμογή Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS). Ένας κεντρικός στόχος είναι η ανάπτυξη ενός πολυκριτηριακού πλαισίου αξιολόγησης, το οποίο θα ενσωματώνει τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και πλαισιακές παραμέτρους. Μέσω της εφαρμογής αυτού του πλαισίου πραγματοποιείται μια ενδελεχής συγκριτική ανάλυση των στρατηγικών αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα, τις αδυναμίες και τις μεταξύ τους συνέργειες. Τελικός στόχος είναι η διατύπωση συμπερασμάτων και η πρόταση μιας υβριδικής προσαρμοσμένης προσέγγισης που συνδυάζει διαφορετικές μεθόδους για την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων, αναγνωρίζοντας ότι δεν υφίσταται μια μοναδική, καθολικά εφαρμόσιμη λύση.

### 1.2 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων υιοθετήθηκε μια αυστηρή και δομημένη μεθοδολογική προσέγγιση, η οποία θεμελιώνεται σε μια συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την συστηματική και σε βάθος κατανόηση του ερευνητικού πεδίου και τη σύνθεση της υπάρχουσας ακαδημαϊκής γνώσης και των πρακτικών εφαρμογών. Η κεντρική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την αναζήτηση και τον εντοπισμό των πηγών ήταν η μέθοδος της χιονοστιβάδας (snowballing). Η διαδικασία ξεκίνησε με τον προσδιορισμό ενός αρχικού συνόλου θεμελιωδών μελετών και στη συνέχεια επεκτάθηκε συστηματικά μέσω της ανάλυσης τόσο των βιβλιογραφικών τους αναφορών (backward snowballing) όσο και των μεταγενέστερων εργασιών που τις επικαλούνται (forward snowballing). Για την οργάνωση και χαρτογράφηση του εκτενούς υλικού που προέκυψε, αξιοποιήθηκαν εξειδικευμένα εργαλεία όπως το Zotero<sup>1</sup> για τη

---

<sup>1</sup> <https://www.zotero.org/>

διαχείριση των βιβλιογραφικών αναφορών και το Litmaps<sup>2</sup> για την οπτικοποίηση των δικτύων μεταξύ των δημοσιεύσεων. Η επιλογή των τελικών πηγών που εντάχθηκαν στην ανάλυση έγινε βάσει αυστηρών κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, διασφαλίζοντας τη συνάφεια, την επιστημονική εγκυρότητα και την επικαιρότητα του υλικού, με έμφαση σε δημοσιεύσεις της τελευταίας πενταετίας που εστιάζουν άμεσα σε βιομηχανικές εφαρμογές.

### 1.3 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια, τα οποία ακολουθούν μια λογική πορεία από τη θεωρητική θεμελίωση έως τη σύνθεση και τη διατύπωση προτάσεων. Η δομή έχει σχεδιαστεί ώστε να καθοδηγεί τον αναγνώστη με συστηματικό τρόπο στην κατανόηση του σύνθετου αντικειμένου.

Το Κεφάλαιο 1 που διανύετε λειτουργεί ως εισαγωγή, οριοθετώντας το πλαίσιο, τον σκοπό, τους στόχους και τη μεθοδολογία της έρευνας.

Το Κεφάλαιο 2 εδραιώνει το θεωρητικό υπόβαθρο, αναλύοντας την κρισιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία, το ευρύτερο ενεργειακό πρόβλημα, τις προκλήσεις σε παγκόσμιο και εθνικό επίπεδο, καθώς και τα οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη που απορρέουν από την ενεργειακή απόδοση.

Το Κεφάλαιο 3 εστιάζει αποκλειστικά στη μεθοδολογία της έρευνας. Περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, την τεχνική της χιονοστιβάδας, τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν και τα κριτήρια επιλογής και αποκλεισμού των πηγών.

Το Κεφάλαιο 4 αποτελεί τον πυρήνα της ανάλυσης, όπου παρουσιάζονται και εξετάζονται οι κύριες στρατηγικές και μέθοδοι βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης. Αναλύονται προσεγγίσεις όπως η διαχείριση ζήτησης, τις τεχνολογικές αναβαθμίσεις, ο ψηφιακός μετασχηματισμός και τα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης, με αναφορές σε συγκεκριμένες μελέτες περίπτωσης.

---

<sup>2</sup> <https://www.litmaps.com/>



## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Το Κεφάλαιο 5 προχωρά στη συγκριτική αξιολόγηση των στρατηγικών που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Καθορίζεται ένα πολυκριτηριακό πλαίσιο αξιολόγησης και οι στρατηγικές αντιπαραβάλλονται βάσει αυτού, καταλήγοντας σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα και κριτικά συμπεράσματα για τη σχετική τους αποτελεσματικότητα και τα πεδία εφαρμογής τους.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 συνθέτει τα βασικά ευρήματα της εργασίας, διατυπώνοντας τα τελικά συμπεράσματα. Αναδεικνύει τη συνεισφορά της έρευνας, αναγνωρίζει τους περιορισμούς της και προτείνει συγκεκριμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με στόχο την περαιτέρω εμβάθυνση στο πεδίο της βιομηχανικής ενεργειακής βελτιστοποίησης.

Η δομή αυτή επιδιώκει να προσφέρει μια συνεκτική και ολοκληρωμένη εικόνα του αντικειμένου, καλύπτοντας τόσο το θεωρητικό υπόβαθρο όσο και τις πρακτικές εφαρμογές, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί τη λογική συνέχεια μεταξύ των κεφαλαίων.

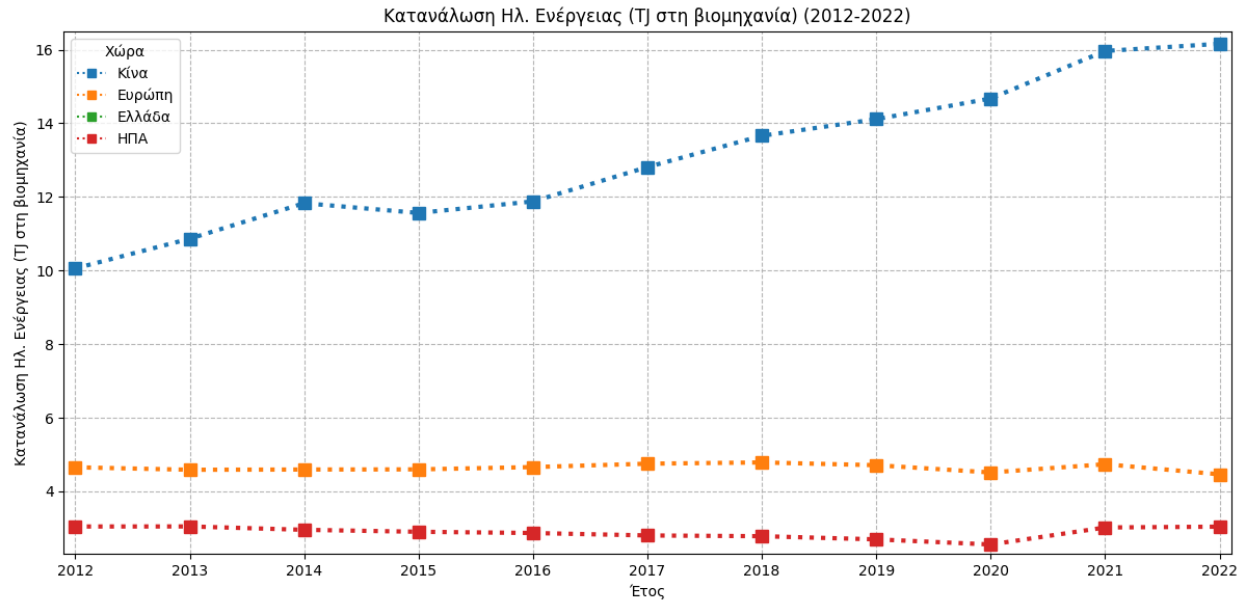
## Κεφάλαιο 2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Ηλεκτρική Ενέργεια στη Βιομηχανία

Η εξέλιξη της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης αποτελεί έναν κρίσιμο δείκτη [7][8] για την οικονομική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και τις τεχνολογικές προκλήσεις του 21ου αιώνα. Υποστηρίζει κρίσιμες διεργασίες από την ηλεκτρολυτική παραγωγή μετάλλων έως την αδιάλειπτη λειτουργία γραμμών αυτοματισμού. Σύμφωνα με διεθνείς εκτιμήσεις το μερίδιό της στο συνολικό ενεργειακό μίγμα του δευτερογενούς τομέα υπερβαίνει το 20 % της τελικής κατανάλωσης [9], ενώ σε επιμέρους κλάδους - όπως ο χάλυβας και τα χημικά - όσο περισσότερες διεργασίες μετατρέπονται σε ηλεκτρικές (π.χ. ηλεκτρικά καμίνια, αντλίες θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας), τόσο μεγαλώνει η ζήτηση για ρεύμα, όμως διευκολύνεται και η απεξάρτηση από τον άνθρακα, εφόσον το ρεύμα παράγεται από ΑΠΕ.

Παράλληλα, η αποκλιμάκωση του ανθρακικού αποτυπώματος ωθεί τις επιχειρήσεις σε μεγαλύτερη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών και σε στρατηγικές βελτιστοποίησης κατανάλωσης [10]. Γίνεται λοιπόν ουσιαστικό να παρακολουθήσουμε την πορεία της ηλεκτρικής κατανάλωσης στη βιομηχανία την τελευταία δεκαετία, τόσο σε ανεπτυγμένες όσο και σε αναπτυσσόμενες οικονομίες, προκειμένου να εξάγουμε συμπεράσματα. Σχετικά με την επίδραση των πολιτικών ενεργειακής απόδοσης, τις διαφορετικές εξελικτικές πορείες ανά γεωγραφική περιοχή και τη σχετική αντοχή απέναντι σε εξωγενείς διαταραχές, όπως ήταν η πανδημία.

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία



Εικόνα 1 Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (2012-2022)<sup>3</sup>

Στο διάγραμμα στην εικόνα 1 βλέπουμε την παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στη βιομηχανία από το 2012 έως το 2022. Αξιοσημείωτη είναι η ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας στην Κίνα, η οποία εξηγείται κυρίως από τη συνεχιζόμενη ταχεία εκβιομηχάνιση και την επέκταση της παραγωγικής της βάσης ως το «εργοστάσιο του κόσμου», με την επιταχυνόμενη οικονομική ανάπτυξη και την εντατική ανάπτυξη ενεργοβόρων βιομημιών να οδηγούν σε συνολική αύξηση της ζήτησης, παρά τις προσπάθειες για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Αντίθετα, στην Ευρώπη και την Αμερική, οι καταναλώσεις είναι σχετικά σταθερές ή εμφανίζουν ήπια μείωση, τάση που αντικατοπτρίζει την ωρίμανση των οικονομιών τους, τη μετατόπιση προς τον τομέα των υπηρεσιών, τις δομικές αλλαγές προς λιγότερο εντατικές ενεργειακά βιομηχανίες και τις αυστηρότερες πολιτικές ενεργειακής απόδοσης. Η Ελλάδα, λόγω του μικρού όγκου κατανάλωσής της, βρίσκεται εκτός γραφήματος κοντά στο μηδέν. Βλέπουμε ότι η κατανάλωση είναι σε Terajoule (TJ), με αυτή της Κίνας να είναι περίπου δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη από την κατανάλωση της Ευρώπης και της Αμερικής. Τέλος, μέσα στη δεκαετία, η Κίνα έχει παρουσιάσει μια αύξηση 60% στην κατανάλωση και δεν επηρεάστηκε τόσο από τον COVID σε σύγκριση με την Ευρώπη και την Αμερική, γεγονός

<sup>3</sup> <https://data.worldbank.org/>

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

που υποδηλώνει την ταχεία αναπροσαρμογή της βιομηχανικής της παραγωγής και τον ρόλο της στην κάλυψη παγκόσμιων αναγκών εν μέσω της πανδημίας, σε αντίθεση με τις δυτικές οικονομίες που βίωσαν πιο παρατεταμένες διαταραχές στην παραγωγή και τη ζήτηση. [11]

### 2.1.1 Ορισμός και Σημασία της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Η ενεργειακή απόδοση είναι η αναλογία μεταξύ του αποτελέσματος ενός συστήματος προς την ενέργεια που χρειάστηκε το σύστημα για να εκτελέσει μία λειτουργία. [12]

$$\text{Ενεργειακή Απόδοση (E.A.)} = \frac{\text{(Ωφέλιμη Ενεργειακή Έξοδος)}}{\text{(Συνολική Ενεργειακή Είσοδος)}} \quad (2.1)$$

Ο γενικός τύπος για την ενεργειακή απόδοση εκφράζει την αναλογία της ωφέλιμης ενέργειας που παράγεται προς τη συνολική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα, εκφράζεται συχνά και ως ποσοστό πολλαπλασιάζοντας το αποτέλεσμα επί 100. Για παράδειγμα, αν μια μηχανή λαμβάνει 500 joules ενέργειας και παράγει 100 joules ωφέλιμης ενέργειας, η απόδοσή της είναι  $100/500 = 0.2$ , ή 20%. [13]

### 2.1.2 Βασικές Αρχές και Δείκτες Μέτρησης

Οι βασικές αρχές περιλαμβάνουν την επαναχρησιμοποίηση ενεργειακών απωλειών, η οποία στοχεύει στη μείωση της ενέργειας από την παραγωγή έως την τελική χρήση. Η αποδοτική χρήση των ενεργειακών πόρων αναφέρεται στην προσπάθεια επίτευξης του μέγιστου δυνατού έργου με τη λιγότερη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Η βελτιστοποίηση είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης συγκεκριμένων διεργασιών ενός συστήματος μέσω αυτοματισμού ή τεχνολογικών αναβαθμίσεων. Αυτό επιτρέπει στις βιομηχανίες να λαμβάνουν αποφάσεις βασιζόμενες σε δεδομένα πραγματικού χρόνου (real-time data) και να υπολογίζουν δείκτες. Τέτοιοι δείκτες είναι η Συνολική Κατανάλωση Ενέργειας (Total Energy Consumption), που εκφράζεται σε ενέργεια ανά ώρα και ο δείκτης ενεργειακής απόδοσης (Energy Performance Indicator – EnPI), ο οποίος αναπαριστά τη συνολική κατανάλωση ενέργειας για να παραχθεί μία αυτούσια μονάδα

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

προϊόντος. Όλες αυτές οι διαδικασίες πρέπει να έχουν έναν επαναλαμβανόμενο ρυθμό προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η μείωση του κόστους όσο και του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

$$EnPI = \frac{\text{Κατανάλωση Ενέργειας}}{\text{Παραγόμενη Μονάδα Προϊόντος}} \quad (2.2)$$

Ο παραπάνω τύπος υπολογίζει πόση ενέργεια καταναλώνεται για την παραγωγή κάθε μονάδας προϊόντος. Είναι ένας βασικός δείκτης για την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης σε βιομηχανικές ή άλλες παραγωγικές διαδικασίες. Όσο πιο χαμηλό είναι το αποτέλεσμα, τόσο καλύτερη είναι η ενεργειακή απόδοση.

$$SEC = \frac{\text{Συνολική Ενέργεια}}{\text{Ποσότητα Παραγόμενου Προϊόντος}} \quad (2.3)$$

Ο παραπάνω τύπος υπολογίζει πόση ενέργεια απαιτείται για την παραγωγή μιας μονάδας προϊόντος. Είναι δείκτης ενεργειακής απόδοσης, καθώς όσο χαμηλότερο είναι το Specific Energy Consumption (SEC), τόσο πιο ενεργειακά αποδοτική είναι η διαδικασία.

$$ESI = \frac{\text{Αρχική Κατανάλωση} - \text{Τελική Κατανάλωση}}{\text{Αρχική Κατανάλωση}} \quad (2.4)$$

Ο παραπάνω τύπος μετράει την ποσοστιαία μείωση στην κατανάλωση ενέργειας, δηλαδή αποτελεί δείκτη της επιτυχίας των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας. Η θετική τιμή του Energy Savings Index (ESI) σημαίνει εξοικονόμηση ενώ μηδέν ή αρνητική τιμή σημαίνει καμία εξοικονόμηση ή αύξηση της κατανάλωσης.

### 2.1.3 Οφέλη της Ενεργειακής Απόδοσης

Η ενεργειακή απόδοση στη βιομηχανία προσφέρει πολύπλευρα οφέλη που εκτείνονται πέρα από τη μείωση του λειτουργικού κόστους, συμβάλλοντας σημαντικά στην οικονομική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την κοινωνική ευημερία.

### **Οικονομικά Οφέλη**

Η εφαρμογή στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης στη βιομηχανία οδηγεί σε άμεση και σημαντική οικονομική εξοικονόμηση, βελτιώνοντας την ανταγωνιστικότητα και την κερδοφορία των επιχειρήσεων. [14][15]

### **Μείωση Λειτουργικού Κόστους και Εξοικονόμηση Ενέργειας:**

Οι τεχνολογίες ανάκτησης θερμότητας απορριμμάτων (Waste Heat Recovery - WHR) μπορούν να έχουν απόδοση επένδυσης σε λιγότερο από ένα έτος λόγω της μειωμένης λειτουργικής δαπάνης και της βελτιωμένης ενεργειακής απόδοσης. [16] Σύμφωνα με την IEA (International Energy Agency), μεταξύ 2000 και 2017, η ενεργειακή ένταση (τελική κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα ακαθάριστης προστιθέμενης αξίας) στον βιομηχανικό τομέα μειώθηκε κατά 25%. Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης οδηγεί σε αύξηση της παραγωγικότητας, μειώνοντας το κόστος συντήρησης και αυξάνοντας την απόδοση παραγωγής ανά μονάδα εισροής. [17] Στις ΗΠΑ, το πρόγραμμα του Υπουργείου Ενέργειας έχει υποστηρίξει 3.600 εγκαταστάσεις (που αντιστοιχούν στο 14% των Αμερικανών κατασκευαστών) οι οποίες έχουν αναφέρει εξοικονόμηση 2,2 τετράκις εκατομμυρίων BTU ενέργειας, ισοδύναμο με 10,6 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ σε εξοικονόμηση κόστους. [18]

### **Αύξηση της Ανταγωνιστικότητας:**

Η μείωση του ενεργειακού κόστους απελευθερώνει κεφάλαια που μπορούν να επανεπενδυθούν σε άλλους τομείς, ενισχύοντας την ανάπτυξη της εταιρείας. Επιπλέον, η βελτιωμένη ενεργειακή απόδοση μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ασφάλεια στις εγκαταστάσεις και βελτιωμένη εταιρική φήμη, παράγοντες που ενισχύουν την ανταγωνιστική θέση της επιχείρησης. [2]

### **Περιβαλλοντικά Οφέλη**

Η ενεργειακή απόδοση είναι ένας κρίσιμος μοχλός για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της βιομηχανίας. Η μείωση

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

της κατανάλωσης ενέργειας συμβάλλει επίσης στη διατήρηση φυσικών πόρων όπως το νερό και τα ορυκτά καύσιμα.[19] [20]

### **Μείωση Εκπομπών Αερίων του Θερμοκηπίου (CO<sup>2</sup>):**

Η υιοθέτηση ενεργειακά αποδοτικών τεχνολογιών στη χαλυβουργία θα μπορούσε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 5,4 EJ, με πάνω από το 65% αυτού του τεχνικού δυναμικού να προέρχεται από την Κίνα, υπογραμμίζοντας το δυναμικό μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> [19].

Η ευρεία υιοθέτηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης θα μπορούσε να μειώσει τη βιομηχανική χρήση ενέργειας κατά πάνω από 25%, που μεταφράζεται σε σημαντική μείωση 8% στην παγκόσμια χρήση ενέργειας και 12,4% στις παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> [21].

Ενδεικτικά, οι βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση αναμένεται να μειώσουν τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά 22% στους τομείς του σιδήρου και χάλυβα, 22% στους χημικούς τομείς, 35% στον τομέα των μη μεταλλικών ορυκτών (π.χ. τσιμέντο, ασβέστης), 15% στον τομέα των μη σιδηρούχων μετάλλων και 32% στα διυλιστήρια έως το 2050, σε σύγκριση με το βασικό σενάριο. [18]

### **Κοινωνικά Οφέλη**

Πέρα από τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, η ενεργειακή απόδοση έχει θετικές κοινωνικές επιπτώσεις, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια, τη δημιουργία θέσεων εργασίας και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. [22][23]

### **Ενεργειακή Ασφάλεια και Ανεξαρτησία:**

Η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τις εισαγωγές ενέργειας, ειδικά ορυκτών καυσίμων, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας. [24]

### **Δημιουργία Θέσεων Εργασίας:**

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Η ενεργειακή μετάβαση, συμπεριλαμβανομένης της ενεργειακής απόδοσης, οδήγησε στη δημιουργία 16 εκατομμυρίων νέων θέσεων εργασίας παγκοσμίως μεταξύ 2012 και 2023, υπερκαλύπτοντας τις απώλειες λόγω της απανθρακοποίησης. Αυτό περιλαμβάνει νέες εξειδικευμένες θέσεις εργασίας σε τομείς όπως οι μηχανικοί αποθήκευσης ενέργειας, οι ειδικοί κυβερνοασφάλειας για έξυπνα δίκτυα και οι σύμβουλοι πράσινης χρηματοδότησης. [25]

### **Βελτίωση της Δημόσιας Υγείας και Ποιότητας Ζωής:**

Οι βελτιώσεις στην ενεργειακή απόδοση συμβάλλουν στη μείωση των εκπομπών ρύπων που επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα, βελτιώνοντας έτσι τη δημόσια υγεία. Επίσης, μπορούν να οδηγήσουν σε βελτιωμένο εργασιακό περιβάλλον με καλύτερο φωτισμό, θερμοκρασιακό έλεγχο και ποιότητα αέρα, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και την υγεία των εργαζομένων. [26]

### **Προώθηση της Αειφόρου Ανάπτυξης και Κοινωνικής Ευθύνης:**

Η επένδυση σε ενεργειακά αποδοτικές λύσεις αναδεικνύει τη δέσμευση μιας επιχείρησης προς τη βιωσιμότητα και την εταιρική κοινωνική ευθύνη, ενισχύοντας τη θετική εικόνα της στην κοινωνία και τους καταναλωτές.

Η αειφόρος ανάπτυξη αποτελεί πλέον βασική παράμετρο στη χάραξη πολιτικών σε τομείς όπως η ενέργεια, η βιομηχανία και η γεωργία, με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης να συμβάλλει στην προστασία του φυσικού περιβάλλοντος και στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής.

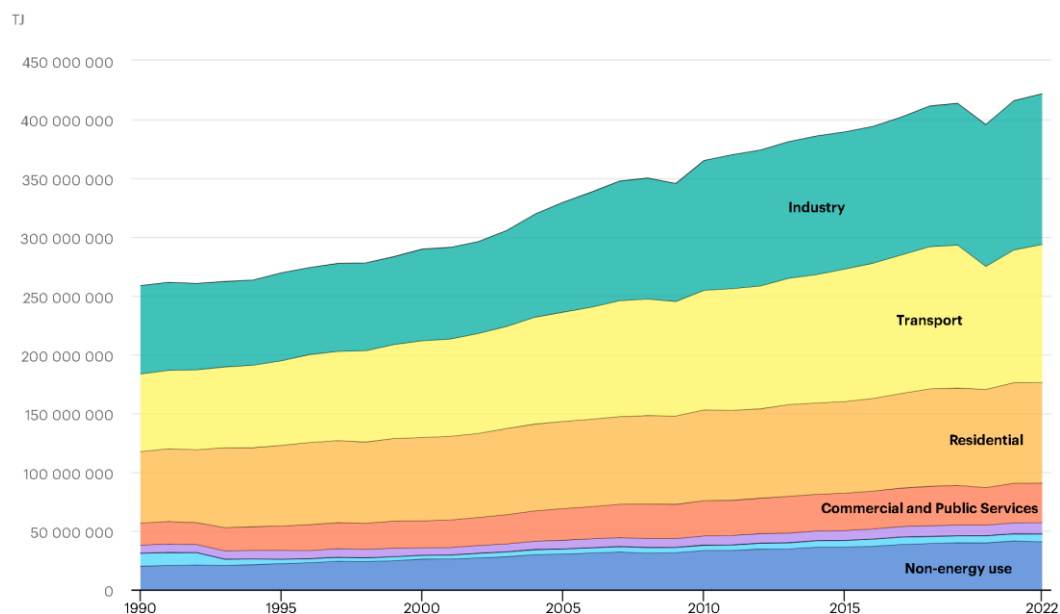
## 2.2 Το Ενεργειακό Πρόβλημα και Προκλήσεις

Ένα από τα βασικά ζητήματα της εποχής μας, τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε εθνικό/τοπικό επίπεδο, είναι το ενεργειακό πρόβλημα και οι προκλήσεις που συνδέονται με αυτό.



## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Total final consumption (TFC) by sector, World, 1990-2022



IEA. Licence: CC BY 4.0

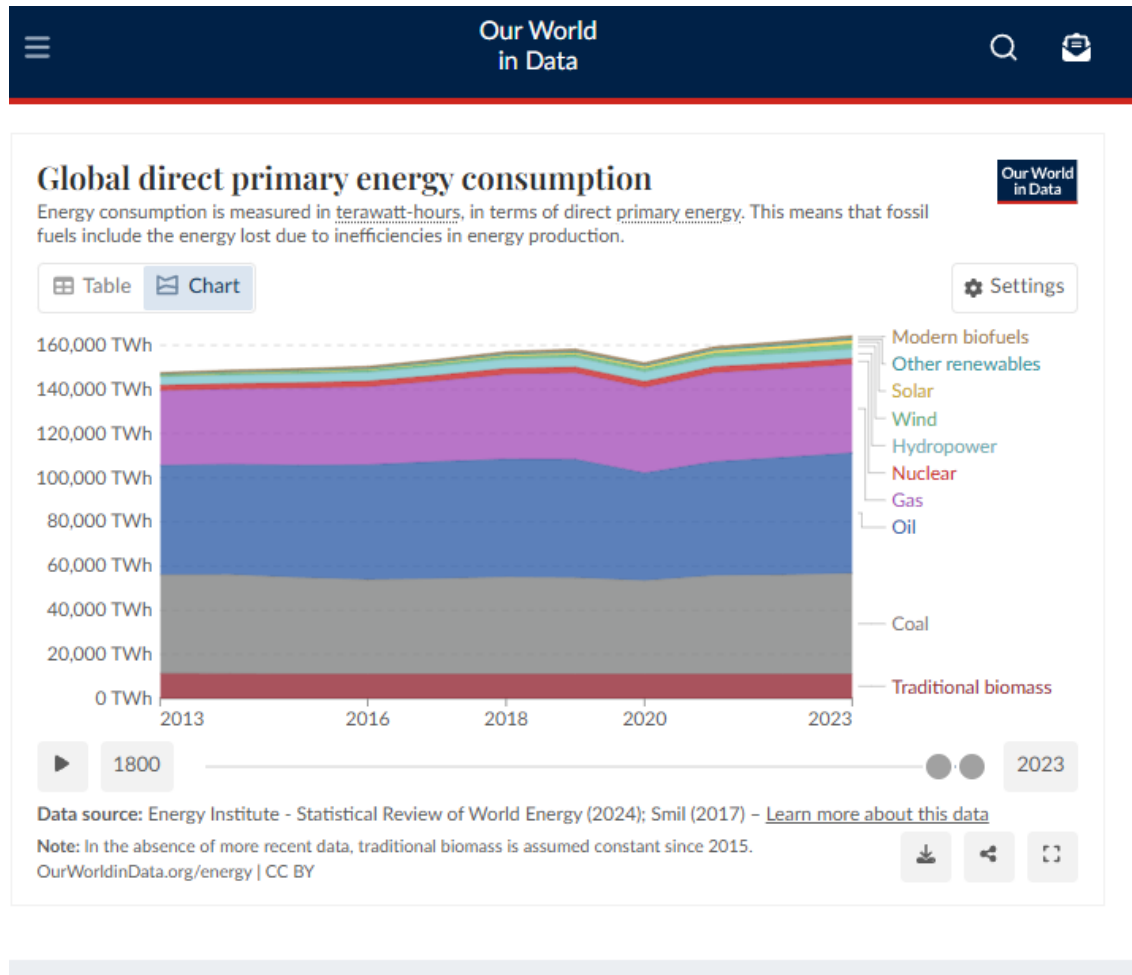
● Industry ● Transport ● Residential ● Commercial and Public Services ● Agriculture / Forestry ● Fishing ● Other non-specified ● Non-energy use

### Εικόνα 2 Συνολική Κατανάλωση ανά Κλάδο Παγκοσμίως<sup>4</sup>

Ασφαλώς Στο διάγραμμα της εικόνας 2 φαίνεται η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανά κλάδο παγκοσμίως, από το 1990 έως το 2022 και δείχνει μία σταθερή ανοδική τάση για τη ζήτηση της ενέργειας. Οι δύο μεγαλύτεροι κλάδοι είναι των μεταφορών και της βιομηχανίας ενώ ο κλάδος οικιακής χρήσης έχει μία ελαφριά σταθερή άνοδο. Επίσης στο διάγραμμα φαίνεται ότι την περίοδο του 2020 λόγω της πανδημίας του COVID-19, προκλήθηκε μια μικρή πτώση στην κατανάλωση στους δύο κλάδους υψηλής ενεργειακής έντασης, τη βιομηχανίας και τις μεταφορές.

<sup>4</sup> <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/>

## 2.2.1 Ενεργειακό Μείγμα και Διαμόρφωση



Εικόνα 3 Παγκόσμια Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας 2013 - 2023<sup>5</sup>

Στο σχήμα βλέπουμε πώς κατανέμεται η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας την τελευταία δεκαετία, από το 2013 έως το 2023, ανά πηγή ενέργειας. Όπως για παράδειγμα, το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, τα πυρηνικά, όλες οι ανανεώσιμες πηγές και η βιομάζα. Παρατηρείται μια αυξητική τάση στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας την τελευταία δεκαετία. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της πανδημίας της COVID-19, γύρω στο 2020, παρατηρήθηκε μείωση στην παγκόσμια ζήτηση. Η κατανάλωση όμως επανήλθε γρήγορα στα προ-πανδημίας επίπεδα, ξεπερνώντας μάλιστα το 2023.

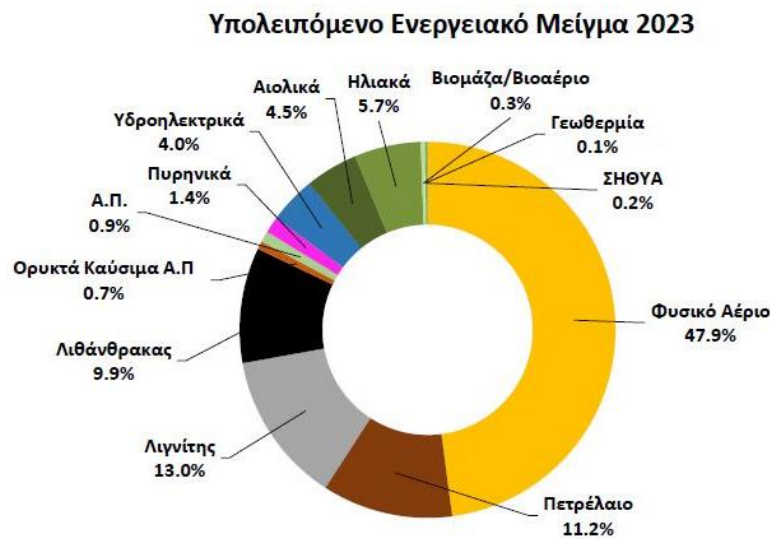
<sup>5</sup> [Global direct primary energy consumption](#)

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Από το σχήμα, γύρω στο 2020, εντός πανδημίας του COVID-19, βλέπουμε μια μικρή πτώση στην πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας η οποία βρίσκεται στη φύση, πριν μετατραπεί σε άλλη μορφή.

Η οποία όμως επανήλθε γρήγορα στα προ πανδημίας επίπεδα. Ακόμα και τα ξεπερνάει το 2023. Αυτό αποδεικνύει μια παροδική, αλλά όχι μακροπρόθεσμη, διακοπή στην ανοδική τάση σε παγκόσμιο επίπεδο.

### Υπολειπόμενο Ενεργειακό Μείγμα 2023



Εικόνα 4 Ενεργειακό Μείγμα Ελλάδος 2023<sup>6</sup>

Εξετάζοντας το γράφημα πίτας για το υπολειπόμενο ενεργειακό μείγμα της Ελλάδος το 2023, παρατηρούμε μια συνεχιζόμενη ισχυρή εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, παρά τις προσπάθειες για ενεργειακή μετάβαση. Το φυσικό αέριο κυριαρχεί στο ενεργειακό μείγμα με ποσοστό 47,9%, γεγονός που υπογραμμίζει τη στρατηγική του σημασία, αλλά ταυτόχρονα και την ευαισθησία της χώρας σε γεωπολιτικές διακυμάνσεις και διεθνείς

<sup>6</sup> [Ενεργειακό Μείγμα - Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης Α.Ε. - ΔΑΠΕΕΠ Α.Ε.](#)

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

τιμές ενέργειας. Ακολουθούν ο λιγνίτης με 13%, το πετρέλαιο με 11,2% και ο άνθρακας με 9,9%. Το συνδυασμένο ποσοστό των ορυκτών καυσίμων (συνολικά περίπου 82%) καταδεικνύει την πρόκληση που αντιμετωπίζει η Ελλάδα στην επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης και τη μείωση του περιβαλλοντικού της αποτυπώματος. Παράλληλα, είναι εμφανής, αν και ακόμη περιορισμένη, η συμβολή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Συγκεκριμένα, τα ηλιακά συστήματα συνεισφέρουν 5,7%, τα αιολικά 4,5%, οι υδροηλεκτρικές μονάδες 4,0%, ενώ η βιομάζα/βιοαέριο και η γεωθερμία έχουν μικρότερα ποσοστά (0,3% και 0,1% αντίστοιχα). Οι ΑΠΕ αθροιστικά ανέρχονται σε 14,2%, ποσοστό που, αν και δείχνει μια θετική τάση προς την πράσινη ενέργεια, υπολείπεται σημαντικά των στόχων για κλιματική ουδετερότητα. Η χαμηλή τους συμμετοχή, σε σύγκριση με την κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων, αναδεικνύει την ανάγκη για επιταχυνόμενη ανάπτυξη των υποδομών ΑΠΕ και την υιοθέτηση πιο φιλόδοξων πολιτικών. Η πορεία προς ένα πλήρως βιώσιμο ενεργειακό μείγμα απαιτεί επιταχυνόμενη επένδυση σε αυτές τις ανανεώσιμες πηγές και περαιτέρω μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα. Η τρέχουσα σύνθεση του μείγματος υπογραμμίζει την ανάγκη για ενισχυμένες πολιτικές ενεργειακής απόδοσης και την ανάπτυξη τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, ώστε να διασφαλιστεί η σταθερότητα του δικτύου κατά την ενσωμάτωση μεγαλύτερων ποσοστών διαλείπουσας παραγωγής από ΑΠΕ. Η επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών ενεργειακών και κλιματικών στόχων εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα και την αποτελεσματικότητα αυτής της μετάβασης.

Η παραπάνω μεθοδολογία (RE&GO) ευθυγραμμίζεται [27] με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Πρόκειται για μια ευρωπαϊκή μεθοδολογία που τυποποιεί τον υπολογισμό και τη δήλωση του ενεργειακού μείγματος. Η κατανόηση του ενεργειακού μείγματος απαιτεί επίσης τη γνώση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιείται για την πιστοποίηση της προέλευσης της ενέργειας, όπως το «RE & GO Project». Το "RE & GO Project" στα ελληνικά σημαίνει "Έργο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και Εγγυήσεων Προέλευσης (ΕΠ)". Συγκεκριμένα, RE (Renewable Energy / Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – ΑΠΕ) αναφέρεται στην παραγωγή ενέργειας από πηγές όπως ο ήλιος, ο άνεμος, το νερό, η μάζα και άλλες. GO (Guarantees of Origin / Εγγυήσεις Προέλευσης - ΕΠ) είναι ηλεκτρονικές πιστοποιήσεις που αναφέρονται σε συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που έχει παραχθεί από μια ανανεώσιμη πηγή.

## 2.2.2 Επέκταση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ο Ρόλος τους

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν βασικό συστατικό της αποδοτικότερης ενεργειακής στρατηγικής των χωρών του κόσμου. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο ήλιος, ο αέρας, το νερό, η βιομάζα και η γεωθερμία, αποτελούν φυσικές πηγές που ανανεώνονται συνεχώς, προσφέροντας μια καθαρότερη λύση έναντι των ορυκτών καυσίμων και συμβάλλοντας παράλληλα στη μείωση της ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής.

Οι κυριότερες τεχνολογίες των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

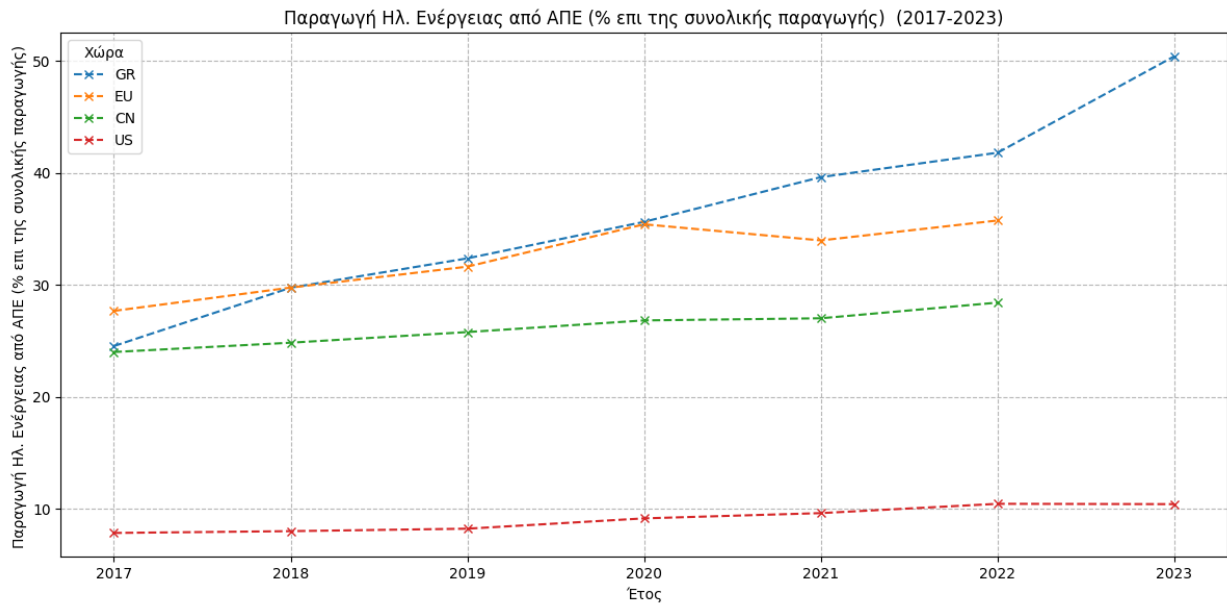
Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Photovoltaic Systems) και οι Ηλιακοί συλλέκτες (Solar Collectors) είναι οι δύο κύριες τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας [23]. Από τη μία, οι ηλιακοί συλλέκτες συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία για να θερμάνουν ένα ρευστό (π.χ. νερό), το οποίο χρησιμοποιείται για τη θέρμανση χώρων. Από την άλλη, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας καθώς έχουν ενταχθεί σε μεγάλο βαθμό από τη βιομηχανία.

Η μετατροπή ενέργειας βιομάζας (Biomass Energy Conversion). Περιλαμβάνει διεργασίες όπως η καύση για παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού, η πυρόλυση για παραγωγή βιο-πετρελαίου και η αναερόβια χώνευση για παραγωγή βιοαερίου. Μέσω της εν λόγω τεχνικής, η οργανική ύλη που προέρχεται από φυτά και ζώα, όπως ζωική κοπριά και δασικά απόβλητα, μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη μορφή ενέργειας και αποτελεί τον πλέον κατάλληλο τρόπο αξιοποίησης των οργανικών αποβλήτων και των ανανεώσιμων πόρων.

Η γεωθερμική ενέργεια (Geothermal Energy) αξιοποιεί τη θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της γης. Οι βασικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας είναι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε γεωθερμικούς σταθμούς (παραδείγματος χάρη, η θερμότητα του υπεδάφους μετατρέπει το νερό σε ατμό, το οποίο με τη σειρά του κινεί τις γεωθερμικές τουρμπίνες) ή άμεσες χρήσεις θέρμανσης και ψύξης (παραδείγματος χάρη, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας για κτίρια, θέρμανση θερμοκηπίων). Ένα πολύ μεγάλο

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

συγκριτικό πλεονέκτημα της γεωθερμικής ενέργειας είναι ότι αποτελεί συνεχώς διαθέσιμη πηγή ενέργειας, ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες, σε αντιδιαστολή με αιολικά, φωτοβολταϊκά και υδροηλεκτρικά πάρκα.



Εικόνα 5 Παραγωγή Ενέργειας από ΑΠΕ (2017-2023)<sup>7</sup>

Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5, η οποία παρουσιάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) από το 2017 έως το 2023, παρατηρείται μια σταθερά ανοδική πορεία σε παγκόσμιο επίπεδο.[28][29] Αυτή η αυξητική τάση αντικατοπτρίζει την παγκόσμια δέσμευση για ενεργειακή μετάβαση και μείωση των εκπομπών άνθρακα, όπως επισημαίνεται από διεθνείς οργανισμούς. Εξετάζοντας τα δεδομένα του 2023, είναι αξιοσημείωτο ότι η Ελλάδα καταγράφει το μεγαλύτερο ποσοστό αύξησης στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ σε σχέση με τις προηγούμενες χρονιές. Αυτό υποδηλώνει μια ταχεία ανάπτυξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα, πιθανόν λόγω της εφαρμογής εθνικών στρατηγικών και επενδυτικών πρωτοβουλιών για την ενίσχυση της πράσινης ενέργειας. Αντίθετα, η Κίνα (CN) και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής εμφανίζουν ένα συγκριτικά μικρότερο βαθμό αύξησης επί της συνολικής τους παραγωγής ενέργειας από

<sup>7</sup> <https://data.worldbank.org/>

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

ΑΠΕ για το ίδιο έτος. Αν και πρόκειται για χώρες με ήδη πολύ μεγάλη παραγωγή ΑΠΕ σε απόλυτους αριθμούς, ο ρυθμός της πρόσθετης ανάπτυξης, ως ποσοστό της συνολικής τους παραγωγής, φαίνεται να επιβραδύνεται ή να είναι λιγότερο εντυπωσιακός σε σχέση με την Ελλάδα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο ήδη υψηλό επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ στις αγορές τους, καθώς και σε διαφοροποιημένες ενεργειακές πολιτικές ή προτεραιότητες που επηρεάζουν τον ρυθμό επέκτασης.[30]

### 2.2.3 Προκλήσεις στην Ελληνική Κατανάλωση Ενέργειας

Η κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις, κυρίως λόγω της έντονης εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και της ανάγκης για επιτάχυνση της ενεργειακής μετάβασης.[22][3]



Εικόνα 6 Ενεργειακή Εξάρτηση στην Ευρώπη 2023 <sup>8</sup>

<sup>8</sup> [Statistics | Eurostat](#)

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Η πιο βασική πρόκληση για την κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα είναι ο υψηλός δείκτης ενεργειακής εξάρτησης. Όπως βλέπουμε και στο σχήμα, ο δείκτης ενεργειακής εξάρτησης της Ελλάδας είναι 76% με επίσημα στοιχεία το 2022, έναντι 62,5% της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτός ο υψηλός δείκτης, σε συνδυασμό με το μεγάλο πρόβλημα που έχει προκύψει με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δημιουργεί πρόσθετες προκλήσεις. Συγκεκριμένα, η αυξανόμενη περικοπή παραγωγής τους εξαιτίας των ελλείψεων στο δίκτυο, καθώς και η μετάβαση των έργων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε διακυμαινόμενες τιμές αγοράς, οδηγούνε μηδενικές τιμές και δυσχεραίνουν τη χρηματοδότησή τους.

Παράλληλα, πρόκληση αποτελεί η αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ σε τομείς τελικής κατανάλωσης, όπως οι μεταφορές και η βιομηχανία, που παραδοσιακά βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Στον τομέα των μεταφορών αυτό μεταφράζεται στην ανάγκη η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων να προέρχεται από πιστοποιημένες ανανεώσιμες πηγές και στην προώθηση βιοκαυσίμων όπως η βιοαιθανόλη και το βιοπετρέλαιο για οχήματα και πλοία.

Στο κομμάτι της βιομηχανίας, βασική είναι η αντικατάσταση ορυκτών καυσίμων σε βιομηχανικές διεργασίες. Η εν λόγω πρόκληση αντιμετωπίζεται με την αντικατάσταση των εν λόγω καυσίμων είτε με ηλιακή θερμότητα (παραδείγματος χάρη, με ηλιακούς συλλέκτες για την παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών), είτε με ηλεκτρική θέρμανση μέσω αντλιών θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας και ηλεκτρικών αντιστάσεων, η οποία να γίνεται εξ ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εναλλακτικά, θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί η βιομάζα για την κάλυψη των θερμικών αναγκών μιας βιομηχανίας. Ένα πολύ μεγάλο βήμα για τη βιομηχανία είναι η χρήση του πράσινου υδρογόνου. Όπως γνωρίζουμε, η παραγωγή χάλυβα απαιτεί πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ορυκτά καύσιμα. Η αντικατάσταση μέσω της χρήσης του πράσινου υδρογόνου, το οποίο παράγεται από την ηλεκτρόλυση νερού χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ, ως πρώτη ύλη και καύσιμο. Τέλος, μια σημαντική μέθοδος αντιμετώπισης της πρόκλησης αυτής είναι η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης μέσω της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δηλαδή, προτείνεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων στις στέγες βιομηχανικών μονάδων για την



## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

κάλυψη μέρους ή την πλήρη κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της βιομηχανίας, μειώνοντας ταυτόχρονα την εξάρτησή της από το δίκτυο και φυσικά, το αποτύπωμα του άνθρακα.

Απαιτούνται επενδύσεις σε δίκτυα και διασυνδέσεις, καθώς και η εισαγωγή νέων τεχνολογιών που είναι οικονομικά αποδεκτές από τη βιομηχανία, όπως οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες), καθώς και η ανάπτυξη των διμερών συμβολαίων μεταξύ των παρόχων και των επιχειρήσεων. Τέλος, στο κομμάτι της ασφάλειας, η ανθεκτικότητα των υποδομών σε ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως ο "Daniel" πριν από δύο χρόνια, καθώς και η ολοένα και πιο ανεπτυγμένη χρήση τεχνολογιών στον τομέα της ενέργειας μέσω της βιομηχανίας 4.0, καθιστούν τις κυβερνοαπειλές εξίσου ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στο οποίο πρέπει να επενδύσουν τόσο το κράτος όσο και η ίδια η βιομηχανία, καθώς η ασφάλεια παραμένει κρίσιμη. [31] Η ενεργειακή υποδομή πρέπει να αντέχει ακραία καιρικά φαινόμενα και κυβερνο-επιθέσεις, γιατί ενδεχόμενη διακοπή ή παραβίαση μπορεί να παραλύσει κρίσιμες βιομηχανικές και κοινωνικές λειτουργίες. Η διασφάλιση φυσικής και ψηφιακής ανθεκτικότητας προστατεύει επενδύσεις δισεκατομμυρίων, διατηρεί την ενεργειακή επάρκεια και αποτρέπει βαρύ οικονομικό και κοινωνικό κόστος.

## 2.3 Στρατηγικές Βελτιστοποίησης Ενεργειακής Απόδοσης

### 2.3.1 Ορισμός και Εύρος Στρατηγικών

Ένα σύνολο μεθοδολογιών και πρακτικών στοχεύει στη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης προκειμένου να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο επίπεδο παραγωγής ενός προϊόντος. Οι στρατηγικές αυτές ενισχύουν την οικονομική βιωσιμότητα και η ανταγωνιστικότητα των βιομηχανιών.

### **Η Οικονομική Βιωσιμότητα και η Ενεργειακή Απόδοση**

Η ενεργειακή απόδοση παίζει έναν κρίσιμο ρόλο για τη βελτίωση της οικονομικής βιωσιμότητας. Η εφαρμογή των στρατηγικών συμβάλλει στη μείωση του τελικού κόστους στη βιομηχανία. Οι στρατηγικές αυτές οδηγούν σε αρκετά σημαντική μείωση του κόστους

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

ενέργειας, με σκοπό την απελευθέρωση όχι μόνο τεχνικών πόρων αλλά και κεφαλαίων. Αυτοί οι πόροι, εν συνεχεία, δύνανται να διοχετευθούν είτε σε άλλες γραμμές παραγωγής είτε σε νέες επενδύσεις, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της οικονομικής θέσης της βιομηχανίας.

### **Ενίσχυση της Ανταγωνιστικότητας και Μακροοικονομικά Οφέλη**

Οι επιχειρήσεις, μειώνοντας το ενεργειακό κόστος, αυξάνουν άμεσα την ανταγωνιστικότητά τους. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές σε βιομηχανίες εντάσεως ενέργειας, όπου τα οφέλη μεγιστοποιούνται.[32][33] Σε μακροοικονομικό επίπεδο, τόσο παγκόσμια όσο και εθνικά, όταν η ενεργειακή αποδοτικότητα βελτιστοποιείται, επιφέρει τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα, συνεισφέροντας έτσι στην ενεργειακή ασφάλεια. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η συμβολή στην αποκλιμάκωση των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που έχει ευρύτατες θετικές επιπτώσεις στην οικονομία. [22][34]

### **2.3.2 Ο Περιβαλλοντικός Ρόλος των Στρατηγικών Ενεργειακής Απόδοσης**

Η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και η διασφάλιση της περιβαλλοντικής αειφορίας συνιστούν αδιαμφισβήτητα κορυφαίες προτεραιότητες της εποχής μας, καθώς οι περιβαλλοντικές προκλήσεις ως αποτέλεσμα της συνεχιζόμενης υποβάθμισης των φυσικών οικοσυστημάτων, εντείνονται με την πάροδο του χρόνου. Εξίσου σημαντικός, και μάλιστα άρρηκτα συνδεδεμένος με τις προαναφερθείσες προκλήσεις, αναδεικνύεται ο κρίσιμος περιβαλλοντικός ρόλος των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης. Η αποτελεσματική υιοθέτηση και εφαρμογή τους καθίσταται πλέον επιτακτική, προκειμένου να επιτευχθεί μια ουσιαστική μεταστροφή προς ένα βιώσιμο μέλλον.

Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου αποτελεί θεμελιώδη πυλώνα μέσω περιορισμού των ορυκτών καυσίμων, χτυπά τον πυρήνα της κλιματικής αλλαγής και θεμελιώνει τη βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση. Όταν η κατανάλωση ενέργειας περιορίζεται, ιδίως εκείνη που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, παρατηρείται ταυτόχρονη και

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

αναλογική μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, καθώς και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής και την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων που έχουν τεθεί από διεθνείς συμφωνίες, όπως η Συμφωνία του Παρισιού.

Πέραν της συμβολής τους στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, οι στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης περιορίζουν επίσης την ατμοσφαιρική ρύπανση. Μικρότερη παραγωγή ενέργειας μεταφράζεται αναλογικά σε λιγότερους άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους, όπως οξείδια του αζώτου και διοξείδιο του θείου, με άμεσο και ευεργετικό αποτέλεσμα τόσο για τον άνθρωπο όσο και για την κοινωνία εν γένει, καθώς επέρχεται βελτίωση της ποιότητας του αέρα και, κατ' επέκταση, της υγείας του ανθρώπου.

Η ορθολογική διαχείριση και η αποδοτική χρήση της ενέργειας συμβάλλουν αποφασιστικά στη διατήρηση των φυσικών πόρων, ενώ παράλληλα μειώνει την πίεση στα ευαίσθητα οικοσυστήματα, τα οποία δύνανται να επηρεάζονται σημαντικά είτε από την εξόρυξη είτε από τη μεταφορά και την επεξεργασία ενεργειακών πρώτων υλών.

### **Στρατηγικές Ενεργειακής Απόδοσης: Ένα Ευρύ Φάσμα Δράσεων σε Πολλά Επίπεδα**

Οι στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης μπορούν να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα δράσεων σε πολλά επίπεδα.

#### 1. Διεθνείς Δεσμεύσεις και Πλαίσια

Η Συμφωνία του Παρισιού (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC, 2015) στοχεύει στον περιορισμό της αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από τους δύο βαθμούς Κελσίου, με μελλοντική επιδίωξη να φτάσει τον ενάμιση βαθμό Κελσίου. Αυτό, με τη σειρά του, θα επιφέρει ταυτόχρονα άμεση μείωση των εκπομπών άνθρακα και την αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας στην κοινωνία και τη βιομηχανία.[35]

Στο ίδιο πλαίσιο εντάσσεται και η Ατζέντα του 2030 των Ηνωμένων Εθνών, με τους 17 Στόχους Βιώσιμης Ανάπτυξης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον Στόχο 7, που αφορά την

καθαρή, προσιτή και βιώσιμη ενέργεια. Επίσης, σημαντική αναφορά γίνεται στον Στόχο 9 για την προώθηση της βιομηχανίας, της καινοτομίας και των υποδομών για μια βιώσιμη εκβιομηχάνιση, καθώς και στον Στόχο 13, που επικεντρώνεται στη δράση για το κλίμα και τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Το κυριότερο εργαλείο για τη διαχείριση ενέργειας είναι το διεθνές πρότυπο ISO 50001: Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας – Απαιτήσεις με καθοδήγηση για χρήση (International Organization for Standardization – ISO 50001: Energy Management Systems). [36]

### 2. Εθνική Νομοθεσία και Ρυθμιστικό Πλαίσιο

Παγκοσμίως, οι κυβερνήσεις μετατρέπουν τις διεθνείς δεσμεύσεις σε συγκεκριμένες πολιτικές και κανονισμούς. Βασική προτεραιότητα είναι η θέσπιση ελάχιστων ενεργειακών αποδόσεων τόσο για εξοπλισμό όσο και για κτίρια. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω νομοθετικών πλαισίων που αποσκοπούν στην προώθηση της ενεργειακής απόδοσης και της βιωσιμότητας. Για παράδειγμα, η Οδηγία Ecodesign της ΕΕ (2009/125/EK) αποτελεί ένα πρωταρχικό εργαλείο για τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού για προϊόντα που καταναλώνουν ενέργεια, όπως οικιακές συσκευές, ηλεκτρονικά είδη και συστήματα θέρμανσης. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, οι δράσεις στο πλαίσιο της οδηγίας Ecodesign αναμένεται να συμβάλουν στην εξοικονόμηση περίπου 234 Mtoe πρωτογενούς ενέργειας έως το 2020 [37]. Πέρα από τη θέσπιση προτύπων, οι κυβερνήσεις προωθούν την ενεργειακή απόδοση και μέσω οικονομικών κινήτρων και επιδοτήσεων. Η υιοθέτηση αυτής της κουλτούρας ενισχύεται με την παροχή φορολογικών ελαφρύνσεων, χρηματοδοτήσεων ή επιδοτήσεων για επενδύσεις σε ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες και πρακτικές. Για την ποσοτικοποίηση της εξοικονόμησης ενέργειας που προκύπτει από αυτές τις πρωτοβουλίες, χρησιμοποιούνται μηχανισμοί μέτρησης και επαλήθευσης (Measurement and Verification - M&V). Αυτοί οι μηχανισμοί επιτρέπουν την ακριβή εκτίμηση της πραγματικής ενεργειακής εξοικονόμησης, παρέχοντας αξιόπιστα δεδομένα για την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων πολιτικών. [38]

### 3. Τεχνολογικές και Λειτουργικές Στρατηγικές

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Πρόκειται για τις πλέον άμεσες παρεμβάσεις τόσο σε βιομηχανικές διαδικασίες όσο και στον εξοπλισμό της επιχείρησης.

Σε επίπεδο εξοπλισμού, ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν τη βελτιστοποίηση λειτουργίας και την προληπτική συντήρηση.[8] [39]

Σε επίπεδο εγκατάστασης, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας, η συμπαραγωγή, η αυτοματοποίηση και η ηλιακή θέρμανση διεργασιών. [16] [40]

Σε εσωτερικό επίπεδο, η συστηματική διαχείριση μέσω του ISO 50001 βοηθά ένα εργοστάσιο στη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και στον επανασχεδιασμό των προϊόντων με σαφώς χαμηλότερη ενέργεια κατά την παραγωγή.

### 4. Στρατηγικές Υλικής Απόδοσης και Κυκλικής Οικονομίας

Βασικός στόχος είναι η μείωση της ζήτησης για νέα υλικά και η αξιοποίηση των υφιστάμενων πόρων.[41]

Σε επίπεδο βιομηχανιών, συγκεκριμένα παραδείγματα είναι η παραγωγή των ίδιων προϊόντων με τη χρήση λιγότερου υλικού, η λεγόμενη μέθοδος της υλικής απόδοσης. Επίσης, η μέθοδος της υλικής υποκατάστασης αφορά τη χρήση συγκεκριμένων υλικών, τα οποία διαθέτουν πολύ χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα έναντι των συμβατικών υλικών.[40]

Η κυκλική οικονομία περιλαμβάνει την επαναχρησιμοποίηση προϊόντων και υλικών σε όλο το φάσμα της ζωής τους, από την παραγωγή και την ανακύκλωση έως την επισκευή ("right to repair").[42]

### 2.3.2 Κρατικές Πολιτικές και Ρυθμιστικό Πλαίσιο

#### 2.3.2.1 Ευρωπαϊκή Νομοθεσία και Οδηγίες

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Δύο βασικές οδηγίες συνεργάζονται για να ενισχύσουν την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική συμμόρφωση στη βιομηχανία της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Πρόκειται για την Οδηγία 2012/27/ΕΕ, η οποία εστιάζει στους ενεργειακούς ελέγχους και τη διασφάλιση συστημάτων διαχείρισης ενέργειας, και την Οδηγία 2010/75/ΕΕ, η οποία ενσωματώνει τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (ΒΔΤ) για την ταυτόχρονη μείωση της ρύπανσης και της κατανάλωσης ενέργειας.[43][44]

### Πλαίσιο ESG και Net Zero

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εφαρμόσει την Ανακοίνωση COM(2023) 62, η οποία προωθεί επενδύσεις που βασίζονται αποκλειστικά στα κριτήρια ESG (Environmental, Social, Governance). Δίνεται έμφαση στην απανθρακοποίηση των επιχειρήσεων, δημιουργώντας πρότυπα διαφάνειας και ταξινόμησης.

Επιπλέον, η Σύσταση 2024/C 6792 ενθαρρύνει στρατηγικές κλιματικής ουδετερότητας, οι οποίες στοχεύουν στην ευθυγράμμιση των βιομηχανικών και επενδυτικών πρακτικών με τους βασικούς στόχους βιωσιμότητας.

#### 2.3.2.2 Χρηματοδοτικά Εργαλεία (π.χ., δάνεια, επιδοτήσεις, άδειες)

Υπάρχουν πολλά χρηματοδοτικά εργαλεία παγκοσμίως. Ένα από αυτά είναι το UNIDO, το οποίο υποστηρίζει πολλές βιομηχανίες σε διάφορες χώρες για να ενσωματώσουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και άλλες τεχνολογίες [45]. Ένα άλλο είναι το IFC, το οποίο χρηματοδοτεί τον ιδιωτικό τομέα για βιώσιμη ανάπτυξη, προωθώντας κατά κύριο λόγο τις πλέον αποδοτικές τεχνολογίες για τη βιομηχανία. Το GEF αποτελεί κορυφαίο χρηματοδοτικό μηχανισμό για την προστασία του περιβάλλοντος και την ενεργειακή βιωσιμότητα, και επενδύει σε τεχνολογίες που μειώνουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε εργοστάσια παραγωγής.[46] Η UNEP σε συνδυασμό με τα Ηνωμένα Έθνη, παρέχει εργαλεία για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, επιταχύνοντας έτσι την πρόσβαση σε βιώσιμη ενέργεια.

Το πρόγραμμα LIFE της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το οποίο αφορά το περιβάλλον και την καθαρή ενέργεια, χρηματοδοτεί κυρίως πιλοτικά βιομηχανικά έργα.[47] Παράλληλα, το Horizon υποστηρίζει την καινοτομία και την έρευνα, προωθεί την ανάπτυξη τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης και της ψηφιακής διαχείρισης (π.χ. Artificial Intelligence -AI για βελτιστοποίηση λειτουργίας). Τέλος, το Ταμείο Καινοτομίας είναι ένα από τα μεγαλύτερα προγράμματα που έχει η Ε.Ε. παγκοσμίως και επενδύει σε ενεργειακή απόδοση, ηλεκτροδότηση και χρήση καθαρών καυσίμων, ενισχύοντας τη βιομηχανία και την ενέργεια μέσω της καινοτομίας και της τεχνολογίας.

## 2.4 Οικονομικές Επιπτώσεις

### 2.4.1 Οικονομικές Επιπτώσεις της Ενεργειακής Απόδοσης

Οι βιομηχανίες, προκειμένου να αυξήσουν την ενεργειακή τους απόδοση, έχουν να αντιμετωπίσουν σημαντικά οικονομικά οφέλη αλλά και αρνητικές προκλήσεις. Στις θετικές οικονομικές επιπτώσεις συγκαταλέγονται: α) η μείωση του λειτουργικού κόστους και της ενεργειακής δαπάνης, η οποία μπορεί να επιφέρει ταχεία απόσβεση των επενδύσεων ( εντός δύο έως πέντε ετών, ανάλογα με την επένδυση), και β) η ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των επιχειρήσεων, καθώς προφυλάσσονται από διακυμάνσεις τιμών στα ορυκτά καύσιμα. [48][34]

Παράλληλα, υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας, γεγονός που με τη σειρά του συμβάλλει στην απασχόληση και, ειδικότερα, στο ΑΕΠ. Επιπλέον, η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης προσφέρει σημαντικά οφέλη στην κοινωνία, καθώς μειώνει το κόστος υποδομών και συμβάλλει στη σταθερότητα του ενεργειακού δικτύου. Τέλος, η ενισχυμένη παραγωγικότητα της βιομηχανίας προκύπτει από τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας των εργαζομένων, τη διαρκή συντήρηση και επέκταση του εξοπλισμού, καθώς και την αύξηση της διάρκειας ζωής του εξοπλισμού. [49]

Ένα πιθανό πρόβλημα που μπορεί να αντιμετωπίσει μία επιχείρηση είναι το μεγάλο αρχικό κόστος της επένδυσης, και αυτό καθιστά την επένδυση ένα σημαντικό εμπόδιο, ιδιαίτερα

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

για επιχειρήσεις μικρού ή μεσαίου μεγέθους. Εξίσου σημαντική πρόκληση για μία επιχείρηση είναι ότι πρέπει μερικές φορές να σταματήσει την παραγωγή της για να εγκαταστήσει τον καινούργιο εξοπλισμό, κάτι που συνεπάγεται απώλεια παραγωγής και χρημάτων. Παράλληλα, θα πρέπει να έχει ήδη εκπαιδευμένο προσωπικό για τον νέο εξοπλισμό. Τέλος, η τεχνολογία μέσω της αυτοματοποίησης, μπορεί να επιφέρει απώλεια σε βραχυπρόθεσμες θέσεις εργασίας, ακόμα και σε ενεργοβόρους τομείς.

### 2.4.2 Κοινωνικές Διαστάσεις και Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

Η δέσμευση των εργαζομένων και εφαρμογή μιας διοίκησης μετάβασης είναι ο καλύτερος οριζόντιος για την επιτυχία των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης στη βιομηχανία. Επίσης, είναι σημαντικό να εξεταστεί πόσο ευθυγραμμίζονται τα συστήματα απόκριση ζήτησης με την αποδοτικότητα των εργαζομένων, προκειμένου να διατηρηθεί η παραγωγικότητα και το κίνητρο. [6] [1]

Ας πάρουμε ως παράδειγμα τα κοινωνικά εμπόδια που αντιμετωπίζει η μετάβαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως είναι για έλλειψη ευαισθητοποίησης και οι ανησυχίες για τη βιοποικιλότητα του εδάφους. [6]

Ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, υπάρχουν τόσο θετικά όσο και αρνητικά σημεία. Τα θετικά περιλαμβάνουν τη μείωση των επιπέδων άνθρακα μέσω της ανάκτησης θερμότητας απορριμμάτων (WHR), τη δυνατότητα της βιομηχανίας να παράγει ενέργεια τοπικά (μειώνοντας την εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο) και την αποσυμφόρηση του δικτύου σε ώρες αιχμής. Από την αντίπερα όχθη τοποθετώντας ένα φωτοβολταϊκό σε ένα χωράφι, δεν μπορεί να καλλιεργηθεί το υπέδαφος λόγω έλλειψης φωτός με αποτέλεσμα την καταστροφή της τοπικής χλωρίδας. Τέλος, μέσα από τις οικολογικές οργανώσεις έχουν παρουσιαστεί αρκετές περιπτώσεις όπου οδικά πτηνά εισβάλλουν και τραυματίζονται από την ορμή των αιολικών πάρκων. [3]



## Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία Έρευνας

### 3.1 Εισαγωγή στη Μεθοδολογία

Η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία αποσκοπεί στην εις βάθος διερεύνηση των στρατηγικών βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης εντός του βιομηχανικού πεδίου, θεμελιώνεται σε μία συστηματική μεθοδολογία βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η επιλογή αυτής της προσέγγισης κρίθηκε απαραίτητη, καθώς επιτρέπει την εκτενή χαρτογράφηση του υφιστάμενου ακαδημαϊκού και ερευνητικού τοπίου, την ανάδειξη των κυρίαρχων τάσεων, καθώς και τον εντοπισμό των κενών που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε διαρθρώθηκε σε διακριτά στάδια, αρχής γενομένης από τον προσδιορισμό των κατάλληλων τεχνικών αναζήτησης, την αξιοποίηση υποστηρικτικών εργαλείων για την οργάνωση του υλικού, και την εφαρμογή αυστηρών κριτηρίων τόσο για την ένταξη όσο και για τον αποκλεισμό των πηγών, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα και η συνάφεια του τελικού σώματος της ανασκόπησης.

### 3.2 Μέθοδος Αναζήτησης Βιβλιογραφίας (Snowballing)

Η βασική μέθοδος αναζήτησης της βιβλιογραφίας που εφαρμόστηκε στην παρούσα έρευνα υπήρξε η τεχνική της χιονοστιβάδας (snowballing). Η προσέγγιση αυτή επιλέχθηκε διότι θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική για τον εντοπισμό σημαντικών και επιδραστικών δημοσιεύσεων εντός ενός συγκεκριμένου επιστημονικού πεδίου, επιτρέποντας την επέκταση του αρχικού συνόλου πηγών με βάση τις αναφορές που περιέχονται ή δέχονται οι ήδη εντοπισμένες μελέτες. [50] Αρχικώς, προσδιορίστηκε ένα μικρό σύνολο θεμελιωδών μελετών, οι οποίες είχαν αναγνωριστεί ως ιδιαίτερα σημαντικές για το θέμα της ενεργειακής απόδοσης στη βιομηχανία μέσω αρχικών, ευρύτερων αναζητήσεων σε επιστημονικές βάσεις δεδομένων. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκε μία διπλή διαδικασία χιονοστιβάδας: α) η αναζήτηση “προς τα πίσω” (backward snowballing), κατά την οποία εξετάστηκαν οι βιβλιογραφικές αναφορές που περιέχονταν στις ήδη εντοπισμένες μελέτες, επιτρέποντας τον εντοπισμό προγενέστερων εργασιών που επηρέασαν την “βάση” ή άλλες

σημαντικές πηγές., και β) η αναζήτηση “προς τα εμπρός” (forward snowballing), η οποία περιλάμβανε την διερεύνηση των μεταγενέστερων δημοσιεύσεων που επικαλούνται τις αρχικές ή τις πηγές που εντοπίστηκαν σταδιακά, ώστε να εντοπιστούν νεότερες εργασίες που βασίστηκαν στο αρχικό άρθρο. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε κυκλικά, διευρύνοντας συνεχώς το σύνολο των δυνητικά σχετικών πηγών, έως ότου παρατηρηθεί κορεσμός και οι νέες αναζητήσεις δεν απέδιδαν πλέον σημαντικά νέες ή διαφορετικές δημοσιεύσεις, σηματοδοτώντας ουσιαστικά την κάλυψη του πυρήνα της σχετικής βιβλιογραφίας.

### 3.3 Λέξεις Κλειδιά

Σαν μέθοδος αναζήτησης βιβλιογραφίας επιλέχθηκαν λέξεις κλειδιά οι οποίες οδήγησαν μέσω του Google Scholar σε εξατομικευμένες μελέτες που αφορούσαν θέματα όπως η ενέργεια, η βελτιστοποίηση, οι στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης, η βιομηχανία, η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), η βιομηχανία 4.0 και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things). Από τις πρώτες αναζητήσεις σχετικών άρθρων χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του snowballing που οδήγησε σε διεύρυνση της αναζήτησης και πολλαπλασιασμό των λέξεων κλειδιών, γεγονός που συνέβαλε στην εύρεση σχετικών άρθρων.

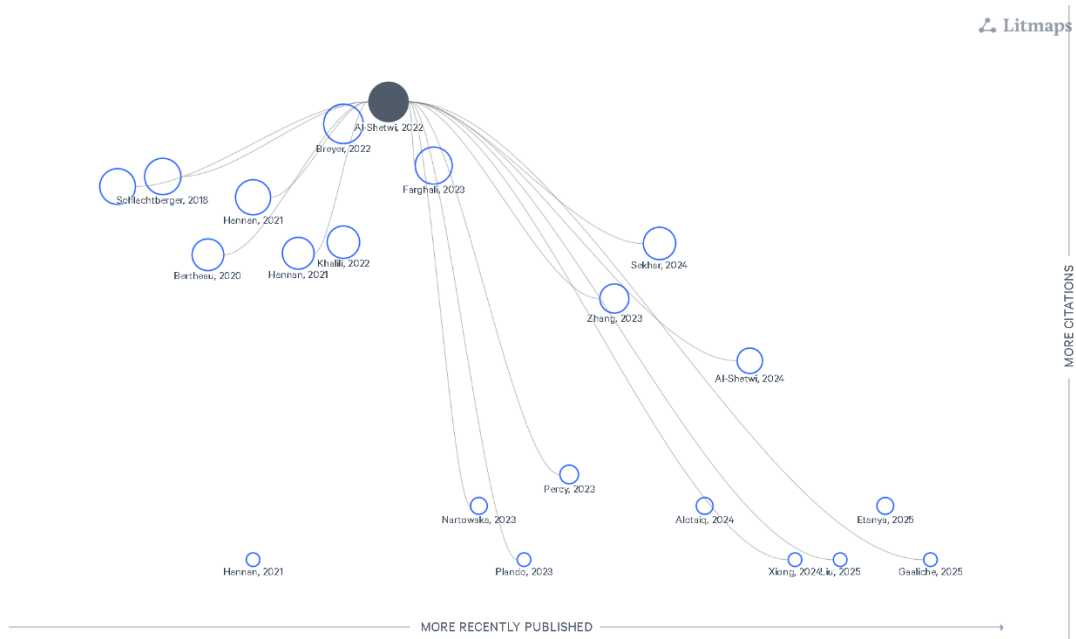
Χρησιμοποιώντας έξυπνες αναζητήσεις με τους όρους AND - OR - NOT δόθηκε η δυνατότητα στην εύρεση νέων άρθρων που αναφέρονται είτε και στις δύο λέξεις κλειδιά, είτε τουλάχιστον σε μία από τις δύο λέξεις κλειδιά, είτε αποκλείοντας τη μια λέξη κλειδί με την παράλληλη εμφάνιση της άλλης. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τα εισαγωγικά για την αναζήτηση ακριβών φράσεων εντός του κειμένου του άρθρου.

### 3.4 Εργαλεία Χαρτογράφησης και Οργάνωσης

Προς διευκόλυνση της διαχείρισης του ολόένα και διευρυνόμενου όγκου των εντοπισμένων πηγών, καθώς και για την αποτελεσματική χαρτογράφηση των σχέσεων μεταξύ τους, χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένα εργαλεία οργάνωσης και χαρτογράφησης της βιβλιογραφίας. Τα εργαλεία αυτά όπως το Zotero, το οποίο είναι ανοιχτού κώδικα, επέτρεψαν τη συστηματική καταγραφή των βασικών πληροφοριών κάθε δημοσίευσης

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

(συγγραφείς, τίτλος, έτος, πηγή), την ομαδοποίηση των μελετών βάσει θεματικών ενοτήτων ή μεθοδολογικών προσεγγίσεων, καθώς και την οπτικοποίηση των δικτύων συνεπιχειρηματικότητας ή αναφορών. Η αξιοποίηση τέτοιων εργαλείων θεωρήθηκε κεφαλαιώδους σημασίας, δεδομένου ότι συνέβαλε καθοριστικά στην καλύτερη κατανόηση της δομής του επιστημονικού πεδίου, την ταχύτερη ανάκληση και διασύνδεση των πληροφοριών, και εν τέλει στην ευκολότερη σύνθεση των ευρημάτων της βιβλιογραφικής ανασκόπησης.



Εικόνα 7 Δικτυωτό Διάγραμμα Βιβλιογραφίας

Στην εικόνα 7 βλέπουμε το δικτυωτό διάγραμμα βιβλιογραφίας, το άρθρο-οδηγός με το σκούρο χρώμα "Sustainable development of renewable energy integrated power sector Trends, environmental impacts, and recent challenges" έχει τον υψηλότερο αριθμό αναφορών. Ο κάθετος άξονας του σχήματος αναφέρει το πλήθος των αναφορών κάθε άρθρου, ενώ ο οριζόντιος άξονας προσδιορίζει τη χρονολογία δημοσίευσης του κάθε άρθρου. Η χρονολογία δημοσίευσης του άρθρου-οδηγού είναι το 2022. Αντίστοιχα, παρατηρούμε ότι τα αλλά σχετικά άρθρα εκτείνονται χρονικά από το 2018 έως το 2025 γεγονός που υποδηλώνει ότι το πεδίο συνεχίζει να εξελίσσεται μέσα στο χρόνο.

Το Litmaps χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθεί η εικόνα, το οποίο βοήθησε στην απεικόνιση της βιβλιογραφικής έρευνας. Σύμφωνα δε με το Google Scholar, γίνονται αναφορές σε 551 μεταγενέστερες μελέτες.

### 3.5 Κριτήρια Ένταξης Πηγών

Ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν τελικές πηγές που εντάχθηκαν στην ενδεδειγμένη ανάλυση βασίστηκε σε ένα προκαθορισμένο σύνολο πολλών κριτηρίων, τα οποία εφαρμόστηκαν με αρκετή συνέπεια σε όλες τις εν δυνάμει σχετικές δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν κατά την φάση της αναζήτησης άρθρων.

Τα κριτήρια αυτά είχαν ως στόχο τη διασφάλιση της συνάφειας, της επικαιρότητας καθώς και της επιστημονικής ποιότητας των πηγών. Οι δημοσιεύσεις έπρεπε να είναι εντός της τελευταίας πενταετίας. Αυτό το κριτήριο τέθηκε για να διασφαλίσει την επικαιρότητα των πληροφοριών που αντικατοπτρίζουν την τρέχουσα κατάσταση της έρευνας στον κλάδο. Επίσης, οι μελέτες έπρεπε να εστιάζουν άμεσα σε στρατηγικές, μεθόδους ή τεχνολογίες βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης και, γενικότερα, να έχουν θεματική συνάφεια. Το περιεχόμενο έπρεπε να σχετίζεται με εφαρμογές εντός του βιομηχανικού τομέα ή σε συγκεκριμένους, αντιπροσωπευτικούς βιομηχανικούς κλάδους, όπως η βιομηχανία χάλυβα, χημικών, τσιμέντου ή τροφίμων. Η δημοσίευση έπρεπε να αποτελεί πρωτογενή έρευνα, μελέτη περίπτωσης (case study), συστηματική ανασκόπηση ή άρθρο σε έγκριτο επιστημονικό περιοδικό με κριτές (peer-reviewed journal). Τέλος, η γλώσσα της δημοσίευσης έπρεπε να είναι είτε Ελληνικά είτε Αγγλικά, ώστε να είναι δυνατή η πλήρης κατανόηση και ανάλυση του περιεχομένου. Κατ' εξαίρεση ελάχιστες πηγές εκτός αυτού του χρονικού πλαισίου συμπεριλήφθηκαν λόγω της μεγάλης σημασίας τους για την κατανόηση του πεδίου ή της μοναδικότητας των δεδομένων που παρείχαν.

### 3.6 Κριτήρια Αποκλεισμού Πηγών

Παράλληλα με τα κριτήρια ένταξης, θεσπίστηκαν και εφαρμόστηκαν κριτήρια αποκλεισμού, προκειμένου να απορριφθούν πηγές οι οποίες, παρότι εντοπίστηκαν κατά τη

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

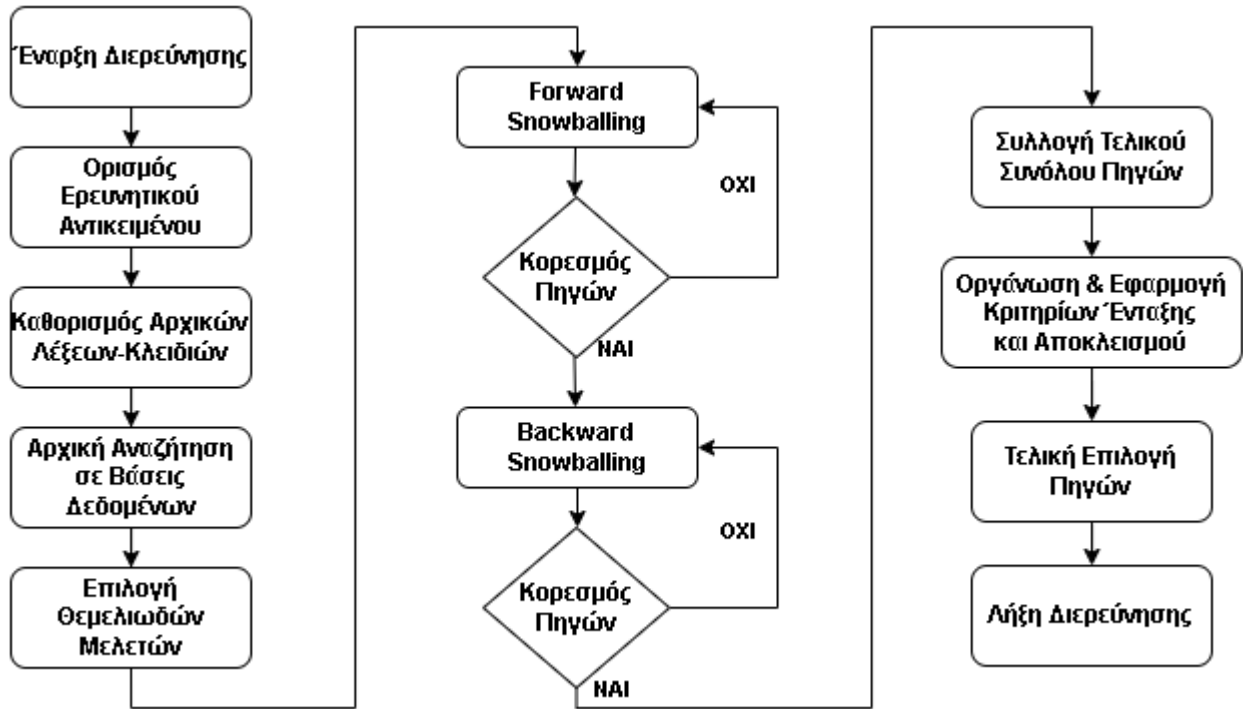
διαδικασία αναζήτησης, δεν πληρούσαν τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την εις βάθος μελέτη τους στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Οι λόγοι αποκλεισμού περιελάμβαναν, μεταξύ άλλων, τους εξής:

- Έλλειψη πλήρους πρόσβασης στο κείμενο της δημοσίευσης, καθιστώντας αδύνατη τη λεπτομερή ανάλυση του περιεχομένου της. Σε περίπτωση που δεν υπήρχε πρόσβαση και απαιτούνταν νέα πληρωμή για τη λήψη του άρθρου, αυτό αποκλειόταν.
- Η δημοσίευση να είναι αμιγώς θεωρητικής φύσης ή άρθρο γνώμης (opinion piece) χωρίς να παρουσιάζει εμπειρικά δεδομένα, μελέτες περίπτωσης ή συστηματική ανάλυση. Δόθηκε έμφαση σε πηγές με ερευνητικά αποτελέσματα.
- Το αντικείμενο της δημοσίευσης να μην σχετίζεται άμεσα ή επαρκώς με την ενεργειακή απόδοση στον βιομηχανικό τομέα, εστιάζοντας, για παράδειγμα, αποκλειστικά σε οικιακές εφαρμογές, μεταφορές ή τον τομέα των υπηρεσιών, που δεν είχαν σαφή σύνδεση με τη βιομηχανία.
- Η δημοσίευση να προέρχεται από πηγές χαμηλής ή αμφισβητούμενης επιστημονικής αξιοπιστίας, όπως, για παράδειγμα, αδημοσίευτες εργασίες χωρίς κριτική αξιολόγηση (non-peer-reviewed) ή ανεπιβεβαίωτες πηγές στο διαδίκτυο.

Η συνεπής εφαρμογή αυτών των κριτηρίων αποκλεισμού διασφάλισε ότι το τελικό σώμα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης αποτελείται από υψηλής ποιότητας, συναφείς και αξιόπιστες πηγές, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν την ερευνητική ανάλυση και τα συμπεράσματα της εργασίας.

### 3.7 Σύνοψη Διαδικασίας & Διάγραμμα Ροής



Εικόνα 8 Διάγραμμα Ροής Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα ροής της εικόνας 8 ξεκινάμε με την έναρξη της διερεύνησης της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, στη συνέχεια ορίζουμε το ερευνητικό αντικείμενο της διπλωματικής, και καθορίζουμε τις λέξεις-κλειδιά σε αρχικό επίπεδο. Έπειτα πηγαίνουμε σε βάσεις δεδομένων προκειμένου να κάνουμε την αρχική μας αναζήτηση και επιλέγουμε θεμελιώδεις και βασικές μελέτες. Πραγματοποιούμε backward και forward snowballing μέχρι να επέλθει κορεσμός. Τέλος, έχουμε τις τελικές πηγές, τις οργανώνουμε και εφαρμόζουμε κριτήρια για να τις εντάξουμε ή να τις αποκλείσουμε.

## Κεφάλαιο 4: Στρατηγικές και Μέθοδοι Βελτίωσης Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

### 4.1 Εισαγωγή

Η ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης στον σύγχρονο βιομηχανικό τομέα καθίσταται επιτακτική καθώς ο τομέας της βιομηχανίας διακρίνεται από τεράστια κατανάλωση ενέργειας και τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Οι παγκόσμιες προσπάθειες συγκλίνουν προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. [51]. Η βελτιστοποίηση της ενεργειακής χρήσης δύναται να επιφέρει πολλαπλασιαστικά οφέλη, όπως η μείωση του λειτουργικού κόστους και ο περιορισμός των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Στο κεφάλαιο αυτό θα εστιάσουμε στην παρουσίαση και ανάλυση των στρατηγικών και των μεθόδων που προκύπτουν από τις πηγές που επιλέχθηκαν σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στο κεφάλαιο 3. Εξετάζονται προσεγγίσεις από τη διαχείριση ζήτησης και τις τεχνολογικές αναβαθμίσεις, έως τις ψηφιακές τεχνολογίες και τα πρότυπα ενεργειακής διαχείρισης, ώστε να κατανοηθούν οι μηχανισμοί διαμόρφωσης αποτελεσματικών πολιτικών.



Εικόνα 9 Διαχωρισμός Βιβλιογραφίας

Όπως βλέπουμε στην εικόνα με βάση την ενδελεχή βιβλιογραφική ανασκόπηση από την οποία προέκυψε ότι το 53% των συνολικών μελετών και άρθρων εντάσσεται στο κομμάτι της θεωρίας ενώ το υπολειπόμενο 47% παρέχει μελέτες περίπτωσης. Η σχεδόν ισόποση κατανομή υπογραμμίζει την ισορροπία μεταξύ της θεωρητικής τεκμηρίωσης και της πρακτικής εφαρμογής στον εξεταζόμενο τομέα, αναδεικνύοντας την ανάγκη για συνεχή διάδραση μεταξύ θεωρίας και πράξης.

### 4.2 Κύριες Στρατηγικές και Μέθοδοι Ενεργειακής Απόδοσης

Η βιομηχανία στην προσπάθειά της να βελτιώσει την ενεργειακή της απόδοση, έχει αναπτύξει ποικίλες στρατηγικές που στοχεύουν στη μείωση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας και του κόστους. Η επιλογή των στρατηγικών επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο βιομηχανικός κλάδος, το μέγεθος της επιχείρησης, καθώς και το τεχνολογικό και ρυθμιστικό πλαίσιο. Η ομαδοποίηση αυτών των στρατηγικών σε τέσσερις κύριες κατηγορίες δεν είναι τυχαία αλλά προκύπτει από συστηματική ανασκόπηση και ανάλυση των 34 επιστημονικών μελετών, η οποία κατέδειξε ότι οι παρεμβάσεις ταξινομούνται με συνέπεια σε τέσσερα διακριτά επίπεδα παρέμβασης εντός της βιομηχανικής εγκατάστασης. Κάθε κατηγορία αντιπροσωπεύει μια διαφορετική φιλοσοφία προσέγγισης, από την προσαρμογή της κατανάλωσης στις συνθήκες της αγοράς έως τη ριζική αναδιάρθρωση των λειτουργιών μέσω της τεχνολογίας [1].

#### 4.2.1 Διαχείριση Ζήτησης (Demand-Side Management - DSM) & Απόκριση Ζήτησης (Demand Response - DR)

Η Διαχείριση Ζήτησης (DSM) και η Απόκριση Ζήτησης (DR) αναδεικνύονται ως κεντρικές στρατηγικές επειδή εστιάζουν στην τροποποίηση των καταναλωτικών προτύπων ενέργειας εκ μέρους των τελικών χρηστών, αντί της παραδοσιακής αύξησης της παραγωγής. Αυτές οι πρακτικές, σημαντικές για την εξισορρόπηση του δικτύου και τη μείωση φορτίων αιχμής, συμβάλλουν στην ενεργειακή απόδοση και τη μείωση κόστους, επιτρέποντας στις βιομηχανίες να προσαρμόζουν την κατανάλωση και να ενισχύουν τον ανταγωνισμό στις αγορές εξισορρόπησης [1],[34].



#### 4.2.1.1 Βασικές προσεγγίσεις

##### **Προγράμματα βάσει τιμής (Price-based DR):**

Στρατηγικές όπως η τιμολόγηση χρόνου χρήσης (ToU) και η δυναμική τιμολόγηση [1], παροτρύνουν τη μετατόπιση της κατανάλωσης σε περιόδους χαμηλότερης ζήτησης [34]. Εντούτοις, η υιοθέτησή τους προσκρούει συχνά στην έλλειψη υποδομών μέτρησης και στην περιορισμένη ευαισθητοποίηση, με την εργασία "A comprehensive review on industrial demand response strategies and applications" να σημειώνει ότι η δυναμική τιμολόγηση δεν υιοθετείται ευρέως, αποθαρρύνοντας τη συμμετοχή [1].

##### **Προγράμματα βάσει κινήτρων (Incentive-based DR):**

Μέσω προγραμμάτων όπως ο άμεσος έλεγχος φορτίου (DLC) και τα προγράμματα διακοπής/περιορισμού [34], οι καταναλωτές λαμβάνουν οικονομικά ανταλλάγματα για τη μείωση της κατανάλωσής τους. Η αποτελεσματικότητά τους, παρόλα αυτά, εξαρτάται από την προθυμία συμμετοχής [34].

#### 4.2.1.2 Απόδοση και Εφαρμογές

Βιομηχανίες όπως η τσιμεντοβιομηχανία και η παραγωγή αλουμινίου και χάλυβα, καθώς και τα κέντρα δεδομένων, παρουσιάζουν σημαντικό δυναμικό ευελιξίας για DR. [1][52] Η μελέτη "Demand response potential of industrial processes considering uncertain short-term electricity prices" [53] κατέδειξε, για παράδειγμα, ότι η ηλεκτρόλυση χαλκού μπορεί να επιτύχει υπερδιπλάσια εξοικονόμηση κόστους μέσω συμμετοχής στην ενδοημερήσια αγορά (ID), επισημαίνοντας τα άμεσα οικονομικά οφέλη, ιδίως για λιγότερο ευέλικτες διαδικασίες.

Η μείωση της ενεργειακής ανάγκης επιτυγχάνεται είτε με μετατόπιση ενεργοβόρων διεργασιών σε ώρες εκτός αιχμής είτε με προσωρινή διακοπή, υπό την προϋπόθεση ότι δεν

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

επηρεάζεται η ποιότητα ή την ασφάλεια. Ωστόσο, κατά την εφαρμογή αντιμετωπίζουμε διάφορες προκλήσεις, όπως η έλλειψη εξειδικευμένης γνώσης, η αβεβαιότητα για τα οικονομικά οφέλη και τα ρυθμιστικά εμπόδια. [1], [52], [34]. Η ενσωμάτωση Συστημάτων Αποθήκευσης Ενέργειας (Energy Storage Systems - ESS) και Παραγωγής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στον Χώρο Εγκατάστασης (On-site Renewable Generation - ORG) μπορεί, επιπρόσθετα, να ενισχύσει την ευελιξία, αν και η έλλειψη γνώσης για το δυναμικό ευελιξίας παραμένει ένας περιοριστικός παράγοντας [54]

Στην εν λόγω στρατηγική απόκρισης της ζήτησης παρουσιάζεται και μια πραγματική περίπτωση μελέτης σε μια μονάδα ηλεκτρόλυσης χαλκού στη Γερμανία [53], στην οποία η διεργασία ηλεκτρόλυσης του χαλκού καταναλώνει περίπου 15 μεγαβάτ (Megawatt – MW) ισχύος σε πλήρη λειτουργία. Η εν λόγω μονάδα με ελάχιστες τεχνικές παρεμβάσεις (όπως η υπέρβαση της ονομαστικής ισχύος κατά 10,5% και η δυνατότητα διακοψιμότητας του φορτίου), κατάφερε να βελτιστοποιήσει τη λειτουργία της τόσο στην Αγορά της Επόμενης Ημέρας (Day Ahead - DA) όσο και στην Ενδοημερήσια Αγορά (Intra Day - ID).

Για να γίνουν πιο κατανοητοί οι παραπάνω όροι, ας δούμε το ευρωπαϊκό μοντέλο οργάνωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Χρηματιστηρίου Ενέργειας, όπου γίνεται διαπραγμάτευση σε πραγματικό χρόνο το επονομαζόμενο Target Model. Αυτό περιλαμβάνει την Αγορά Επόμενης Ημέρας (DA), όπου οι συμμετέχοντες «κλείνουν» το βασικό ενεργειακό τους πρόγραμμα, και την Ενδοημερήσια Αγορά (ID), όπου διορθώνουν αποκλίσεις και ευθυγραμμίζονται με τις πραγματικές συνθήκες. Το μοντέλο συμπληρώνεται από την Αγορά Εξισορρόπησης, η οποία εξασφαλίζει σε πραγματικό χρόνο τη σταθερότητα του συστήματος, καλύπτοντας τελικές αποκλίσεις μεταξύ προσφοράς και ζήτησης.

Σύμφωνα με την ανάλυση της μελέτης [53], η συμμετοχή στην ID αγορά υπερδιπλασίασε τις ετήσιες εξοικονομήσεις: Συγκεκριμένα ο ετήσιος συντελεστής οικονομικού οφέλους έφθασε το 2,29 (σ.σ. συντελεστή σύγκρισης) σε σχέση με το σενάριο μόνο DA, εκμεταλλευόμενος τις συχνά χαμηλές αλλά και τις αρνητικές τιμές της ID αγοράς. Μέσα από το παράδειγμα γίνεται αντιληπτό πως με μια μικρή επένδυση στην ευελιξία του φορτίου της βιομηχανίας μπορεί να μετατραπεί σε πολλαπλάσιο όφελος, επιδεικνύοντας

τη δυναμική της στρατηγικής του DR & Price-Based σε συνδυασμό με τις αγορές του DA + ID.

## 4.2.2 Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις και Βελτιστοποίηση Διεργασιών

Η υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών και η βελτιστοποίηση των υφιστάμενων βιομηχανικών διεργασιών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο για την ενεργειακή απόδοση επειδή επιφέρουν πολλαπλά και ουσιαστικά οφέλη, τα οποία συνεισφέρουν σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της βιωσιμότητας των επιχειρήσεων [55]. Οι παρεμβάσεις αυτές που κυμαίνονται από αντικατάσταση εξοπλισμού έως ανασχεδίαση γραμμών παραγωγής, στοχεύουν στη μείωση της άσκοπης κατανάλωσης ενέργειας.

### 4.2.2.1 Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας (Waste Heat Recovery - WHR)

Ένα σημαντικό ποσοστό ενέργειας στις βιομηχανικές διεργασίες απορρίπτεται ως θερμότητα. Η τεχνολογία WHR, [16] η οποία περιλαμβάνει εναλλάκτες θερμότητας και συστήματα μηχανικής συμπίεσης ατμών, επιτρέπει την ανάκτηση αυτής της θερμότητας, μειώνοντας την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας και το λειτουργικό κόστος.

Η εφαρμογή συστημάτων WHR έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να οδηγήσει σε αξιόλογη εξοικονόμηση ενέργειας, με την απόδοση της επένδυσης (ROI) να επιτυγχάνεται συχνά σε διάστημα μικρότερο του έτους, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το ανθρακικό αποτύπωμα καθώς η απορριπτόμενη θερμότητα μετατρέπεται σε ωφέλιμη ενέργεια [16].

Η παραπάνω στρατηγική της Ανάκτησης Απορριπτόμενης Θερμότητας παρουσιάζεται σε μια μονάδα κλασματικής απόσταξης προπυλενίου-προπανίου, στην οποία η εγκατάσταση στον αναβραστήρα, ενός συμπιεστή μηχανικής επανασυμπίεσης ατμού – M.E.A. (Mechanical Vapour Recompression - MVR) [16], έδωσε τη δυνατότητα στην επαναχρησιμοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας του ατμού της κεφαλής. Με αυτήν την

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

καινοτόμο προσέγγιση μειώθηκαν οι θερμικές απαιτήσεις - τόσο του αναβραστήρα όσο και του συμπυκνωτή - σε ποσοστό >30%. Η εν λόγω μείωση της κατανάλωσης ατμού και ψύξης σε συνδυασμό με το χαμηλό λειτουργικό κόστος του συμπιεστή βοήθησε το έργο να έχει μικρότερο από 12 μήνες χρόνο απόσβεσης (Return of Investment - ROI). Τέλος βελτιώθηκε ο αυτόματος έλεγχος της παροχής αναρροής, με άμεσο αποτέλεσμα να βελτιωθεί η ποιότητα του προϊόντος και να μειώσει το ανθρακικό αποτύπωμα της διεργασίας.

### 4.2.2.2 Ενεργειακά Αποδοτικός Εξοπλισμός και Διεργασίες σε Ενεργοβόρες Βιομηχανίες

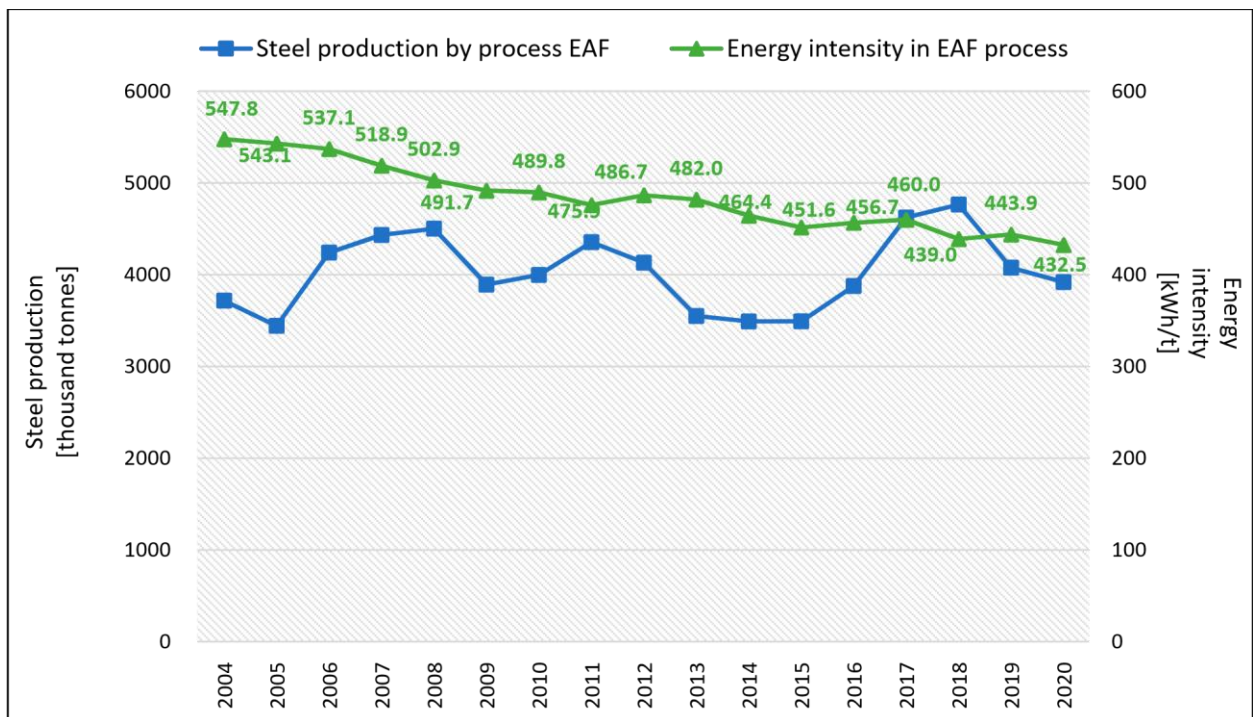
#### **Βιομηχανία Τσιμέντου**

Η μετάβαση στην ξηρή μέθοδο παραγωγής, η χρήση βιομηχανικών κυκλώνων χαμηλής πτώσης πίεσης, η αξιοποίηση απορριπτόμενης θερμότητας από τον κλίβανο και η εγκατάσταση οριζόντιων μύλων με κύλινδρο [20] (εξοικονόμηση έως 35-40% ενέργειας) αποτελούν παρεμβάσεις που μειώνουν δραστικά την ενεργειακή ένταση του κλάδου. Η εξοικονόμηση ενέργειας στην προετοιμασία πρώτων υλών μπορεί να κυμανθεί από 0,9 έως 11.9 kWh/t [20].

Η συγκεκριμένη στρατηγική του ενεργειακά αποδοτικού εξοπλισμού και των διεργασιών σε ενεργοβόρες βιομηχανίες, εμφανίζεται σε μια βιομηχανία τσιμέντου στην Ινδία [20], η οποία είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός τσιμέντου παγκοσμίως. Η βιομηχανία τσιμέντου εφάρμοσε καθολικά την ξηρή μέθοδο ως νέα διεργασία με πολυεπίπεδα προθερμαντήρια και προκλιβάνους. Επιτυγχάνοντας μία από τις χαμηλότερες καταναλώσεις θερμικής ενέργειας 3 Gigajoule (GJ) θερμική ενέργειας/τόνο klinker διεθνώς. Στις Ηνωμένες Πολιτείες το εργοστάσιο της Lafarge-Alpena Cement Plant. Αντικαταστάθηκε ο παλαιός ψύκτης κλίνκερ με ψύκτη εσχαρωτού τύπου και ενσωμάτωσε σύστημα ανάκτησης θερμότητας για την προθέρμανση του αέρα καύσης. Το αποτέλεσμα της παρέμβασης ήταν η εξοικονόμηση 0,19 – 0,30 GJ/t κλίνκερ, μείωση περίπου 3% στην κατανάλωση καυσίμου και παράλληλη μείωση 6,3-20,46 kg CO<sub>2</sub>/τόνο κλίνκερ.

### Βιομηχανία Χάλυβα

Η υιοθέτηση τεχνολογιών Δέσμευσης, χρήσης και αποθήκευσης Άνθρακα (CCUS), [19] η ανάπτυξη της μεταλλουργίας υδρογόνου ως εναλλακτικής οδού παραγωγής, και η βελτιωμένη ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων είναι στρατηγικές που μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές μειώσεις εκπομπών CO<sub>2</sub> (δυνητικά 818,3 εκατομμύρια τόνοι την περίοδο 2015-2030 στην Κίνα) και εξοικονόμηση ενέργειας (έως 24,55 Mtce ετησίως) [19]. Η πολωνική χαλυβουργία, για παράδειγμα, κατέγραψε μείωση 12,6% στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ του 2004 και 2020 χάρη σε επενδύσεις σε βιώσιμες τεχνολογίες [56].



Εικόνα 10 Electricity and Heat Demand in Steel Industry Technological Processes

Το διάγραμμα της εικόνας 10 παρουσιάζει την παραγωγή χάλυβα μέσω της διεργασίας ηλεκτρικού τόξου (EAF) και την αντίστοιχη ενεργειακή της ένταση για την περίοδο 2004-2020. Από την ανάλυση προκύπτει μια σαφής αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των δύο μεγεθών σε βάθος χρόνου: ενώ η παραγωγή χάλυβα παρουσιάζει σημαντικές

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

διακυμάνσεις, αντανακλώντας πιθανότατα ευρύτερους οικονομικούς κύκλους, η ενεργειακή ένταση ακολουθεί μια σταθερά πτωτική πορεία, μειωμένη κατά περίπου 21% στο σύνολο της εξεταζόμενης περιόδου (από 547.8 kWh/t το 2004 σε 432.5 kWh/t το 2020). Αξίζει να σχολιαστεί η περίοδος 2008-2009, όπου η απότομη πτώση της παραγωγής, απόρροια της παγκόσμιας οικονομικής ύφεσης, συμπίπτει με μια πρόσκαιρη αύξηση της ενεργειακής έντασης. Το φαινόμενο αυτό υποδηλώνει ότι η λειτουργία των μονάδων σε χαμηλότερο του βέλτιστου φορτίου ενδέχεται να οδηγεί σε μειωμένη ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, η γενική πτωτική τάση της ενεργειακής έντασης, ακόμη και σε περιόδους ανάκαμψης της παραγωγής (π.χ., 2016-2017) ή και νέας κάμψης (2018-2020), επιβεβαιώνει ότι οι τεχνολογικές βελτιώσεις και οι επενδύσεις σε αποδοτικότερο εξοπλισμό αποτελούν τον κυρίαρχο παράγοντα εξοικονόμησης ενέργειας, υπερκερνώντας τις επιδράσεις των διακυμάνσεων της παραγωγής. Η σταδιακή αυτή αποσύνδεση της κατανάλωσης ενέργειας από τον όγκο παραγωγής αποτελεί ισχυρή ένδειξη της ωρίμανσης και της στροφής του κλάδου προς πιο βιώσιμες πρακτικές. [56]

### 4.2.2.3 Βελτιστοποίηση Συντήρησης (Maintenance Optimization) για Ενεργειακή Απόδοση

Η κατάσταση του εξοπλισμού επηρεάζει άμεσα την ενεργειακή του απόδοση. [57] Η προληπτική συντήρηση, η οποία βασίζεται στην παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να αποτρέψει τη λειτουργία με μειωμένη απόδοση και ταυτόχρονα να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των μηχανημάτων.

Η αξιοποίηση δεδομένων από αισθητήρες του διαδικτύου των πραγμάτων (Internet of Things – IoT) και η εφαρμογή αλγορίθμων Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και Μηχανικής Μάθησης (ML) για την πρόγνωση πιθανών βλαβών και την βελτιστοποίηση των προγραμμάτων συντήρησης είναι καίριας σημασίας. Η εργασία "Maintenance optimization in industry 4.0" [58] υπογραμμίζει πως οι εξελίξεις στους αισθητήρες και τους αλγορίθμους AI/ML ενισχύουν τη βελτιστοποίηση της συντήρησης, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για την "υγεία" του συστήματος.

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Η έγκαιρη ανίχνευση φθοράς ή δυσλειτουργιών επιτρέπει την προγραμματισμένη συντήρηση, μειώνοντας τις απρόβλεπτες διακοπές λειτουργίας και διασφαλίζοντας ότι ο εξοπλισμός λειτουργεί στα βέλτιστα επίπεδα ενεργειακής απόδοσης [49].

### 4.2.3 Ψηφιακός Μετασχηματισμός και Τεχνολογίες Industry 4.0

Ο ψηφιακός μετασχηματισμός, ενσωματώνοντας τεχνολογίες όπως το IoT, η AI, τα Ψηφιακά Δίδυμα και η ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων, διαδραματίζει ολοένα και πιο κεντρικό ρόλο στην επιδίωξη ενεργειακής αποδοτικότητας, παρέχοντας πρωτοφανείς δυνατότητες για παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, μετατρέποντας τα εργοστάσια σε "έξυπνα εργοστάσια" [59]

#### 4.2.3.1 Εργαλεία και Τεχνικές

Στη συνέχεια αναλύονται τα βασικότερα εργαλεία και οι τεχνικές με τις οποίες εφαρμόζονται.

##### **Internet of Things (IoT):**

Η εγκατάσταση δικτύου αισθητήρων επιτρέπει τη συνεχή συλλογή δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας. Αποτελεί θεμελιώδες εργαλείο για τον εντοπισμό αναποτελεσματικότητας και τη λήψη διορθωτικών μέτρων όπως φαίνεται στο παράδειγμα παρακολούθησης κλιβάνου που μειώνει την ανθρώπινη παρέμβαση [59], [60].

##### **Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) και Μηχανική Μάθηση (ML)**

Αλγόριθμοι AI και ML αναλύουν δεδομένα IoT για πρόβλεψη κατανάλωσης, βελτιστοποίηση λειτουργίας μηχανημάτων και υποστήριξη προγνωστικής συντήρησης. Σύμφωνα με σχετικές μελέτες, "Leveraging AI for energy-efficient manufacturing systems Review and future prospectives" προτείνει το πλαίσιο EE-DT, ενώ η "Energy-efficient

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

scheduling of flexible job shops" επισημαίνει πως η ΑΙ βελτιώνει την επιλογή εργαλειομηχανών, οδηγώντας σε εξοικονόμηση ενέργειας [61] [39].

### **Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins)**

Η δημιουργία ψηφιακού αντιγράφου εγκατάστασης επιτρέπει προσομοίωση σεναρίων και αξιολόγηση αλλαγών στην ενεργειακή απόδοση χωρίς παρέμβαση στην παραγωγή και είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για τη δοκιμή νέων στρατηγικών [62] [63].

### **Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support Systems - DSS)**

Τα DSS που βασίζονται στην ΑΙ παρέχουν πληροφορίες και προτάσεις για τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση ενέργειας, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών [61].

#### 4.2.3.2 Μελέτη Περίπτωσης εφαρμογή Cyber-Physical Production System (CPPS) σε Ξηρό Δωμάτιο Παραγωγής Μπαταριών

Η στρατηγική που αφορά τον ψηφιακό μετασχηματισμό και τις τεχνολογίες Industry 4.0 παρουσιάζεται στο ερευνητικό κέντρο μπαταριών Battery LabFactory Braunschweig (BLB) [8] αναπτύχθηκε ένα Κυβερνο-φυσικό Σύστημα Παραγωγής (CPPS) για τη λειτουργία ενός ξηρού δωματίου (σ.σ. ειδικά κλιματιζόμενος χώρος για την προστασία των ευαίσθητων πρώτων υλών των κυψελών μπαταριών λιθίου από εξωτερικούς παράγοντες όπως η υγρασία) συναρμολόγησης κυψελών (εμβαδόν 169 m<sup>2</sup>, όγκος 507 m<sup>3</sup>). Μέσω του δικτύου IoT και των βιομηχανικών συσκευών Programmable Logic Controller (PLC) οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα (θερμοκρασίας, υγρασίας και κατανάλωσης) τα διακινούν μέσω του βιομηχανικού πρωτοκόλλου επικοινωνίας Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA). Στη συνέχεια τροφοδοτούν ένα ψηφιακό δίδυμο το οποίο με τη σειρά του εκτελεί προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο. Ακολουθεί η εφαρμογή ενός ΑΙ-βασισμένου μοντέλου πρόβλεψης το οποίο βελτιστοποιεί τη ροή μάζας αέρα, διατηρώντας το σημείο δρόσου στους -45° C και επιτυγχάνει από 20,22% έως 37,29% μείωση της τελικής ενεργειακής ζήτησης του συστήματος Heating



Ventilation Air Conditioning (HVAC) σε σχέση με τη συμβατή λειτουργία. Το αποτέλεσμα αποδεικνύει ότι ο ψηφιακός μετασχηματισμός Industry 4.0 μπορεί να προσφέρει άμεσα και μετρήσιμα οφέλη ενεργειακής αποδοτικότητας, τα οποία μπορούν να λειτουργήσουν και σε άλλα βιομηχανικά περιβάλλοντα υψηλών απαιτήσεων ελέγχου κλίματος.

#### **4.2.4 Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (Energy Management Systems - EnMS) και Πρότυπα**

Η υιοθέτηση δομημένων EnMS [64] και η συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα αποτελούν θεμελιώδεις προσεγγίσεις λόγω της συστηματικής βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης παρέχοντας πλαίσιο για καθορισμό στόχων και συνεχή πρόοδο στην εξοικονόμηση ενέργειας.

##### **4.2.4.1 ISO 50001**

Το διεθνές πρότυπο ISO 50001 [64] παρέχει ένα αναγνωρισμένο πλαίσιο για την ανάπτυξη και βελτίωση ενός συστήματος ενεργειακής διαχείρισης. Η εφαρμογή του, όπως αναφέρεται στην εργασία "Energy Management in Energy Intensive Industries - Recommended Technical & Managerial Actions and a Delphi" [64], βοηθά τις επιχειρήσεις να υιοθετήσουν μια συστηματική προσέγγιση για συνεχή βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης [64].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα επιτυχούς εφαρμογής του προτύπου ISO 50001 αποτελεί το χυτήριο αντλιών μία ενεργοβόρα βιομηχανία στην Emmaboda της Σουηδίας. [65] Μέσω στοχευμένου EnMS το οποίο λειτουργεί από το 1998, η εταιρεία εγκατέστησε μεγάλο αριθμού μετρητών ενέργειας (Extended Sub-metering), καθώς και συστήματα Variable Speed Drivers (VSD) και αποθήκευση θερμότητας σε γεωτρήσεις. Επιτυγχάνοντας μείωση της αιχμής ισχύος κατά 2 MW, ετήσια παραγωγή 35 kWh από ηλιακούς συλλέκτες και μείωση της ζήτησης θέρμανσης κατά 50% (2012-2015). Το έργο βραβεύθηκε από τον

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

κλαδικό σύνδεσμο χυτηρίων και επιβεβαιώνει ότι οι τεχνικές και διοικητικές δράσεις του κύκλου Plan Do Check Act (PDCA) είναι πλήρως εφαρμόσιμες στην πράξη.

### 4.2.4.2 Ενεργειακοί Έλεγχοι (Energy Audits)

Οι ενεργειακοί έλεγχοι αποτελούν ένα κρίσιμο εργαλείο γιατί εντοπίζουν μετρήσιμες ευκαιρίες εξοικονόμησης ενέργειας, κόστους και εκπομπών, επιτρέποντας στοχευμένες παρεμβάσεις με γρήγορη απόσβεση εντός μιας βιομηχανικής εγκατάστασης [66]. Μέσω της λεπτομερούς ανάλυσης των ενεργειακών ροών και της κατανάλωσης των διαφόρων συστημάτων (π.χ., φωτισμός, κινητήρες, συστήματα πεπιεσμένου αέρα, θέρμανση), οι έλεγχοι μπορούν να αποκαλύψουν σημαντικές δυνατότητες βελτίωσης. Η εργασία "Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency, economic, and environmental analysis" [66] παρουσιάζει μια μελέτη περίπτωσης όπου ένας ενεργειακός έλεγχος οδήγησε σε προτάσεις για βελτιώσεις με περίοδο απόσβεσης 1 έτους και 9 μηνών και μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 21 τόνους ετησίως.[66] Η ενσωμάτωση θερμικών συλλεκτών, για παράδειγμα, είχε ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση ενέργειας 50%. Η εφαρμογή ενός EnMS και οι τακτικοί ενεργειακοί έλεγχοι οδηγούν σε συστηματική βελτίωση, συνεχή παρακολούθηση και σε αλλαγή οργανωτικής κουλτούρας. Η συμμόρφωση με πρότυπα όπως το ISO 50001 μπορεί, επίσης, να ενισχύσει την εικόνα της επιχείρησης.

## 4.3 Συνδυασμός Μεθόδων για Βέλτιστα Αποτελέσματα

Η ανάλυση των επιμέρους στρατηγικών καταδεικνύει ότι, ενώ κάθε προσέγγιση προσφέρει οφέλη, η επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων συχνά προϋποθέτει τη συνδυαστική και ενοποιημένη εφαρμογή πολλαπλών παρεμβάσεων. Μια ολιστική θεώρηση, η οποία αναγνωρίζει τις συνέργειες μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και διαχειριστικών πρακτικών, είναι πιθανότερο να οδηγήσει σε βαθύτερες μειώσεις της ενεργειακής κατανάλωσης.

Για παράδειγμα, η αποτελεσματικότητα της Απόκρισης Ζήτησης (DR) ενισχύεται όταν συνδυάζεται με Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (ESS) και επιτόπια παραγωγή από

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

ΑΠΕ (RES - Renewable Energy Sources) καθώς αυτός ο συνδυασμός, όπως επισημαίνεται στην "A Survey of Commercial and Industrial Demand Response Flexibility with Energy Storage Systems and Renewable Energy" [54], αυξάνει την ευελιξία των βιομηχανιών[54]. Αντίστοιχα, ο ψηφιακός μετασχηματισμός και οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 λειτουργούν ως εργαλεία που υποστηρίζουν άλλες στρατηγικές: το IoT παρέχει δεδομένα για ενεργειακούς ελέγχους [67] και για την εκπαίδευση μοντέλων AI [5], ενώ το "Energy management and industry 4.0" αναπτύσσει πλαίσιο αξιολόγησης της ενσωμάτωσης τεχνολογιών. Η εφαρμογή ενός EnMS, όπως το ISO 50001, διευκολύνει την ενσωμάτωση αυτών των παρεμβάσεων, καθώς η διαχείριση της γνώσης είναι κρίσιμη για την πλήρη αξιοποίησή τους [68].



Εικόνα 11: Διάγραμμα Venn Στρατηγικών Ενεργειακής Απόδοσης

Το διάγραμμα Venn της Εικόνας 11 απεικονίζει τις θεμελιώδεις στρατηγικές για την επίτευξη ενεργειακής απόδοσης, αναδεικνύοντας τις μεταξύ τους συνέργειες και αλληλεπιδράσεις. Οι τέσσερις βασικοί πυλώνες που αντιπροσωπεύονται από κάθε κύκλο είναι η Διαχείριση και Απόκριση Ζήτησης, οι Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις, ο Ψηφιακός Μετασχηματισμός και τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης. Είναι σημαντικό να σημειωθεί η διάκριση μεταξύ Τεχνολογικών Αναβαθμίσεων και Ψηφιακού Μετασχηματισμού, παρόλο που στην πράξη οι δύο έννοιες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες, καθώς κάθε ψηφιακή λύση εμπεριέχει τεχνολογία και πολλές σύγχρονες τεχνολογικές

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

αναβαθμίσεις έχουν ψηφιακό χαρακτήρα. Ωστόσο, το διάγραμμα τις διαχωρίζει για λόγους αναλυτικής σαφήνειας: οι «Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις» μπορούν να θεωρηθούν ως παρεμβάσεις στο φυσικό εξοπλισμό (hardware), όπως η αντικατάσταση μηχανημάτων, ενώ ο «Ψηφιακός Μετασχηματισμός» εστιάζει στις άυλες τεχνολογίες λογισμικού, δεδομένων και δικτύων (software, data analytics, IoT).

Οι επικαλυπτόμενες περιοχές του διαγράμματος υποδεικνύουν τις συνέργειες μεταξύ αυτών των κατηγοριών:

1. Συνδυαστικές Παρεμβάσεις προκύπτουν από την τομή της Διαχείρισης και Απόκρισης Ζήτησης και των Τεχνολογικών Αναβαθμίσεων.
2. Στοχευμένες Βελτιώσεις είναι αποτέλεσμα της συνύπαρξης των Τεχνολογικών Αναβαθμίσεων και των Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης. Αυτό συμβαίνει όταν ένα Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης υποδεικνύει ποια συγκεκριμένη τεχνολογική αναβάθμιση (π.χ. σε ένα μηχάνημα) θα έχει το μέγιστο όφελος.
3. Έξυπνη Απόκριση Ζήτησης πηγάζει από την ένωση της Διαχείρισης και Απόκρισης Ζήτησης και του Ψηφιακού Μετασχηματισμού.
4. Έξυπνη Παρακολούθηση προκύπτει από τον συνδυασμό του Ψηφιακού Μετασχηματισμού και των Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης. Γεννάται από ένα Σύστημα Ενεργειακής Διαχείρισης (που θέτει τους κανόνες) με τον Ψηφιακό Μετασχηματισμό (που παρέχει τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο μέσω αισθητήρων).
5. Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις & Ψηφιακός Μετασχηματισμός Αυτή η τομή θα μπορούσε να ονομαστεί «Εξυπνος Εξοπλισμός» (Smart Hardware). Αντιπροσωπεύει τη σύντηξη του φυσικού εξοπλισμού (hardware) με την ευφυΐα του λογισμικού και των δεδομένων (software/IoT).
6. Στοχευμένες Βελτιώσεις & Διαχείριση και Απόκριση Ζήτησης Αυτή η συνέργεια θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως «Ευέλικτες Τεχνολογικές Επενδύσεις». Εδώ, οι στοχευμένες αναβαθμίσεις εξοπλισμού δεν γίνονται μόνο για γενική απόδοση, αλλά επιλέγονται στρατηγικά ώστε να προσφέρουν τη δυνατότητα ευέλικτης λειτουργίας

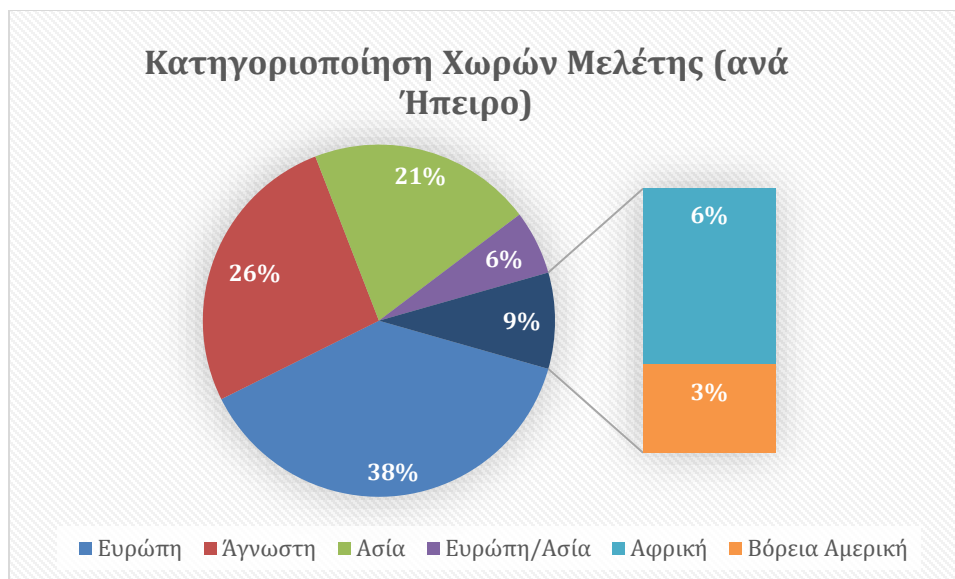
## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Στο κέντρο του διαγράμματος, όπου συναντώνται και οι τέσσερις έννοιες, επιτυγχάνεται η Ολιστική Βελτιστοποίηση. Αυτή αντιπροσωπεύει τη συνολική και ολοκληρωμένη βελτίωση όλων των λειτουργιών. Η Ολιστική Βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται όταν οι παρεμβάσεις στο hardware (Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις) ενσωματώνονται πλήρως με την ευφυΐα του software (Ψηφιακός Μετασχηματισμός), κάτω από την ομπρέλα ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης και με δυνατότητα ευέλικτης απόκρισης στη ζήτηση. Συνολικά, το διάγραμμα υπογραμμίζει ότι η μέγιστη ενεργειακή απόδοση δεν είναι απλώς το άθροισμα των μερών, αλλά το αποτέλεσμα της ολοκληρωμένης και έξυπνης ενοποίησής τους. Η συνεργασία αυτών των τομέων οδηγεί σε πιο αποτελεσματικές και καινοτόμες λύσεις, καθώς η κάθε στρατηγική μπορεί να ενισχύσει την απόδοση των υπολοίπων, δημιουργώντας ένα αποτέλεσμα μεγαλύτερο από το άθροισμα των επιμέρους στοιχείων.

Οι συνδυασμένες στρατηγικές Demand Response και κατανεμημένης παραγωγής (Distributed Energy Resources - DER) με φυσικό αέριο παρουσιάζονται σε ένα εργοστάσιο μηχανοκατασκευών της πόλης Περμ της Ρωσίας, στο οποίο εγκαταστάθηκε μονάδα συμπαραγωγής 4MW με κινητήρες φυσικού αερίου και εφαρμόστηκε ψηφιακή πλατφόρμα βέλτιστου προγραμματισμού που συγχρονίζει ωριαία τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, την κατανάλωση φυσικού αερίου και τη συμμετοχή στις αγορές ηλεκτρισμού. Ο συνδυασμός αυτού του DER με σχήμα DR επέτρεψε τη μετατόπιση των φορτίων εκτός ακριβών ωρών δικτύου και την αυτόματη κάλυψη μέρους της ζήτησης. Ως αποτέλεσμα η αγορά ηλεκτρισμού από το δίκτυο μειώθηκε κατά 35%, η μέση τιμή ηλεκτρικής ενέργειας κατά 17% και το συνολικό ενεργειακό κόστος κατά 18%, ισοδυναμώντας με ετήσια εξοικονόμηση άνω των 2,6 εκατομμυρίων δολαρίων. Παράλληλα μειώθηκε η συμφόρηση στο τοπικό δίκτυο και ενισχύθηκε η επιχειρησιακή ανθεκτικότητα μέσω δυνατότητας νησιδοποίησης (σ.σ. αποσύνδεση από το κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο). Η εν λόγω περίπτωση μελέτης αποδεικνύει ότι ακόμη και σε αγορές με χαμηλό κόστος ενέργειας, ο συνδυασμός DR + DER + Ψηφιακού Ελέγχου προσφέρει γρήγορη απόσβεση κεφαλαίου και σημαντική ευελιξία για τη βιομηχανία. [32]

#### 4.4 Συγκριτική Ανάλυση και Κριτικά Συμπεράσματα

Η αξιολόγηση των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης αποκαλύπτει μια περίπλοκη κατάσταση, όπου η αποτελεσματικότητα κάθε προσέγγισης επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά, το οικονομικό και ρυθμιστικό πλαίσιο, καθώς και τις ιδιαιτερότητες κάθε κλάδου.



Εικόνα 12 Γεωγραφική Προέλευση των Μελετών της Συστηματικής Ανασκόπησης

Η παραπάνω εικόνα παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των χωρών μελέτης, βάσει της συστηματικής ανασκόπησης που πραγματοποιήθηκε, ανά ήπειρο. Παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό, 38%, των πηγών αφορά μελέτες που διεξήχθησαν στην Ευρώπη. Ένα σημαντικό ποσοστό, 26%, αντιστοιχεί σε πηγές όπου η ήπειρος διεξαγωγής της μελέτης δεν αναφέρεται συγκεκριμένα ("Άγνωστη"). Η Ασία αντιπροσωπεύει το 21% των πηγών. Το υπόλοιπο 15% κατανέμεται μεταξύ της Αφρικής (6%), της Βόρειας Αμερικής (3%) και των περιπτώσεων όπου η μελέτη αφορά είτε την Ευρώπη είτε την Ασία (π.χ. Ρωσία) (6%).

#### Σύγκριση Απόδοσης:

Παρατηρείται ότι ορισμένες παρεμβάσεις, όπως η αντικατάσταση παλαιού και ενεργοβόρου εξοπλισμού με σύγχρονες, ενεργειακά αποδοτικές τεχνολογίες, μπορούν να επιφέρουν άμεσες και σημαντικές μειώσεις στην κατανάλωση ενέργειας. Για παράδειγμα, η μετάβαση από την υγρή στην ξηρή μέθοδο στην τσιμεντοβιομηχανία, ή η χρήση οριζόντιων μύλων με κυλίνδρους, μπορεί να εξοικονομήσει έως και 35-40% της ενέργειας [20]. Ομοίως, η εφαρμογή προγνωστικού μοντέλου ελέγχου σε συστήματα HVAC μπορεί να επιτύχει μείωση της ενεργειακής ζήτησης έως και 37,29% [8]. Στον τομέα της Απόκρισης Ζήτησης, η συμμετοχή σε ενδοημερήσιες αγορές, πέραν των αγορών επόμενης ημέρας, μπορεί να υπερδιπλασιάσει την εξοικονόμηση κόστους για συγκεκριμένες διεργασίες όπως η ηλεκτρόλυση χαλκού [53]. Ωστόσο, η απόδοση των προγραμμάτων DR εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ευελιξία της διεργασίας και την προθυμία συμμετοχής.

### **Επιρροή Πλαισίου:**

Το οικονομικό και πολιτικό πλαίσιο διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή και την επιτυχία των στρατηγικών ενεργειακής απόδοσης [69]. Σε χώρες με χαμηλό κόστος ενέργειας, όπως η Ρωσία με το φυσικό αέριο, η οικονομική βιωσιμότητα μεγάλης κλίμακας επενδύσεων σε ΑΠΕ μπορεί να είναι περιορισμένη βραχυπρόθεσμα, καθιστώντας τα Κατανεμημένα Ενεργειακά Συστήματα (DERs) που τροφοδοτούνται με φυσικό αέριο μια πιο άμεση λύση για την κάλυψη της ζήτησης και τη βελτίωση της ανθεκτικότητας [32]. Αντιθέτως, σε περιοχές με υψηλό κόστος ενέργειας ή ισχυρά περιβαλλοντικά κίνητρα, οι επενδύσεις σε ΑΠΕ και προηγμένες τεχνολογίες απόδοσης καθίστανται πιο ελκυστικές. Η κυβερνητική πολιτική, μέσω επιδοτήσεων (π.χ. για φωτοβολταϊκά σε στέγες), ρυθμιστικών προτύπων και πιλοτικών προγραμμάτων, είναι καθοριστική. Η επιτυχία των πιλοτικών προγραμμάτων πόλεων χαμηλών εκπομπών άνθρακα (LCCP) στην Κίνα, για παράδειγμα, εξαρτήθηκε από τα χαρακτηριστικά των εμπλεκόμενων επιχειρήσεων και την περιφερειακή τους θέση, υποδεικνύοντας ότι οι "one-size-fits-all" προσεγγίσεις είναι συχνά αναποτελεσματικές [70]. Η υποστήριξη για την ανάπτυξη τεχνολογιών όπως το υδρογόνο μέσω επιδοτήσεων, όπως παρατηρήθηκε στην Κίνα και τη Ρωσία, είναι απαραίτητη για την αρχική τους διείσδυση στην αγορά [71], [72].



### **Προκλήσεις και Εμπόδια:**

Ένα διαρκές θέμα που αναδύεται από πολλαπλές πηγές είναι η ύπαρξη σημαντικών εμποδίων στην ευρεία υιοθέτηση μέτρων ενεργειακής απόδοσης. Το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, η έλλειψη γνώσης και ευαισθητοποίησης τόσο σε επίπεδο διοίκησης όσο και σε επίπεδο εργατικού δυναμικού, τα οργανωτικά εμπόδια (π.χ., έλλειψη προτεραιότητας, ανεπαρκής εκπαίδευση), και οι ρυθμιστικοί φραγμοί (π.χ., περίπλοκες διαδικασίες αδειοδότησης, έλλειψη τυποποιημένων συμβάσεων για EPC) αποτελούν κοινές προκλήσεις [6], [73], [74]. Η αβεβαιότητα σχετικά με τις μελλοντικές πολιτικές, όπως διαπιστώθηκε στην ολλανδική έρευνα [6], μπορεί να αποθαρρύνει τις μακροπρόθεσμες επενδύσεις.

### **Γιατί κάποιες στρατηγικές είναι πιο επιτυχημένες:**

Η επιτυχία μιας στρατηγικής ενεργειακής απόδοσης δεν εξαρτάται μόνο από το πόσο καλά σχεδιασμένη είναι, αλλά και από την ευθυγράμμισή της με τους ευρύτερους επιχειρηματικούς στόχους, όπως η αύξηση της παραγωγικότητας, η βελτίωση της ποιότητας και η ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας [48]. Ένα υποστηρικτικό νομοθετικό πλαίσιο που παρέχει σαφή κίνητρα και δεν δημιουργεί ρυθμιστικά εμπόδια είναι επίσης καθοριστικό. Η τεχνολογική ωριμότητα και η ευκολία εφαρμογής μιας λύσης, καθώς και η δυνατότητά της να ενσωματωθεί σε υφιστάμενα συστήματα και να συνδυαστεί με άλλες στρατηγικές, αυξάνουν τις πιθανότητες επιτυχίας της. Για παράδειγμα, οι ψηφιακές τεχνολογίες είναι επιτυχημένες όχι μόνο αυτόνομα, αλλά και συνδυαστικά με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης άλλων παρεμβάσεων, όπως οι ενεργειακοί έλεγχοι ή τα προγράμματα DR. Η παρουσία εξειδικευμένου προσωπικού και η δέσμευση της διοίκησης είναι εξίσου σημαντικές, καθώς η ενεργειακή απόδοση απαιτεί συχνά μια αλλαγή στην οργανωτική κουλτούρα και στις καθημερινές πρακτικές [68].

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Στρατηγική/Τεχνολογία	Τομέας/Εφαρμογή	Εξοικονόμηση Ενέργειας (%) / Απόδοση	Μείωση Εκπομπών CO <sup>2</sup>	Βασική Πηγή
Ξηρή μέθοδος τσιμεντοβιομηχανίας	Τσιμέντο	35-40%	1,28–25,09 kgCO <sup>2</sup> /t	Review on Energy Conservation Cement Industry
Προγνωστικός έλεγχος HVAC	Παραγωγή Μπαταριών	20.22 έως 37.29%	0,63 kgCO <sup>2</sup> /kWh και 0,07 kgCO <sup>2</sup> /MJ	Energy efficiency of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems
DR με συμμετοχή στην ενδομερήσια αγορά	Ηλεκτρόλυση Χαλκού	6 έως 8 %		Demand response potential of industrial processes
Ηλιακοί συλλέκτες αέρα (Αλουμίνιο)	Θέρμανση αέρα	24,46% (θερμ. απόδοση)	~1370 t/έτος	Experimental investigation of enhanced thermal performance
Ενεργειακός Έλεγχος & Θερμικοί Συλλέκτες (Αίγυπτος)	Βιομηχανία	50% (από συλλέκτες), σύνολο 272.823 kWh/έτος	21 t/έτος (σύνολο ελέγχου)	Energy audit and management of an industrial site
LCCP Παρέμβαση (Κίνα)	Επιχειρήσεις	3,14% (μείωση έντασης ηλεκτρικής ενέργειας)	-	Does China's low-carbon city pilot intervention limit electricity
DERs με Φυσικό Αέριο	Βιομηχανική Κατασκευή	17%	-	Raising the Resilience of Industrial Manufacturers
Καθαρότερη Παραγωγή βάσει Δεδομένων	Βιομηχανίες Υψηλής Ενέργ. Έντασης	3%	-	Data-driven cleaner production strategy.
Βιομηχανική Απόκριση Ζήτησης (Γενικά)	Βαριές Βιομηχανίες	Ευελιξία 2% - 20,70%	Εκπομπές 6,65% - 16,5%	Demand-side management in industrial sector A review

Πίνακας 1: Ενδεικτική Απόδοση Επιλεγμένων Στρατηγικών Ενεργειακής Απόδοσης

## **Κεφάλαιο 5: Συγκριτική Αξιολόγηση Στρατηγικών Ενεργειακής Βελτίωσης**

### **5.1 Εισαγωγή**

Κατόπιν της αναλυτικής παρουσίασης των επιμέρους στρατηγικών για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης που πραγματοποιήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, στο παρόν κεφάλαιο επιχειρείται μια εις βάθος συγκριτική αξιολόγηση αυτών των μεθοδολογιών. Η ανάλυση αυτή είναι κρίσιμη. Ο απώτερος σκοπός είναι η ανάδειξη των σχετικών πλεονεκτημάτων, των εγγενών αδυναμιών και των βέλτιστων πλαισίων εφαρμογής για κάθε στρατηγική, ώστε να παραχθεί ένας τεκμηριωμένος οδηγός για τη λήψη αποφάσεων σε βιομηχανικό επίπεδο. Η δομή του κεφαλαίου ακολουθεί μια λογική αλληλουχία, ξεκινώντας από τον καθορισμό των κριτηρίων σύγκρισης και προχωρώντας στην εφαρμογή τους επί των εξεταζόμενων στρατηγικών, για να καταλήξει σε έναν συγκεντρωτικό πίνακα και στα συμπεράσματα που απορρέουν.

Πριν την ανάλυση όμως των στρατηγικών βελτίωσης, κρίνεται σκόπιμη η διατύπωση ενός λειτουργικού ορισμού της στρατηγικής ενεργειακής απόδοσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, μια βιομηχανική στρατηγική ενεργειακής απόδοσης ορίζεται ως «ένα συνεκτικό σύνολο πολιτικών εργαλείων, συστημάτων διαχείρισης και τεχνολογικών παρεμβάσεων, που στοχεύουν στη σημαντική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα παραγωγής, διατηρώντας ή βελτιώνοντας την παραγωγικότητα και την περιβαλλοντική απόδοση. Η αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας στρατηγικής εξαρτάται από την θεσμική εναρμόνιση, τη λειτουργία των μηχανισμών της αγοράς, το ρυθμιστικό πλαίσιο και τη συνεχή παρακολούθηση των δεικτών ενεργειακής απόδοσης. Η ενεργειακή στρατηγική δεν αποτελεί αποσπασματικό μέτρο, αλλά ένα πολυδιάστατο διατομεακό σύστημα παρεμβάσεων με στόχο την ολιστική βελτιστοποίηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της βιομηχανίας.

## 5.2 Καθορισμός Κριτηρίων Σύγκρισης

Η αντικειμενική και πολύπλευρη σύγκριση των στρατηγικών προϋποθέτει τον καθορισμό ενός συνόλου αυστηρών και μετρήσιμων κριτηρίων, τα οποία αντλούνται τόσο από τη θεωρητική βιβλιογραφία όσο και από τις πρακτικές προκλήσεις που καταγράφονται. Τα κριτήρια αυτά, τα οποία συντέθηκαν από τη συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας [75], διαμορφώθηκαν ως εξής, κατηγοριοποιημένα σε Τεχνικά/Ενεργειακά και Συμφραζόμενα/Πλαισιακά, ώστε να καλύπτουν όλες τις κρίσιμες διαστάσεις για την αξιολόγηση μιας στρατηγικής:

### 5.2.1 Τεχνικά/Ενεργειακά Κριτήρια:

**Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας:** Ποσοτικοποιεί την άμεση επίδραση της στρατηγικής στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας (π.χ. kWh/t προϊόντος).

**Χρόνος Απόσβεσης (Payback Period):** Ο εκτιμώμενος χρόνος που απαιτείται για την ανάκτηση της αρχικής επένδυσης, με μικρότερους χρόνους να υποδηλώνουν μεγαλύτερη οικονομική ελκυστικότητα.

**Επενδυτικό Κόστος (Capital Expenditure - CAPEX):** Το αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος που απαιτείται για την υλοποίηση της στρατηγικής.

**Λειτουργικό Κόστος (Operational Expenditure - OPEX):** Τα επαναλαμβανόμενα κόστη που σχετίζονται με τη λειτουργία και συντήρηση της λύσης.

**Δυσκολία Εφαρμογής (Τεχνική Πολυπλοκότητα):** Αξιολογεί τον βαθμό δυσκολίας στην ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στα υφιστάμενα βιομηχανικά συστήματα και την πολυπλοκότητα των απαιτούμενων αλλαγών.

**Τεχνολογική Ετοιμότητα (Technology Readiness Level - TRL):** Εκτιμά το επίπεδο ωριμότητας της τεχνολογίας, από βασική έρευνα (TRL 1) έως πλήρως δοκιμασμένο σύστημα (TRL 9).

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

**Μείωση Εκπομπών CO<sup>2</sup>:** Η άμεση επίδραση της στρατηγικής στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (π.χ. CO<sup>2</sup>/t προϊόντος), τονίζοντας την "απόδοση άνθρακα".

**Εφαρμοσιμότητα σε Άλλους Τομείς (Στρατηγική Ευελιξία):** Η προσαρμοστικότητα της κάθε στρατηγικής σε διαφορετικούς βιομηχανικούς κλάδους και διεργασίες (π.χ. χαλυβουργία, τσιμέντο, χημική βιομηχανία).

**Απαιτούμενος Χρόνος Διακοπής (Downtime):** Ο χρόνος που απαιτείται για την εγκατάσταση ή την υλοποίηση της στρατηγικής, κατά τη διάρκεια του οποίου οι λειτουργίες της μονάδας ενδέχεται να διακοπούν.

### 5.2.2 Συμφραζόμενα/Πλαισιακά Κριτήρια:

**Πλαίσιο Χώρας/Περιβάλλοντος Αγοράς:** Αναφέρεται στους ειδικούς παράγοντες που σχετίζονται με τη γεωγραφική τοποθεσία, τις τοπικές ρυθμίσεις και την ωριμότητα της αγοράς ενέργειας (π.χ. ύπαρξη ευέλικτων τιμολογίων).

**Κλίμα (Εταιρικό) & Κουλτούρα (Οργανωσιακή):** Αξιολογεί το βαθμό στον οποίο η εταιρική κουλτούρα είναι δεκτική σε αλλαγές και καινοτομίες, καθώς και την προθυμία της να υιοθετήσει βιώσιμες πρακτικές.

**Πολιτική Στήριξη/Ρυθμιστικό Πλαίσιο:** Το επίπεδο της κρατικής ή περιφερειακής υποστήριξης μέσω επιδοτήσεων, φορολογικών κινήτρων ή ρυθμιστικών υποχρεώσεων.

**Επαναληψιμότητα/Επεκτασιμότητα:** Η δυνατότητα εφαρμογής της στρατηγικής σε πολλαπλές εγκαταστάσεις ή σε μεγαλύτερη κλίμακα εντός της ίδιας βιομηχανίας.

**Ανάγκη Εκπαίδευσης & Εξειδίκευσης:** Ο βαθμός στον οποίο απαιτείται εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό ή πρόσθετη εκπαίδευση για την επιτυχή υλοποίηση και λειτουργία της στρατηγικής.

**Εμπόδια Εφαρμογής (Γενικά):** Λοιποί παράγοντες που μπορεί να δυσχεράνουν την υλοποίηση, όπως ζητήματα κυβερνοασφάλειας, έλλειψη διαθεσιμότητας δεδομένων ή προβλήματα ενσωμάτωσης με παλαιά συστήματα (Operational Technology).

Κατηγορία Κριτηρίου	Μέσος Όρος Score
Περιβαλλοντικό	2.65
Τεχνικό	2.53
Οικονομικό	2.37
Πλαισιακό	2.36
Κοινωνικό	2.00

*Σημείωση: Οι μέσοι όροι προέκυψαν από μετα-ανάλυση των 34 μελετών, όπου αξιολογήθηκε η έμφαση που δόθηκε σε κάθε κατηγορία κριτηρίων σε κλίμακα 1-3 (Χαμηλή, Μεσαία, Υψηλή).*

Παρατηρήσεις:

Τα "Περιβαλλοντικά" και "Τεχνικά" κριτήρια εμφανίζουν τους υψηλότερους μέσους όρους, υποδηλώνοντας ότι οι μελέτες τείνουν να αξιολογούν τις στρατηγικές κυρίως από τεχνικής και περιβαλλοντικής σκοπιάς.

Τα "Οικονομικά" και "Πλαισιακά" κριτήρια έχουν επίσης υψηλή βαθμολογία, αν και λίγο χαμηλότερη, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της οικονομικής βιωσιμότητας και του πλαισίου εφαρμογής.

Το "Κοινωνικό" κριτήριο έχει το χαμηλότερο μέσο όρο, υποδεικνύοντας ότι οι κοινωνικές επιπτώσεις της ενεργειακής βελτιστοποίησης δεν αναλύονται τόσο συστηματικά όσο άλλες πτυχές.

Κριτήριο	Πλήθος N/A
Μείωση Εκπομπών CO <sup>2</sup>	19
Κόστος Επένδυσης	18
Περίοδος Αποπληρωμής	16
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	12
Αύξηση Παραγωγικότητας	11

Κλίμα / Γεωγραφία	11
Κουλτούρα & Συμπεριφορές	10
Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	9
Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	8
Διαθεσιμότητα Πόρων / Τεχνογνωσίας	7
Τεχνική Σκοπιμότητα / Ωριμότητα	6
Ευελξία / Προσαρμοστικότητα	6
Επίπεδο Αυτοματισμού	6
Ποιότητα Προϊόντος	6
Επίπτωση στην Υγεία / Ασφάλεια	6
Κέρδη / Οικονομικό Όφελος	5
Αποδοτικότητα Πόρων	5
Υδατικό Αποτύπωμα	5
Χρόνος Υλοποίησης	4

Παρατηρήσεις:

Τα κριτήρια "Μείωση Εκπομπών CO<sup>2</sup>", "Κόστος Επένδυσης" και "Περίοδος Αποπληρωμής" έχουν το μεγαλύτερο πλήθος "N/A", γεγονός που υποδηλώνει ότι αυτές οι σημαντικές πληροφορίες συχνά δεν αναφέρονται ρητά στις μελέτες ή δεν είναι άμεσα υπολογίσιμες.

### 5.3 Συγκριτική Ανάλυση (Ανά Στρατηγική)

Διαχείριση και Απόκριση Ζήτησης (DSM/DR): Παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερα ελκυστικό προφίλ κυρίως λόγω του χαμηλότερου συγκριτικά αρχικού κεφαλαιουχικού κόστους (CAPEX: Χαμηλό). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ύπαρξη ευέλικτων τιμολογίων και την ωριμότητα της αγοράς (Πλαίσιο Χώρας/Περιβάλλοντος Αγοράς: Μεσαίο). Όπως αναφέρεται, οι περισσότερες μελέτες παραμένουν σε επίπεδο προσομοίωσης και ένα "κενό γνώσης" εμποδίζει τη μαζική υιοθέτηση από τις βιομηχανίες [1]. Το δυναμικό εξοικονόμησης (Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας: Μεσαίο προς Υψηλό, π.χ. 5-20%) είναι σημαντικό, αλλά η τεχνική εφαρμογή απαιτεί προηγμένες υποδομές επικοινωνίας και συχνά τη μεσολάβηση τρίτων φορέων

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

(aggregators), εγείροντας ζητήματα ασφάλειας και απορρήτου δεδομένων (Εμπόδια Εφαρμογής: Μεσαία, Δυσκολία Εφαρμογής: Μεσαία). Ο Χρόνος Απόσβεσης είναι συνήθως γρήγορος, ιδίως αν η αγορά είναι ώριμη. Η Τεχνολογική Ετοιμότητα (TRL) είναι μέτρια, καθώς η πλήρης ενσωμάτωση σε βιομηχανικό επίπεδο βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη.

Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις (π.χ. Ανάκτηση Απορριπτόμενης Θερμότητας - WHR): Οι παρεμβάσεις αυτού του τύπου, όπως η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας (WHR), προσφέρουν απτά και άμεσα μετρήσιμα οφέλη (Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας: Υψηλό, π.χ. 15-40%). Η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει πως τέτοιες επενδύσεις μπορούν να έχουν εξαιρετικά σύντομους χρόνους απόσβεσης (Χρόνος Απόσβεσης: Πολύ Γρήγορος, μερικές φορές κάτω του ενός έτους), και οδηγούν σε δραστικές μειώσεις του λειτουργικού κόστους [16]. Εντούτοις, το αρχικό κόστος (CAPEX: Υψηλό) μπορεί να είναι σημαντικό (π.χ. >100.000€ για ένα ολοκληρωμένο σύστημα), ενώ τεχνικές προκλήσεις όπως η διάβρωση του εξοπλισμού αποτελούν έναν υπαρκτό περιορισμό (Δυσκολία Εφαρμογής: Υψηλή). Η εφαρμογή τους είναι συχνά σημειακή (Εφαρμοσιμότητα σε Άλλους Τομείς: Χαμηλή) και δεν εγγυάται μια ολιστική βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς του εργοστασίου εάν δεν ενταχθεί σε ένα ευρύτερο σύστημα διαχείρισης. Η Τεχνολογική Ετοιμότητα (TRL) είναι υψηλή για ώριμες τεχνολογίες WHR (TRL 7-9). Η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι άμεση και σημαντική. Ο Απαιτούμενος Χρόνος Διακοπής μπορεί να είναι σημαντικός ανάλογα με την πολυπλοκότητα της εγκατάστασης.

Industry 4.0 / Ψηφιοποίηση (IoT, AI, Digital Twins): Εδώ εντοπίζεται το μεγαλύτερο δυνητικό όφελος (Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας: Πολύ Υψηλό, π.χ. >30%, CO<sub>2</sub> Μείωση: Πολύ Υψηλή), αλλά και οι σημαντικότερες προκλήσεις. Η αξιοποίηση τεχνολογιών όπως το IoT, το AI και τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, την προγνωστική συντήρηση και τη δυναμική βελτιστοποίηση των διεργασιών [5] [63]. Το δυναμικό εξοικονόμησης είναι τεράστιο, καθώς επιτρέπει τη μετάβαση από αντιδραστικές σε προγνωστικές στρατηγικές. Οι προκλήσεις, εντούτοις, είναι εξίσου σημαντικές, με την κυβερνοασφάλεια να τίθεται ως μείζον ζήτημα και την ανάγκη για εξειδικευμένο προσωπικό ικανό να διαχειριστεί πολύπλοκα συστήματα να αποτελεί έναν παράγοντα που δεν πρέπει να υποτιμηθεί



## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

(Ανάγκη Εκπαίδευσης: Πολύ Υψηλή, Εμπόδια Εφαρμογής: Πολύ Υψηλά). Το κόστος επένδυσης (CAPEX: Πολύ Υψηλό) είναι κατά κανόνα το υψηλότερο από όλες τις στρατηγικές, ενώ ο Χρόνος Απόσβεσης είναι μακρύτερος, αλλά το όφελος είναι ολιστικό. Η Τεχνολογική Ετοιμότητα (TRL) ποικίλλει, με πολλές εφαρμογές να βρίσκονται ακόμη σε πιλοτικό ή πρώιμο εμπορικό στάδιο (TRL 5-7). Η Στρατηγική Ευελιξία (Εφαρμοσιμότητα σε Άλλους Τομείς) είναι πολύ υψηλή, καθώς οι αρχές εφαρμογής είναι γενικές.

**Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS - π.χ., ISO 50001):** Η υιοθέτηση ενός επίσημου Συστήματος Ενεργειακής Διαχείρισης αποτελεί μια θεμελιώδη, στρατηγικής σημασίας, δράση. Το οικονομικό της προφίλ είναι συνήθως ευνοϊκό, καθώς το αρχικό κόστος (CAPEX: Χαμηλό, π.χ., διαχειριστικά έξοδα) είναι διαχειριστικό και όχι κεφαλαιουχικό, οδηγώντας σε υψηλή οικονομική απόδοση (Χρόνος Απόσβεσης: Γρήγορος). Το βασικό όφελος είναι η αλλαγή της οργανωσιακής κουλτούρας προς μια συνειδητή και αποδοτική χρήση της ενέργειας, ακολουθώντας τον κύκλο PDCA (Plan-Do-Check-Act) (Κλίμα/Κουλτούρα: Υψηλή επίδραση). Ωστόσο, από μόνη της, μια τέτοια στρατηγική έχει περιορισμένο δυναμικό εξοικονόμησης (Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας: Μεσαίο, π.χ. 3-10%, κυρίως συμπεριφορικό) αν δεν συνδυαστεί με συγκεκριμένες τεχνικές παρεμβάσεις. Η πολυπλοκότητά της έγκειται περισσότερο σε οργανωτικά και λιγότερο σε τεχνικά εμπόδια (Δυσκολία Εφαρμογής: Χαμηλή). Η Τεχνολογική Ετοιμότητα (TRL) δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη, καθώς πρόκειται για μεθοδολογία διαχείρισης. Η Πολιτική Στήριξη είναι συχνά υψηλή, με διαθέσιμα πρότυπα και επιδοτήσεις για την υιοθέτηση. Η Επαναληψιμότητα/Επεκτασιμότητα είναι πολύ υψηλή, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί οριζόντια σε κάθε οργανισμό.

Η κατανομή των μελετών στις διάφορες κατηγορίες στρατηγικών του Κεφαλαίου 4 αναδεικνύει τις επικρατέστερες προσεγγίσεις.

Κατηγορία Στρατηγικής	Πλήθος Μελετών	Ποσοστό (%)
Βελτιστοποίηση Διεργασιών & Περιβαλλοντικής Απόδοσης	15	44.12
Ενσωμάτωση ΑΠΕ & Υβριδικά Συστήματα	8	23.53

Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης & Παρακολούθησης	6	17.65
Ανάκτηση Θερμότητας & Αξιοποίηση Αποβλήτων	3	8.82
Προηγμένες Τεχνολογίες & Καινοτόμες Εφαρμογές	2	5.88

Παρατηρήσεις:

Η "Βελτιστοποίηση Διεργασιών & Περιβαλλοντικής Απόδοσης" είναι η σαφώς κυρίαρχη κατηγορία, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το ήμισυ των μελετών, υποδεικνύοντας την έμφαση στην εγγενή βελτίωση των παραγωγικών διαδικασιών.

Η "Ενσωμάτωση ΑΠΕ & Υβριδικά Συστήματα" και τα "Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης & Παρακολούθησης" ακολουθούν, αναδεικνύοντας το ενδιαφέρον για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την ανάγκη για συστηματική παρακολούθηση και διαχείριση της ενέργειας.

Οι κατηγορίες "Ανάκτηση Θερμότητας & Αξιοποίηση Αποβλήτων" και "Προηγμένες Τεχνολογίες & Καινοτόμες Εφαρμογές" εμφανίζουν μικρότερο αριθμό μελετών, αλλά υπογραμμίζουν την αναδυόμενη σημασία αυτών των τομέων.

## 5.4 Συγκεντρωτικός Πίνακας & Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Για τη διευκόλυνση της οπτικής σύγκρισης και την πληρέστερη κατανόηση, τα ευρήματα της ανάλυσης συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 5.1, ο οποίος ενσωματώνει τόσο τεχνικά/ενεργειακά όσο και συμφραζόμενα/πλαισιακά κριτήρια.

### 5.4.1 Μεθοδολογία Κατάρτισης του Πίνακα

Ακολουθήθηκε μια αυστηρή μεθοδολογία για την κατάρτιση του πίνακα DSM/DR, ξεκινώντας από τη **συλλογή πρωτογενών δεδομένων** μέσω συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης (Scopus, Web of Science, Google Scholar) με συγκεκριμένες λέξεις-κλειδιά και κριτήρια ένταξης (δημοσιεύσεις  $\geq 2015$  με ποσοτικά

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

αποτελέσματα). Επιλέχθηκαν και εξήχθησαν αριθμητικοί δείκτες επιτυχίας (π.χ., % εξοικονόμησης ενέργειας, χρόνος απόσβεσης, CAPEX/OPEX, TRL, μείωση CO<sub>2</sub>) και μεταδεδομένα (τομέας, χώρα). Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε και ελέγχθηκε η **βάση Excel** με ελέγχους εγκυρότητας για ακραίες τιμές, μετατροπές νομισμάτων και μονάδων, και λογικούς ελέγχους συνέπειας. Ακολούθησε ο **ορισμός αξιολογικών κριτηρίων και κατοφλίων**, μετατρέποντας ποσοτικά δεδομένα σε ποιοτικές κατηγορίες (Χαμηλό, Μεσαίο, Υψηλό) για κάθε κριτήριο, ενώ ορίστηκαν **πλαίσια** για μη αριθμητικά κριτήρια (π.χ., Δυσκολία Εφαρμογής). Το επόμενο βήμα ήταν η **κωδικοποίηση και κανονικοποίηση** των ποσοτικών και μη αριθμητικών κριτηρίων σε κλίμακα 1-3. Ακολούθησε η **στατιστική σύνοψη** με υπολογισμό μέσων όρων ανά στρατηγική και η μετατροπή των σκορ σε λεκτικές ετικέτες (1 → «Χαμηλό», 2 → «Μεσαίο», 3 → «Υψηλό»). Τέλος, η **παραγωγή του πίνακα DSM/DR** έγινε μέσω Excel, διασφαλίζοντας πλήρη ιχνηλασιμότητα, διαφάνεια και αναπαραγωγιμότητα. Η ίδια αυστηρή διαδικασία εφαρμόστηκε αναλογικά και για τις λοιπές στήλες («Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις», «Industry 4.0/Ψηφιοποίηση», «Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας»), έτσι ώστε ο Πίνακας 5.1 να παρέχει μια ισοζυγισμένη, συγκρίσιμη εικόνα των τεσσάρων βασικών στρατηγικών ενεργειακής βελτίωσης στη βιομηχανία.

Κριτήριο / Στρατηγική	DSM / DR	Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις	Industry 4.0 / Ψηφιοποίηση	Συστήματα Διαχείρισης (EnMS)
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Μεσαίο προς Υψηλό (5-20%)	Υψηλό (15-40%)	Πολύ Υψηλό (>30%)	Μεσαίο (3-10%, κυρίως συμπεριφορικό)
Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Γρήγορος	Πολύ Γρήγορος (<1 έτος σε πολλές περιπτώσεις)	Μεσαίος προς Μακρύς	Γρήγορος
Επενδυτικό Κόστος (CAPEX)	Χαμηλό	Υψηλό	Πολύ Υψηλό	Χαμηλό (διαχειριστικό)
Λειτουργικό Κόστος (OPEX)	Χαμηλό	Μεσαίο (συντήρηση)	Μεσαίο προς Υψηλό (λογισμικό, εξειδικευμένο προσωπικό)	Χαμηλό (συντήρηση συστήματος)
Δυσκολία Εφαρμογής	Μεσαία (Απαιτεί υποδομές, ωριμότητα αγοράς)	Υψηλή (Εξειδικευμένος εξοπλισμός, μηχανικές παρεμβάσεις)	Πολύ Υψηλή (AI, IoT, Data, Integration)	Χαμηλή (Οργανωτική, όχι τεχνική)
Τεχνολογική Ετοιμότητα (TRL)	Μεσαία (TRL 4-6, υπό ανάπτυξη)	Υψηλή (TRL 7-9 για ώριμες)	Μεσαία (TRL 5-7, αναδυόμενες)	Δεν εφαρμόζεται άμεσα (μεθοδολογία)

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

Μείωση Εκπομπών CO <sup>2</sup>	Μεσαία προς Υψηλή	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Μεσαία
Εφαρμοσιμότητα σε Άλλους Τομείς	Μεσαία (Περιορίζεται από διεργασία, αγορά)	Χαμηλή (Ειδική εφαρμογή ανά τεχνολογία)	Πολύ Υψηλή (Οριζόντια εφαρμογή)	Υψηλή (Οριζόντια εφαρμογή)
Απαιτούμενος Χρόνος Διακοπής	Χαμηλός προς Μεσαίο	Μεσαίος προς Υψηλός	Χαμηλός προς Μεσαίο	Αμελητέος (για την εγκατάσταση)
Πλαίσιο Χώρας/Περιβάλλοντος Αγοράς	Πολύ Σημαντικό (εξαρτάται από τιμολόγια)	Μεσαίο (διαθεσιμότητα εξοπλισμού)	Χαμηλό (παγκόσμιες τεχνολογίες)	Υψηλό (ρυθμιστική συμμόρφωση)
Κλίμα (Εταιρικό) & Κουλτούρα	Μεσαία (απαιτεί ευελιξία)	Χαμηλή (πιο τεχνικό)	Υψηλή (απαιτεί ψηφιακή ωριμότητα)	Πολύ Υψηλή (πυρήνας αλλαγής)
Πολιτική Στήριξη	Μεσαία (κίνητρα DR)	Μεσαία (επιδότηση τεχνολογιών)	Χαμηλή προς Μεσαία (αναδύμενες)	Υψηλή (πιστοποιήσεις, πρότυπα)
Επαναληψιμότητα/Επ εκτασιμότητα	Μεσαία	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Ανάγκη Εκπαίδευσης & Εξειδίκευσης	Μεσαία	Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Μεσαία
Εμπόδια Εφαρμογής	Μεσαία (δεδομένα, ασφάλεια, εμπιστοσύνη)	Μεσαία (τεχνική πολυπλοκότητα, διάβρωση)	Πολύ Υψηλά (κυβερνοασφάλεια, ενσωμάτωση, δεδομένα)	Χαμηλά (οργανωτική αντίσταση)

**Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός Πίνακας Αξιολόγησης Στρατηγικών Ενεργειακής Βελτίωσης**

Από την ανωτέρω συγκριτική αξιολόγηση, καθίσταται σαφές ότι δεν υφίσταται μία μοναδική στρατηγική που να είναι καθολικά ανώτερη. Η επιλογή της βέλτιστης οδού εξαρτάται άμεσα από την ωριμότητα, το οικονομικό υπόβαθρο, την οργανωσιακή κουλτούρα και τους στρατηγικούς στόχους της κάθε βιομηχανίας.

Ενώ οι **Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις** προσφέρουν απτά και άμεσα μετρήσιμα αποτελέσματα με πολύ γρήγορους χρόνους απόσβεσης και σημαντική μείωση CO<sup>2</sup>, συχνά συνοδεύονται από υψηλό αρχικό επενδυτικό κόστος και η εφαρμογή τους είναι ειδική. Αντιθέτως, τα **Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS)** προσφέρουν μια δομημένη, χαμηλού κόστους προσέγγιση με σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της οργανωσιακής κουλτούρας, αλλά το όφελός τους μεγιστοποιείται μόνο όταν συνδυάζονται με πιο προηγμένες τεχνικές παρεμβάσεις. Ένα βασικό συμπέρασμα είναι ότι η συντονισμένη διαχείριση, ακόμη και χωρίς ακριβές επενδύσεις σε εξοπλισμό, μπορεί να

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

προσφέρει γρήγορο payback και ουσιαστική μείωση εκπομπών CO<sup>2</sup>, ιδίως μέσω της βελτιστοποίησης υφιστάμενων διαδικασιών και της αλλαγής συμπεριφορών.

Οι λύσεις **Industry 4.0/Ψηφιοποίηση**, αν και κεφαλαιουχικά εντατικές και με υψηλή τεχνική πολυπλοκότητα, αναδεικνύονται ως ο κορμός για μια πραγματικά έξυπνη και βιώσιμη βιομηχανία, προσφέροντας όχι απλώς εξοικονόμηση, αλλά και ένα ριζικό μετασχηματισμό του τρόπου λειτουργίας, με πολύ υψηλό δυναμικό εξοικονόμησης και ευελιξία εφαρμογής. Τέλος, η **Διαχείριση και Απόκριση Ζήτησης (DSM/DR)** προσφέρει ευκαιρίες για μείωση του λειτουργικού κόστους με χαμηλό CAPEX, αλλά η εφαρμογή της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εξωτερικό ρυθμιστικό και αγοραίο περιβάλλον.

Η βέλτιστη προσέγγιση, επομένως, φαίνεται να έγκειται σε έναν **υβριδικό, προσαρμοσμένο συνδυασμό** αυτών των στρατηγικών. Ξεκινώντας με την υιοθέτηση ενός ισχυρού EnMS ως βάση για οργανωτική αλλαγή, προχωρώντας σε στοχευμένες τεχνολογικές αναβαθμίσεις με γρήγορο payback, και σταδιακά ενσωματώνοντας λύσεις Industry 4.0 για ολιστική βελτιστοποίηση και μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα. Αυτός ο συνδυασμός θα αποτελέσει και το αντικείμενο των τελικών συμπερασμάτων της παρούσας εργασίας.

## **Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Επεκτάσεις**

### **6.1 Εισαγωγή**

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αναλαμβάνοντας την επισταμένη διερεύνηση των σύγχρονων στρατηγικών βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης στον βιομηχανικό τομέα, επιχείρησε την ανάδειξη των σχετικών πλεονεκτημάτων, των εγγενών αδυναμιών και των βέλτιστων πλαισίων εφαρμογής για κάθε προσέγγιση, προσβλέποντας στην παροχή ενός τεκμηριωμένου οδηγού για τη λήψη αποφάσεων. Εντός του παρόντος κεφαλαίου, συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της έρευνας, αναλύεται η συνεισφορά της μελέτης, σκιαγραφούνται οι εντοπισμένοι περιορισμοί, ενώ παράλληλα προτείνονται συγκεκριμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στον τομέα της ενεργειακής βελτιστοποίησης εντός της βιομηχανίας.

### **6.2 Βασικά Ευρήματα και Συμπεράσματα**

Μέσα από την αναλυτική παρουσίαση τεσσάρων κύριων κατηγοριών στρατηγικών ενεργειακής βελτίωσης, συγκεκριμένα της Διαχείρισης και Απόκρισης Ζήτησης (DSM/DR), των Τεχνολογικών Αναβαθμίσεων, των λύσεων Industry 4.0/Ψηφιοποίηση, καθώς και των Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS), επιτεύχθηκε μία συγκριτική αξιολόγηση. Η εν λόγω αξιολόγηση βασισμένη σε ένα συνεκτικό πλαίσιο 15 κριτηρίων, περιλαμβάνοντας τεχνικές, οικονομικές, περιβαλλοντικές και πλαισιακές παραμέτρους, κατέδειξε σαφώς ότι ουδεμία μεμονωμένη στρατηγική δύναται να χαρακτηριστεί καθολικά ανώτερη. Αντιθέτως, η βέλτιστη προσέγγιση συνίσταται σε έναν υβριδικό προσαρμοσμένο συνδυασμό, ο οποίος ανταποκρίνεται στις ειδικές συνθήκες και τους στρατηγικούς στόχους κάθε βιομηχανίας.

Οι επιτυχημένες στρατηγικές ενεργειακής απόδοσης σπανίως είναι μεμονωμένες τεχνολογικές παρεμβάσεις, αλλά συνήθως αποτελούν έναν συνδυασμό τεχνολογικής αναβάθμισης, της ψηφιακής διαχείρισης και υποστηρικτικών πολιτικών με την

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

αποτελεσματικότητα κάθε στρατηγικής να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χώρα και τον κλάδο.

Στην Ευρώπη βάσει μελετών σε χώρες όπως η Σουηδία, η Ιταλία, η Γερμανία και η Ελλάδα, οι πιο αποτελεσματικές στρατηγικές εστιάζουν στην ψηφιοποίηση και τη βελτιστοποίηση διαδικασιών που υποστηρίζονται από ισχυρά θεσμικά πλαίσια. Κυρίαρχη τάση αποτελεί η ενσωμάτωση ώριμων τεχνολογιών Industry 4.0, μερικές από αυτές είναι το IoT και τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EMS), ενώ προηγμένοι αλγόριθμοι ελέγχου σε συστήματα HVAC και πεπιεσμένου αέρα επιτυγχάνουν σημαντική εξοικονόμηση με χαμηλό κόστος. Παράλληλα, χρηματοοικονομικά εργαλεία όπως οι Συμβάσεις Ενεργειακής Απόδοσης (EPC) αποδεικνύονται αποτελεσματικά κυρίως σε χώρες με ανεπτυγμένο νομικό πλαίσιο και η ύπαρξη προτύπων όπως το ISO 50001 δρα καταλυτικά.

Αντιθέτως, στην Ασία παρατηρείται μια διττή προσέγγιση. Στην Κίνα προωθούνται κεντρικά καθοδηγούμενες πολιτικές, όπως το "Made in China 2025", που επιβάλλουν τη χρήση data-driven συστημάτων διαχείρισης ενέργειας σε ενεργοβόρες βιομηχανίες επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση 10-15%. Στο Ιράν οι μελέτες εστιάζουν σε εξειδικευμένες τεχνικές λύσεις όπως η χρήση μεθοδολογιών DEA και LCA για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής στον αγροτικό τομέα, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας με μηδενικό CAPEX.

Στην Αφρική μελέτες από την Τυνησία και την Αίγυπτο αναδεικνύουν την επιτυχία πρακτικών και δοκιμασμένων τεχνολογιών με γρήγορη απόσβεση. Για παράδειγμα, μια ολοκληρωμένη προσέγγιση σε βιομηχανία της Αιγύπτου, που συνδύαζε φωτοβολταϊκά, VSDs, LED και θερμομόνωση οδήγησε σε 25.4% συνολική εξοικονόμηση με χρόνο απόσβεσης κάτω των 3 ετών. Επίσης, απλές τεχνολογικές βελτιώσεις, όπως η αναβάθμιση ηλιακών συλλεκτών αέρα στην Τυνησία, απέφεραν αύξηση της απόδοσης κατά 24.46% καταδεικνύοντας την αξία αξιοποίησης των άφθονων φυσικών πόρων.

Παρά το κριτήριο της γεωγραφικής θέσης της βιομηχανίας, η ανάλυση ως προς τον βιομηχανικό κλάδο μπορεί να προσφέρει επιπρόσθετα συμπεράσματα. Συγκεκριμένα ορισμένες στρατηγικές όπως η ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας (WHR) με

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

δυνατότητα εξοικονόμησης 10-30% και απόσβεση κάτω του έτους, ενώ ο ενεργειακά ενήμερος προγραμματισμός παραγωγής και τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS) βασισμένα στο Industry 4.0 έχουν οριζόντια εφαρμογή στους περισσότερους κλάδους. Στις ενεργοβόρες βιομηχανίες όπως η χαλυβουργία δικαιολογούνται κεφαλαιουχικές παρεμβάσεις, όπως η μετάβαση στο πράσινο υδρογόνο ή η βελτιστοποίηση διεργασιών σε πραγματικό χρόνο. Η διαχείριση κτιρίων μέσα από τον έξυπνο έλεγχο των συστημάτων HVAC και τα υβριδικά συστήματα παραγωγής θερμότητας είναι ιδιαίτερα αποδοτική. Τέλος, στον αγροτικό τομέα όπου τα περιθώρια κέρδους είναι μικρά μεθοδολογίες ανάλυσης δεδομένων όπως η DEA και η LCA προσφέρουν σημαντική εξοικονόμηση χωρίς την ανάγκη για ακριβό εξοπλισμό.

Τα Συστήματα Ενεργειακής Διαχείρισης (EnMS) αναδείχθηκαν κύρια στρατηγική προσφέροντας υψηλή οικονομική απόδοση με χαμηλό κεφαλαιουχικό κόστος, καθώς η κύρια συνεισφορά τους έγκειται στη συστηματική προσέγγιση και τη μεταμόρφωση της οργανωσιακής κουλτούρας προς την ενεργειακή συνείδηση. Διαπιστώνεται πως μέσω της συντονισμένης διαχείρισης μπορεί να επιτευχθεί γρήγορος χρόνος απόσβεσης και ουσιαστική μείωση εκπομπών CO<sup>2</sup>. Οι Τεχνολογικές Αναβαθμίσεις παρόλο που απαιτούν υψηλό αρχικό κεφάλαιο, παρέχουν άμεσα και μετρήσιμα οφέλη με σημαντικό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας, όπως διαπιστώνεται στην ανάκτηση απορριπτόμενης θερμότητας και εντυπωσιακά γρήγορους χρόνους απόσβεσης. Επομένως η εφαρμοσιμότητά τους ενδέχεται να είναι περιορισμένη σε διάφορους τομείς δεδομένης της τεχνικής πολυπλοκότητας και της εξειδίκευσης που συχνά απαιτείται.

Οι λύσεις Industry 4.0 και Ψηφιοποίηση ενώ χαρακτηρίζονται από υψηλή κεφαλαιουχική ένταση και τεχνική πολυπλοκότητα, εμφανίζουν το μέγιστο δυναμικό για ολιστική εξοικονόμηση ενέργειας και δραστική μείωση εκπομπών CO<sup>2</sup>. Είναι σε θέση να επιφέρουν έναν ριζικό μετασχηματισμό των λειτουργιών μέσω δυναμικής βελτιστοποίησης και προγνωστικής συντήρησης, καθιστώντας αυτές τις λύσεις αναπόσπαστο μέρος της έξυπνης και βιώσιμης βιομηχανίας του μέλλοντος. Η ανάγκη για επένδυση σε εξειδικευμένο προσωπικό και στην κυβερνοασφάλεια εξακολουθούν να είναι τα τρωτά σημεία της βιομηχανίας. Τέλος η Διαχείριση και Απόκριση Ζήτησης (DSM/DR) προσφέρει τη δυνατότητα μείωσης του λειτουργικού κόστους με χαμηλό CAPEX , αλλά η



## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

αποτελεσματικότητά της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εξωτερικό ρυθμιστικό και γενικότερο περιβάλλον της αγοράς, όπως η ύπαρξη ευέλικτων τιμολογίων και προηγμένων υποδομών επικοινωνίας.

Επομένως γίνεται σαφές ότι η βέλτιστη προσέγγιση για την ενεργειακή βελτίωση στη βιομηχανία δεν είναι μονοδιάστατη. Αντιθέτως επιβάλλεται ένας υβριδικός συνδυασμός στρατηγικών, εκκινώντας από την εδραίωση ενός ισχυρού EnMS, προχωρώντας σε στοχευμένες τεχνολογικές αναβαθμίσεις με ταχεία απόδοση επένδυσης και ενσωματώνοντας σταδιακά τις ψηφιακές λύσεις του Industry 4.0, προς επίτευξη μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας και ανταγωνιστικότητας της βιομηχανίας.

### 6.3 Συνεισφορά της Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία προσφέρει μία σημαντική συνεισφορά, καθώς παρέχει μία ολοκληρωμένη και πολυδιάστατη συγκριτική αξιολόγηση των στρατηγικών ενεργειακής βελτίωσης. Μέσω της χρήσης ενός εκτενούς συνόλου 15 κριτηρίων, που καλύπτουν τεχνικές, οικονομικές και πλαισιακές παραμέτρους, αναδεικνύεται μια σφαιρικότερη οπτική συγκριτικά με υφιστάμενες μελέτες. Ο παραχθείς πίνακας αξιολόγησης και η ενδελεχής ανάλυση καθίστανται πρακτικό εργαλείο για τους βιομηχανικούς φορείς, διευκολύνοντας την τεκμηριωμένη επιλογή των κατάλληλων στρατηγικών βάσει των ειδικών συνθηκών τους. Επιπροσθέτως, υπογραμμίζεται η θεμελιώδης σημασία των Συστημάτων Ενεργειακής Διαχείρισης ως καταλύτη για την οργανωσιακή αλλαγή και την επίτευξη ενεργειακών στόχων με χαμηλό κόστος, αναδεικνύοντας τη διαχείριση ως εξίσου κρίσιμη με την τεχνολογία.

### 6.4 Περιορισμοί της Μελέτης

Παρά την επιστημονική αρτιότητα της μελέτης, αυτή υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Συγκεκριμένα, η ανάλυση βασίστηκε πρωτίστως σε βιβλιογραφική ανασκόπηση και ποιοτική/ημι-ποσοτική αξιολόγηση, δίχως να ενσωματώνονται

πρωτογενή εμπειρικά δεδομένα από πραγματικές βιομηχανικές εφαρμογές. Ένας σημαντικός περιορισμός που προέκυψε από την ίδια τη βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι η συχνή απουσία συγκεκριμένων ποσοτικών δεδομένων όπως το ακριβές κόστος επένδυσης ή η μείωση εκπομπών CO<sup>2</sup>, από τις αναλυόμενες μελέτες. Αυτό το «κενό δεδομένων» στην υπάρχουσα έρευνα κατέστησε την απευθείας ποσοτική σύγκριση ορισμένων πτυχών των στρατηγικών δυσχερή και υπογραμμίζει την ανάγκη για πιο ολοκληρωμένη καταγραφή των αποτελεσμάτων σε μελλοντικές έρευνες. Επιπλέον, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε σε γενικό βιομηχανικό πλαίσιο, ενώ οι ιδιαιτερότητες συγκεκριμένων κλάδων δεν εξετάστηκαν εις βάθος. Τέλος, η δυναμική φύση των τιμών ενέργειας και του ρυθμιστικού πλαισίου, παρότι αναγνωρίστηκε, δεν αναλύθηκε με δυναμικά μοντέλα. Αυτό θα μπορούσε να επηρεάσει την οικονομική βιωσιμότητα των στρατηγικών.

### 6.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Προς επέκταση της παρούσας εργασίας και αντιμετώπιση των εντοπισμένων περιορισμών, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

- Η εμπειρική επαλήθευση των ευρημάτων μέσω μελετών περίπτωσης σε πραγματικές βιομηχανικές μονάδες κρίνεται επιβεβλημένη, ώστε να ποσοτικοποιηθούν ακριβέστερα τα οφέλη και οι προκλήσεις κάθε στρατηγικής.
- Η ανάπτυξη πολυκριτηριακών μοντέλων λήψης αποφάσεων (π.χ., AHP, DEA), ενσωματώνοντας τα αναπτυχθέντα κριτήρια, θα μπορούσε να προσφέρει μία πιο ακριβή και ποσοτική σύγκριση των μεθοδολογιών.
- Εξειδικευμένη ανάλυση ανά βιομηχανικό κλάδο, λαμβάνοντας υπόψη τις ειδικές ενεργειακές ανάγκες και τις διαδικασίες τους, θα προσέδιδε μεγαλύτερη πρακτική αξία.

## Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

- Περαιτέρω διερεύνηση του ρόλου των Ψηφιακών Δίδυμων (Digital Twins) ως κεντρικών πλατφορμών για την ενσωμάτωση και βελτιστοποίηση όλων των ενεργειακών στρατηγικών θα ήταν εξαιρετικά ενδιαφέροντα.
- Τέλος, η ενσωμάτωση αναλύσεων κινδύνου και αβεβαιότητας (π.χ., διακυμάνσεις τιμών ενέργειας, αλλαγές ρυθμιστικού πλαισίου) στα μοντέλα αξιολόγησης θα ενίσχυε την στιβαρότητα των προτεινόμενων συστάσεων.

Εν κατακλείδι, η ενεργειακή βελτιστοποίηση στον βιομηχανικό τομέα συνιστά ένα πεδίο σύνθετο και δυναμικό. Η παρούσα εργασία έχει θέσει τις βάσεις για μία ολοκληρωμένη κατανόηση των διαθέσιμων στρατηγικών, αναδεικνύοντας την επιτακτική ανάγκη για μία συνδυαστική προσέγγιση, η οποία θα ενσωματώνει αποτελεσματικά την τεχνολογία, τη διαχείριση και την οργανωσιακή κουλτούρα, προς την επίτευξη των βιώσιμων στόχων του μέλλοντος.

## Βιβλιογραφία

- [1] C. Timplalexis, G.-F. Angelis, S. Zikos, S. Krinidis, D. Ioannidis, and D. Tzovaras, “A comprehensive review on industrial demand response strategies and applications,” Institution of Engineering and Technology eBooks, pp. 1–23, Jun. 2022, doi: 10.1049/pbpo215e\_ch1. Available: [https://doi.org/10.1049/pbpo215e\\_ch1](https://doi.org/10.1049/pbpo215e_ch1)
- [2] K. I. Ibekwe, A. A. Umoh, and Z. Q. S. Nwokediegwu, “ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRIAL SECTORS: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND POLICY MEASURES,” East African Scholars Journal of Engineering and Technology, vol. 5, no. 1, pp. 14–23, 2024, doi: 10.51594/estj.v5i1.742. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i1.742>
- [3] International Energy Agency, Global Energy Review 2025. Paris, France: IEA, 2025. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>
- [4] O. K. Akinsola, K. Onu, Y. Owoeye, Regulatory and Legal Challenges in the Energy Sector: How Corporate Governance Affects Compliance and Risk Management, Feb. 2025. (online). Available: [https://www.researchgate.net/publication/388659655\\_Regulatory\\_and\\_Legal\\_Challenges\\_in\\_the\\_Energy\\_Sector\\_How\\_Corporate\\_Governance\\_Affects\\_Compliance\\_and\\_Risk\\_Management](https://www.researchgate.net/publication/388659655_Regulatory_and_Legal_Challenges_in_the_Energy_Sector_How_Corporate_Governance_Affects_Compliance_and_Risk_Management)
- [5] M. M. K. F. Abadi, C. Liu, M. Zhang, Y. Hu, and Y. Xu, “Leveraging AI for energy-efficient manufacturing systems: Review and future perspectives,” Journal of Manufacturing Systems, vol. 78, pp. 153–177, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.jmsy.2024.11.017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.11.017>
- [6] L. Bremer, S. D. Nijs, and H. L. F. De Groot, “The energy efficiency gap and barriers to investments: Evidence from a firm survey in The Netherlands,” Energy Economics, vol. 133, p. 107498, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eneco.2024.107498. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024.107498>

[7] ABB “Energy Efficiency Playbook” (2022), ABB, The Industrial Energy Efficiency Playbook: 10 Actions Companies Can Take Right Now to Reduce Energy Costs and Carbon Emissions, Nov. 2022. (online). Available: <https://join.energyefficiencymovement.com/>

[8] M. Vogt, C. Buchholz, S. Thiede, and C. Herrmann, “Energy efficiency of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems in production environments through model-predictive control schemes: The case of battery production,” Journal of Cleaner Production, vol. 350, p. 131354, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131354. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131354>

[9] International Energy Agency (IEA), Παγκόσμια Ενεργειακή Προοπτική 2024 [World Energy Outlook 2024]. Paris, France: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>, 2024. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

[10] International Energy Agency (IEA), "Global Energy Review 2025," IEA, 2025. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025>

[11] K. J. Tu, “COVID-19 pandemic’s impact’s on China’s energy sector: a preliminary analysis’,” Columbia SIPA Center on Global Energy Policy, 2020. Available: [https://www.energypolicy.columbia.edu/wp-content/uploads/2020/06/Covid19ChineseEnergy\\_CGEP\\_Commentary\\_060920.pdf](https://www.energypolicy.columbia.edu/wp-content/uploads/2020/06/Covid19ChineseEnergy_CGEP_Commentary_060920.pdf)

[12] G. Erbach, "Understanding energy efficiency," European Parliament, European Parliamentary Research Service (EPRS), Oct. 2015. Report No. PE 568.361. (online). Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS\\_BRI\(2015\)568361\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS_BRI(2015)568361_EN.pdf)

[13] H. D. Saunders et al., “Energy efficiency: What has research delivered in the last 40 years?,” Annual Review of Environment and Resources, vol. 46, no. 1, pp. 135–165, Jul. 2021, doi: 10.1146/annurev-environ-012320-084937. Available: <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-084937>

[14] F. De Oliveira Neves, H. Ewbank, J. A. F. Roveda, A. Trianni, F. P. Marafão, and S. R. M. M. Roveda, "Economic and Production-Related Implications for Industrial Energy Efficiency: A Logistic Regression Analysis on Cross-Cutting Technologies," *Energies*, vol. 15, no. 4, p. 1382, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041382. Available: <https://doi.org/10.3390/en15041382>

[15] IEA, "Energy Efficiency 2024," IEA, Paris, 2024. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>

[16] A. Abbass, "Waste Heat Recovery: An Energy-Efficient and Sustainability Approach in Industry," *Journal of Sustainable Development Innovations.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–37, Jan. 2024, doi: 10.61552/jsi.2024.01.004. Available: <https://doi.org/10.61552/jsi.2024.01.004>

[17] IEA, Multiple Benefits of Energy Efficiency. Paris: IEA, 2025. (online). Διαθέσιμο: <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency>.

[18] Cutter Consortium, "Reducing Industrial CO2 Emissions with Energy-Efficiency Improvement," *Αυγ.* 2024. (online). Διαθέσιμο: <https://www.cutter.com/article/energy-efficiency-industrial-decarbonization>.

[19] J. Zhang, J. Shen, L. Xu, and Q. Zhang, "The CO2 emission reduction path towards carbon neutrality in the Chinese steel industry: A review," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 99, p. 107017, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.eiar.2022.107017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.107017>

[20] N. Sahoo, A. Kumar, and N. Samsher, "Review on energy conservation and emission reduction approaches for cement industry," *Environmental Development*, vol. 44, p. 100767, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.envdev.2022.100767. Available: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100767>

[21] Energy Star, "Energy Efficiency Reduces Industrial Carbon Emissions," (online). Διαθέσιμο:

[[https://www.energystar.gov/industrial\\_plants/decarbonizing\\_industry/energy\\_efficiency\\_reduces\\_industrial\\_carbon\\_emissions](https://www.energystar.gov/industrial_plants/decarbonizing_industry/energy_efficiency_reduces_industrial_carbon_emissions)]

[22] International Energy Agency (IEA), "World Energy Outlook 2024," IEA, Paris, 2024. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024>

[23] S. Ugarte, B. van der Ree, M. Voogt, W. Eichhammer, J. Ordonez, M. Reuter, B. Schlomann, P. Lloret, and R. Villarafila, "Energy efficiency for low-income households," European Parliament, Directorate General for Internal Policies, Policy Department A: Economic and Scientific Policy, Nov. 2016. (online). Available: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/595339/IPOL\\_STU\(2016\)5\\_95339\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2016/595339/IPOL_STU(2016)5_95339_EN.pdf)

[24] European Union, Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652. Official Journal of the European Union, 2023. Accessed: Jun. 21, 2025. (online). Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng>

[25] Energeiaki Metavasi Group, "Ενεργειακή Μετάβαση και δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στη Δυτική Μακεδονία," Energypress, Mar. 2025, (online). Available: <http://energypress.gr/news/energeiaki-metabasi-kai-dimioyrgia-neon-theseon-ergasias-sti-dytiki-makedonia>

[26] European Commission, "Energy poverty," (online). Available: [https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-poverty\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/markets-and-consumers/energy-consumers-and-prosumers/energy-poverty_en).

[27] S. Moles-Grueso, P. Bertoldi, and B. Boza-Kiss, "Energy Performance contracting in the EU – 2020-2021," JRC Publications Repository, 2023, doi: 10.2760/751957. Available: <https://doi.org/10.2760/751957>

[28] IEA, “Renewables 2023,” IEA, Paris, techreport, 2024. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>

[29] Renewables Grid Initiative, “2023 Annual Report,” Renewables Grid Initiative, techreport, 2023. (online). Available: [https://renewables-grid.eu/fileadmin/user\\_upload/Files\\_RGI/RGI\\_Publications/RGI\\_Annual\\_Report\\_2023\\_digital.pdf](https://renewables-grid.eu/fileadmin/user_upload/Files_RGI/RGI_Publications/RGI_Annual_Report_2023_digital.pdf)

[30] Energy Institute, KPMG, and Kearney, Statistical Review of World Energy, 73rd ed. Energy Institute, 2024. (online). Available: <https://www.energyinst.org/statistical-review>

[31] ABB, “Industrial Digital Transformation Playbook: A playbook for digitalization at scale,” ABB, techreport, 2023. (online). Available: <https://new.abb.com/docs/librariesprovider75/process-automation-digital/abb-industrial-digital-transformation-playbook.pdf>

[32] A. Dzyuba, I. Solovyeva, and A. Semikolenov, “Raising the Resilience of Industrial Manufacturers through Implementing Natural Gas-Fired Distributed Energy Resource Systems with Demand Response,” Sustainability, vol. 15, no. 10, p. 8241, May 2023, doi: 10.3390/su15108241. Available: <https://doi.org/10.3390/su15108241>

[33] S. Ma, Y. Zhang, J. Lv, S. Ren, H. Yang, and C. Wang, “Data-driven cleaner production strategy for energy-intensive manufacturing industries: Case studies from Southern and Northern China,” Advanced Engineering Informatics, vol. 53, p. 101684, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.aei.2022.101684. Available: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101684>

[34] D. Stanelyte, N. Radziukyniene, and V. Radziukynas, “Overview of Demand-Response Services: A Review,” Energies, vol. 15, no. 5, p. 1659, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15051659. Available: <https://doi.org/10.3390/en15051659>

[35] Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 2015. (online). Available: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement\\_publication.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf)



[36] United Nations, THE 17 GOALS | Sustainable Development. 2015. Accessed: Jul. 02, 2025. (online). Available: <https://sdgs.un.org/goals>

[37] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0125>, 2009. (online). Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32009L0125>

[38] “Measurement & Verification (M&V) services.” Available: <https://www.iesve.com/services/building-operation/measurement-verification>

[39] T. Ahmad et al., “Energetics Systems and artificial intelligence: Applications of industry 4.0,” Energy Reports, vol. 8, pp. 334–361, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.11.256. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.256>

[40] M. K. M. Handawy, Z. Driss, A. Khelifa, M. E. H. Attia, M. Abdelgaied, and K. Harby, “Experimental investigation of enhanced thermal performance of solar air collectors through optimized selection of manufacturing materials: Energy, exergy, economic, and environmental analysis,” Environmental Progress & Sustainable Energy, Nov. 2024, doi: 10.1002/ep.14508. Available: <https://doi.org/10.1002/ep.14508>

[42] S. Svensson, J. L. Richter, E. Maitre-Ekern, T. Pihlajarinne, A. Maigret, and C. Dalhammar, “The Emerging 'Right to Repair' legislation in the EU and the U.S.,” presented at the Going Green CARE INNOVATION 2018, Vienna, Austria, 2018. (online). Available: [https://portal.research.lu.se/portal/files/33941400/Svensson\\_et\\_al.\\_Going\\_Green\\_CARE\\_INNOVATION\\_2018\\_PREPRINT.pdf](https://portal.research.lu.se/portal/files/33941400/Svensson_et_al._Going_Green_CARE_INNOVATION_2018_PREPRINT.pdf)

[43] 2012/27/EE = πώς οι βιομηχανίες οργανώνουν και βελτιώνουν την ενεργειακή τους συμπεριφορά IEEE Style: European Parliament and Council, "Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC (recast)," Official Journal of the European Union, L 315, pp. 1-56, Oct.

25, 2012 (last amended on May 4, 2023). (online). Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02012L0027-20230504>

[44] 2010/75/EE = πώς οι βιομηχανίες λειτουργούν με περιβαλλοντικά υπεύθυνο τρόπο  
IEEE Style: European Parliament and Council, "Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control)," Official Journal of the European Union, L 334, pp. 17-119, Nov. 24, 2010 (last amended on Aug. 4, 2024). (online). Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02010L0075-20240804>

[45] United Nations Industrial Development Organization, "Renewable energy," UNIDO, (online). Available: <https://www.unido.org/our-focus-safeguarding-environment-clean-energy-access-productive-use/renewable-energy>.

[46] C. M. Rodriguez, "Who We Are," The Global Environment Facility, (online). Available: <https://www.thegef.org/who-we-are>

[47] European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency (CINEA), "LIFE Programme." European Commission. Available: [https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life\\_en](https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en)

[48] A. Melnik and K. Ermolaev, "Strategy Context of Decision Making for Improved Energy Efficiency in Industrial Energy Systems," *Energies*, vol. 13, no. 7, p. 1540, Mar. 2020, doi: 10.3390/en13071540. Available: <https://doi.org/10.3390/en13071540>

[49] Y. Ji, J. Xue, and Z. Fu, "Sustainable Development of Economic Growth, Energy-Intensive Industries and Energy Consumption: Empirical Evidence from China's Provinces," *Sustainability*, vol. 14, no. 12, p. 7009, Jun. 2022, doi: 10.3390/su14127009. Available: <https://doi.org/10.3390/su14127009>

[50] C. Wohlin, M. Kalinowski, K. R. Felizardo, and E. Mendes, "Successful combination of database search and snowballing for identification of primary studies in systematic literature studies," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 147, p. 106908, Jul. 2022, (online). Available:

[51] International Energy Agency (IEA), Energy Efficiency Playbook 2022. Paris, France: 2022. (online). Available: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-playbook-2022>

[52] B. Williams, D. Bishop, P. Gallardo, and J. G. Chase, “Demand side management in industrial, commercial, and residential sectors: A review of constraints and Considerations,” *Energies*, vol. 16, no. 13, p. 5155, Jul. 2023, doi: 10.3390/en16135155. Available: <https://doi.org/10.3390/en16135155>

[53] S. H. M. Germscheid, A. Mitsos, and M. Dahmen, “Demand response potential of industrial processes considering uncertain short-term electricity prices,” *AIChE Journal*, vol. 68, no. 11, Jul. 2022, doi: 10.1002/aic.17828. Available: <https://doi.org/10.1002/aic.17828>

[54] R. Yasmin, B. M. R. Amin, R. Shah, and A. Barton, “A Survey of Commercial and Industrial Demand Response Flexibility with Energy Storage Systems and Renewable Energy,” *Sustainability*, vol. 16, no. 2, p. 731, Jan. 2024, doi: 10.3390/su16020731. Available: <https://doi.org/10.3390/su16020731>

[55] K. I. Ibekwe, A. A. Umoh, and Z. Q. S. Nwokediegwu, “ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRIAL SECTORS: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND POLICY MEASURES,” *East African Scholars Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 14–23, 2024.

[56] B. Gajdzik, R. Wolniak, and W. W. Grebski, “Electricity and heat demand in steel industry technological processes in industry 4.0 conditions,” *Energies*, vol. 16, no. 2, p. 787, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16020787. Available: <https://doi.org/10.3390/en16020787>

[57] F. Rubio, C. Llopis-Albert, and F. Valero, “Multi-objective optimization of costs and energy efficiency associated with autonomous industrial processes for sustainable growth,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 173, p. 121115, Sep. 2021.

[58] M. Macchi et al., “Maintenance optimization in industry 4.0,” *Computers in Industry*, vol. 156, p. 104084, Jan. 2024.

- [59] M. Soori, B. Arezoo, and R. Dastres, “Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review,” *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, vol. 3, pp. 192–204, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.iotcps.2023.04.006. Available: <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>
- [60] M. Dinesh et al., “An energy efficient architecture for furnace monitor and control in Foundry based on industry 4.0 using IoT,” *Scientific Programming*, vol. 2022, pp. 1–8, Jan. 2022, doi: 10.1155/2022/1128717. Available: <https://doi.org/10.1155/2022/1128717>
- [61] M. Soori, F. K. G. Jough, R. Dastres, and B. Arezoo, “AI-Based Decision Support Systems in Industry 4.0, a review,” *Journal of Economy and Technology*, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ject.2024.08.005. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.08.005>
- [62] W. Yu, P. Patros, B. Young, E. Klinac, and T. G. Walmsley, “Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112407, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112407. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407>
- [63] A. K. Sleiti, J. S. Kapat, and L. Vesely, “Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 3704–3726, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.02.305. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.305>
- [64] V. R. G. R. Da Silva, E. De Freitas Rocha Loures, E. P. De Lima, and L. A. Belinaso, “Energy Management in Energy Intensive Industries - Recommended Technical & Managerial Actions and a Delphi Study,” *Brazilian Archives of Biology and Technology*, vol. 66, Jan. 2023, doi: 10.1590/1678-4324-2023220345. Available: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2023220345>
- [65] “Primary and final energy consumption in the European Union,” *European Environment Agency’s Home Page*, Jan. 31, 2025. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/primary-and-final-energy-consumption>

[66] I. Bosu, H. Mahmoud, and H. Hassan, “Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency, economic, and environmental analysis,” *Applied Energy*, vol. 333, p. 120619, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120619. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120619>

[67] T. Schmitt, S. Mattsson, E. Flores-García, and L. Hanson, “Achieving energy efficiency in industrial manufacturing,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 216, p. 115619, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115619. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115619>

[68] M. Andrei, P. Thollander, and A. Sannö, “Knowledge demands for energy management in manufacturing industry - A systematic literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159, p. 112168, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112168. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112168>

[69] B. Gajdzik, R. Wolniak, and W. W. Grebski, “An econometric model of the operation of the steel industry in POLAND in the context of process heat and energy consumption,” *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7909, Oct. 2022.

[70] S. Yang, A. Jahanger, and M. R. Hossain, “Does China’s low-carbon city pilot intervention limit electricity consumption? An analysis of industrial energy efficiency using time-varying DID model,” *Energy Economics*, vol. 121, p. 106636, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.eneco.2023.106636. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106636>

[71] Q. Zhang, W. Chen, and W. Ling, “Policy optimization of hydrogen energy industry considering government policy preference in China,” *Sustainable Production and Consumption*, vol. 33, pp. 890–902, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.spc.2022.08.017. Available: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.08.017>

[72] E. Galitskaya and O. Zhdaneev, “Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation,” *Environmental Technology & Innovation*, vol. 27, p. 102517, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102517. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102517>

[73] E. Yang, C. Chen, K. Li, K. Guo, Y. Hua, and L. Zhang, “Challenges and strategies for energy performance contracting: A critical review,” Deleted Journal, Jan. 2025, doi: 10.70401/jbde.2025.0001. Available: <https://doi.org/10.70401/jbde.2025.0001>

[74] A. Trianni, E. Cagno, and S. Farné, “Barriers, drivers and decision-making process for industrial energy efficiency: A broad study among manufacturing small and medium-sized enterprises,” Applied Energy, vol. 162, pp. 1537–1551, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.078. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.078>

[75] W. Cai et al., “A review on methods of energy performance improvement towards sustainable manufacturing from perspectives of energy monitoring, evaluation, optimization and benchmarking,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 159, p. 112227, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112227. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112227>

[76] R. Zhang and Y. Fu, “Technological progress effects on energy efficiency from the perspective of technological innovation and technology introduction: An empirical study of Guangdong, China,” Energy Reports, vol. 8, pp. 425–437, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.11.282. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.282>

[77] B. Masoomi, I. G. Sahebi, M. Fathi, F. Yıldırım, and S. Ghorbani, “Strategic supplier selection for renewable energy supply chain under green capabilities (fuzzy BWM-WASPAS-COPRAS approach),” Energy Strategy Reviews, vol. 40, p. 100815, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.esr.2022.100815. Available: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100815>

[78] M. Benedetti, F. Bonfà, V. Introna, A. Santolamazza, and S. Ubertini, “Real Time Energy Performance Control for Industrial Compressed Air Systems: Methodology and Applications,” Energies, vol. 12, no. 20, p. 3935, Oct. 2019, doi: 10.3390/en12203935. Available: <https://doi.org/10.3390/en12203935>

[79] Z. Payandeh, T. Mesri-Gundoshmian, A. Jahanbakhshi, G. H. Shahgholi, L. Rossi, and J. Bacenetti, “Optimization of environmental and energy performance of egg production using data envelopment analysis (DEA) and life cycle assessment (LCA),” The

Science of the Total Environment, vol. 963, p. 178493, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.178493. Available:

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178493>

[80] J. Incer-Valverde, L. J. Patiño-Arévalo, G. Tsatsaronis, and T. Morosuk, “Hydrogen-driven Power-to-X: State of the art and multicriteria evaluation of a study case,” Energy Conversion and Management, vol. 266, p. 115814, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115814. Available:

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115814>

[81] X. Jiang et al., “Energy-efficient scheduling of flexible job shops with complex processes: A case study for the aerospace industry complex components in China,” Journal of Industrial Information Integration, vol. 27, p. 100293, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jii.2021.100293. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100293>

[82] A. Missaoui, C. Ozturk, B. O’Sullivan, and M. Garraffa, “Energy-Efficient Manufacturing Scheduling: A Systematic Literature Review,” in Handbook of Formal Optimization, 2024, pp. 1309–1334. doi: 10.1007/978-981-97-3820-5\_56. Available: [https://doi.org/10.1007/978-981-97-3820-5\\_56](https://doi.org/10.1007/978-981-97-3820-5_56)

[83] E. Cagno et al., “Energy management and industry 4.0: Analysis of the enabling effects of digitalization on the implementation of energy management practices,” Applied Energy, vol. 390, p. 125877, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.apenergy.2025.125877. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125877>

[84] N. K. I. Ibekwe, N. A. A. Umoh, N. Z. Q. S. Nwokediegwu, N. E. A. Etukudoh, N. V. I. Ilojiana, and N. A. Adefemi, “ENERGY EFFICIENCY IN INDUSTRIAL SECTORS: A REVIEW OF TECHNOLOGIES AND POLICY MEASURES,” Engineering Science & Technology Journal, vol. 5, no. 1, pp. 169–184, Jan. 2024, doi: 10.51594/estj.v5i1.742. Available: <https://www.fepbl.com/index.php/estj/article/view/742>

[85] N. O. D. Segun-Falade, N. O. S. Osundare, N. W. E. Kedi, N. P. A. Okeleke, N. T. I. Ijomah, and N. O. Y. Abdul-Azeez, “Developing innovative software solutions for effective energy management systems in industry,” Engineering Science & Technology

Journal, vol. 5, no. 8, pp. 2649–2669, Aug. 2024, doi: 10.51594/estj.v5i8.1517. Available: <https://doi.org/10.51594/estj.v5i8.1517>

[86] N. S. Kelepouris, A. I. Nousdilis, A. S. Bouhouras, and G. C. Christoforidis, “Cost-Effective hybrid PV-Battery systems in buildings under demand side Management application,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 5, pp. 6519–6528, Jun. 2022, doi: 10.1109/tia.2022.3186295. Available: <https://doi.org/10.1109/tia.2022.3186295>

[87] S. Hoseinzadeh and F. Pourfayaz, “Comparative techno-economic analysis of using multisource renewable energy with flexible storage systems for various environments,” Environmental Progress & Sustainable Energy, Jan. 2025, doi: 10.1002/ep.14544. Available: <https://doi.org/10.1002/ep.14544>

[88] K. A. Barber and M. Krarti, “A review of optimization-based tools for design and control of building energy systems,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 160, p. 112359, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112359. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112359>



## Παράρτημα Α

A/A	Άρθρα Στρατηγικών
1	Optimization of environmental and energy performance of egg production using data envelopment analysis (DEA) and life cycle assessment (LCA) [79]
2	Energy management and industry 4.0: Analysis of the enabling effects of digitalization on the implementation of energy management practices [83]
3	Achieving energy efficiency in industrial manufacturing [67]
4	Challenges and strategies for energy performance contracting: A critical review [73]
5	Real Time Energy Performance Control for Industrial Compressed Air Systems: Methodology and Applications [78]
6	Energy Performance contracting in the EU – 2020-2021 [27]
7	Energy efficiency for low-income households [23]
8	The energy efficiency gap and barriers to investments: Evidence from a firm survey in The Netherlands [6]
9	Multi-objective optimization of costs and energy efficiency associated with autonomous industrial processes for sustainable growth[57]
10	Barriers, drivers and decision-making process for industrial energy efficiency: A broad study among manufacturing small and medium-sized enterprises [74]
11	Energy efficiency in industrial sectors: a review of technologies and policy measures [84]
12	Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation [72]
13	Waste Heat Recovery: An Energy-Efficient and Sustainability Approach in Industry [16]
14	Energy efficiency of Heating, Ventilation and Air Conditioning systems in production environments through model-predictive control schemes: The case of battery production [8]
15	Hydrogen-driven Power-to-X: State of the art and multicriteria evaluation of a study case [80]
16	An energy efficient architecture for furnace monitor and control in Foundry based on industry 4.0 using IoT [60]
17	An econometric model of the operation of the steel industry in Poland in the context of process heat and energy consumption [69]
18	Strategic supplier selection for renewable energy supply chain under green capabilities (fuzzy Bwm-Waspas-Copras approach) [77]
19	Cost-Effective hybrid PV-Battery systems in buildings under demand side Management application [86]
20	Data-driven cleaner production strategy for energy-intensive manufacturing industries: Case studies from Southern and Northern China [33]
21	Energy-Efficient Manufacturing Scheduling: A Systematic Literature Review [82]

22	Experimental investigation of enhanced thermal performance of solar air collectors through optimized selection of manufacturing materials: Energy, exergy, economic, and environmental analysis [40]
23	Comparative techno-economic analysis of using multisource renewable energy with flexible storage systems for various environments [87]
24	Demand response potential of industrial processes considering uncertain short-term electricity prices [53]
25	Raising the Resilience of Industrial Manufacturers through Implementing Natural Gas-Fired Distributed Energy Resource Systems with Demand Response [32]
26	A comprehensive review on industrial demand response strategies and applications [1]
27	Electricity and heat demand in steel industry technological processes in industry 4.0 conditions [56]
28	Energy-efficient scheduling of flexible job shops with complex processes: A case study for the aerospace industry complex components in China [81]
29	Developing innovative software solutions for effective energy management systems in industry [85]
30	Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems [63]
31	A review of optimization-based tools for design and control of building energy systems [88]
32	Technological progress effects on energy efficiency from the perspective of technological innovation and technology introduction: An empirical study of Guangdong, China [76]
33	Does China's low-carbon city pilot intervention limit electricity consumption? An analysis of industrial energy efficiency using time-varying DID model [70]
34	Energy audit and management of an industrial site based on energy efficiency, economic, and environmental analysis [66]

## Παράρτημα Β

A/A	Στρατηγική / Τεχνολογία	Κατηγορία Στρατηγικής (από Κεφ. 4)	Κλάδος / Τομέας Εφαρμογής
1	Data Envelopment Analysis (DEA) και Life Cycle Assessment (LCA) για ενεργειακή και περιβαλλοντική βελτιστοποίηση πτηνοτροφίας	Βελτιστοποίηση Διεργασιών & Περιβαλλοντικής Απόδοσης	Αγροδιατροφικός Τομέας – Πτηνοτροφία
2	Industry 4.0 τεχνολογίες (IoT, BI, EMS, CPS) για ενίσχυση Ενεργειακών Πρακτικών Διαχείρισης (EnMPs)	Υποβοήθηση EnMS / Ψηφιακός Μετασχηματισμός	Μεταποίηση (γενικά) – cross-sectoral
3	Industry 4.0 πλαίσιο+ EnMS (MES, EMS, dashboards, KPIs)	Ψηφιοποίηση & Διαχείριση Ενέργειας	Μεταποίηση (οριζόντια εφαρμογή)
4	EPC – Energy Performance Contracting (Shared/Guaranteed Savings)	Χρηματοοικονομικά & Συμβατικά Εργαλεία	Κτίρια · Δημόσιος τομέας · Μεταποίηση
5	Real-time ενεργειακός έλεγχος απόδοσης CAS μέσω regression, CuSum και ελέγχου σε πραγματικό χρόνο	Βελτιστοποίηση Διεργασιών & Ψηφιακή Παρακολούθηση / Industry 4.0	Βιομηχανία – CAS (φαρμακευτική εφαρμογή, γενικά επεκτάσιμη)
6	Energy Performance Contracting (EPC) με ESCOs	Συμβάσεις Απόδοσης / Χρηματοδοτικά Εργαλεία	Δημόσια Κτίρια · Δημοτικός Φωτισμός · Οριζόντιος
7	Προγράμματα ενεργειακής απόδοσης για ευάλωτα νοικοκυριά (retrofit, education, incentives)	Συνδυασμένες Πολιτικές Ενεργειακής Απόδοσης & Κοινωνικής Στήριξης	Οικιακός Τομέας – Χαμηλού Εισοδήματος
8	Ανάλυση ενεργειακού κενού και φραγμών σε επιχειρήσεις μέσω ερωτηματολογίου	Διακυβέρνηση & Πληροφοριακά Μέτρα	Μεταποίηση & Βιομηχανία
9	Multi-objective optimization σε ρομποτικά κύτταρα & AGVs	Ευφυή Συστήματα Παραγωγής	Βιομηχανική Παραγωγή – Ρομποτικά Κύτταρα
10	Μη τεχνικά εμπόδια στην υλοποίηση ενεργειακών στρατηγικών (barriers / drivers framework)	Διαχειριστικές & Συμπεριφορικές Παρεμβάσεις	Μικρομεσαίες Επιχειρήσεις Μεταποίησης (SMEs)
11	Process Optimization, Additive Manufacturing, AI/ML, Predictive Maintenance, EnMS	Πολυστρατηγικό Review – Industry 4.0 · EnMS · Process Tech Upgrades	Πολυτομεακό: Αυτοκινητοβιομηχανία, Ημιαγωγοί, Μεταποίηση

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

12	PEMEL / AEL / SOEL electrolysis for green hydrogen in steel production	Αναδιάρθρωση Παραγωγικής Τεχνολογίας & Τροφοδοσίας Ενέργειας	Βιομηχανία Χάλυβα
13	WHR (DWC, ORC, MVR, FGWHR, CCC κ.λπ.)	Ανάκτηση Απόβλητης Θερμότητας & Συνδυασμένα Συστήματα	Πολλοί – Πετροχημικά, Θέρμανση, Απόσταξη, Ενέργεια
14	Model Predictive Control (MPC) για HVAC σε βιομηχανία	Έξυπνα Συστήματα Ελέγχου & Αυτοματισμού	Καθαροί Χώροι – Παραγωγή Μπαταριών
15	PtX: Ammonia, Methanol, LH2, Gas Blend	Power-to-X / Αποθήκευση & Μετατροπή Υδρογόνου	Ενέργεια · Μεταφορές · Βιομηχανία
16	IoT-based αυτοματισμός φούρνου θερμικής κατεργασίας	Ψηφιοποίηση & Αυτοματισμός	Χυτήρια / Θερμική επεξεργασία μετάλλων
17	Ανάπτυξη οικονομετρικού μοντέλου θερμικής έντασης βάσει τιμών ενέργειας & παραγωγής χάλυβα	Ψηφιακή Παρακολούθηση & Ανάλυση Ενεργειακών Παραμέτρων	Χαλυβουργία
18	Πολυκριτηριακή Αξιολόγηση Προμηθευτών με fuzzy BWM–WASPAS–COPRAS	Πράσινη Εφοδιαστική Αλυσίδα & Αειφόρος Επιλογή Προμηθευτών	Τομέας ΑΠΕ – Ηλιακά, Αιολικά, Βιομάζα
19	PV +Battery+DSM με βελτιστοποίηση sizing (UPS0)	Τεχνολογική Αναβάθμιση & Διαχείριση Ζήτησης	Κτιριακός – Κατοικίες & Επαγγελματικά
20	Data-driven EMS (Energy Management System), DSS, KPIs	Ψηφιακή Παρακολούθηση & Διαχείριση Ενέργειας	Ενεργοβόρες Βιομηχανίες – Κεραμικά, Μεταλλουργία
21	Energy-aware production scheduling, MILP, CP, metaheuristics	Βελτιστοποίηση Παραγωγικής Ροής & Ψηφιακών Διαδικασιών	Πολλοί βιομηχανικοί τομείς (μηχανουργεία, μέταλλα, τρόφιμα)
22	Αλλαγή υλικού απορροφητή σε ηλιακούς συλλέκτες αέρα (SAH)	Τεχνολογική Αναβάθμιση Υφιστάμενου Εξοπλισμού	Θέρμανση αέρα σε αγροτικές/βιομηχανικές εφαρμογές
23	Συνδυασμός PV, Wind, Battery, H <sub>2</sub> μέσω HOMER σε 15 περιοχές	Υβριδικά Συστήματα ΑΠΕ με Ευέλικτη Αποθήκευση	Ενεργειακή παραγωγή / Υποδομές
24	Στοχαστικός προγραμματισμός ζήτησης με bi-objective optimization (Expected Cost & CVaR) για βιομηχανικές διεργασίες	Ευέλικτη Διαχείριση Φορτίου & Προγραμματισμός	Ενεργοβόρες Βιομηχανικές Διεργασίες (π.χ. Ηλεκτρόλυση)
25	Φυσικού Αερίου DER με Demand Response	Ενεργειακή Αυτονομία & Αξιοπιστία	Βιομηχανία – Γενική
26	Βελτιστοποίηση φορτίου σε χάλυβα με Rolling & EAF (συμμετοχή σε αγορά)	Βελτιστοποίηση Διεργασιών & Προγράμματος Φόρτισης	Χαλυβουργία / Σιδηρουργία
27	Ενσωμάτωση Industry 4.0 (ψηφιοποίηση, SCADA, αισθητήρες, EAF optimization)	Τεχνολογική Αναβάθμιση & Ψηφιακή Παρακολούθηση	Βιομηχανία Χάλυβα

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

28	Intelligent Scheduling with Improved Chaotic Artificial Bee Colony (ICABC) algorithm	Ψηφιακή Βελτιστοποίηση Παραγωγής & Προγραμματισμός	Βιομηχανία Αεροναυπηγικής
29	AI/IoT/Fuzzy logic-based EMS software platform	Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας (EnMS) / Τεχνολογική Αναβάθμιση	Βιομηχανία · Logistics · Data Centers
30	Digital Twin+DSM+AI για θερμικούς σταθμούς παραγωγής	Industry 4.0 / Ψηφιακή Αναβάθμιση	Ενεργειακή Βιομηχανία – Θερμικές Μονάδες
31	Optimization-based tools (e.g. MILP, MPC, stochastic models) for BEMS & HVAC	Βελτιστοποίηση Design & Control / EnMS	Κτίρια (δυνάμει και βιομηχανικά HVAC)
32	Ενδογενής Καινοτομία (R&D) & Εισαγωγή Τεχνολογίας μέσω FDI	Τεχνολογική Πρόοδος / Καινοτομία & Μεταφορά Τεχνολογίας	Βιομηχανικός τομέας (26 υποτομείς – Guangdong)
33	LCCP – Low Carbon City Pilot policy	Πολιτική / Οργανωσιακή Στρατηγική (DSM)+EnMS)	Διατομεακή (Βιομηχανία, Μεταποίηση, Υπηρεσίες)
34	Εφαρμογή PV, VSDs, EMS, φωτισμός LED, θερμομόνωση, διαχείριση συμπιεστών	Συνδυαστική Στρατηγική Ενεργειακής Διαχείρισης	Βιομηχανία – Επεξεργασία λιπασμάτων / παραγωγή

## Παράρτημα Γ

A/A	Κριτήριο	Κατηγορία	Εκτίμηση Βάσει Άρθρου	Κλίμακα / Score	Score	Πλήθος Στρατηγικών
1	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	6.5 % ανά 1000 κότες	Μέτριο (5–15 %)	2	2
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν δίνεται	N/A		2
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Χωρίς κόστος εξοπλισμού	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	2
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Αναδιοργάνωση, όχι εγκατάσταση	Μέτρια	2	2
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	DEA & LCA σε πραγματικές φάρμες	TRL 9 – Εμπορική	3	2
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	-6.1 % (kg CO <sub>2</sub> e/kg αυγού)	Μέτρια (αναλογικά)	2	2
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Αγροδιατροφικός τομέας μόνο	Εξειδικευμένη	1	2
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτεί διακοπή	Μικρή	3	2
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ιράν: φθηνά καύσιμα, χαμηλή πολιτική στήριξη	Ουδέτερο	2	2
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Θερμικό φορτίο σχετικό λόγω ξηρότητας	Σχετικό	2	2
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Υπάρχει εμπειρία μεθόδων, όχι ευρεία	Μέτρια αποδοχή	2	2
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται καμία ενίσχυση	Όχι	1	2
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές φάρμες	Υψηλή	3	2
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Χρειάζεται βασική γνώση DEA/LCA	Μέτρια	2	2
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Τεχνικά (θερμική ενέργεια, απόβλητα)	Μέτρια	2	2	
2	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν ποσοτικοποιείται – ενίσχυση EnMPs	N/A	N/A	4
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν εκτιμάται – οργανωτικά/διαδικαστικά μέτρα	N/A	N/A	4
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Χαμηλό – αφορά συστήματα δεδομένων και διαχείρισης	Χαμηλό	3	4
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Μέτρια – απαιτεί οργανωτικές αλλαγές & digital maturity	Μέτρια	2	4
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Ώριμες τεχνολογίες: BI, EMS, IoT, MES	TRL 9	3	4
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν δίνεται – υπονοείται από ενεργειακή διαφάνεια	N/A	N/A	4

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Υψηλή – cross-sectoral εφαρμοσιμότητα	Οριζόντια	3	4
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται – υλοποίηση χωρίς παύση παραγωγής	Μικρή	3	4
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Πολυεθνική μελέτη – διαφορετικό policy context	Ουδέτερο / Ευνοϊκό	2	4
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται – αφορά οργανωτικά/ψηφιακά συστήματα	Αδιάφορο	1	4
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Κρίσιμη – εξαρτάται από δέσμευση διοίκησης & συνεργασία	Υψηλή αποδοχή	3	4
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Εν μέρει – ISO 50001, EMAS, regulatory frameworks	Μερικώς	2	4
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – μεταφέρσιμο σε διάφορους τομείς	Υψηλή	3	4
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί οργανωτική ωριμότητα και γνώση I4.0 εργαλείων	Μέτρια	2	4
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Οργανωτικά & κουλτούρας – data integration, awareness	Μέτρια	2	4
3	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν δίνει ποσοστά – θεωρητική εφαρμογή	Εκτίμηση: Μέτριο	2	3
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται	N/A	N/A	3
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν προσδιορίζεται – εξαρτάται από λύση	N/A	N/A	3
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή – πολυπαραγοντική και οργανωτική	Δύσκολη	3	3
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Ώριμες τεχνολογίες: MES, IoT, EMS	TRL 9	3	3
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν ποσοτικοποιείται – υπονοείται	N/A	N/A	3
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Υψηλή – cross-sectoral δυνατότητα	Οριζόντια	3	3
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Ελάχιστη ή μηδενική	Μικρή	3	3
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Εφαρμογή σε Ευρώπη / ΕΕ – ευνοϊκό πλαίσιο πολιτικής	Ευνοϊκό	3	3
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν επηρεάζεται από κλίμα	Αδιάφορο	1	3
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Κρίσιμος παράγοντας – οργανωτική κουλτούρα, συνεργασία	Υψηλή αποδοχή	3	3
Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Ναι – ISO 50001, ESG, KPIs, reporting	Ναι	3	3	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – ενιαίο πλαίσιο εφαρμογής	Υψηλή	3	3
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Υψηλές απαιτήσεις σε KPI thinking & συστήματα	Υψηλή	3	3
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολυπλοκότητα, silo-based κουλτούρα, δυσκολία ενσωμάτωσης	Σημαντικά	1	3
4	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	5–25 % εξοικονόμηση	Μέτριο–Υψηλό	2	3+
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Συνήθως <7 έτη	Εκτίμηση: Μέσο	2	3+
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Κυμαινόμενο – μέτριο επίπεδο	Εκτίμηση	2	3+
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Εξαρτάται από stakeholder model	Μέτρια	2	3+
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 9 (ώριμες λύσεις)	Υψηλή	3	3+
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	>6.000 tCO <sub>2</sub> /έτος σε κάποιες εφαρμογές	Υψηλή	3	3+
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Υψηλή επεκτασιμότητα (building–industry)	Πολυκλαδική	3	3+
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Συνήθως δεν απαιτείται	Μικρή	3	3+
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	ΗΠΑ/Κίνα/ΕΕ – θεσμική υποστήριξη	Ευνοϊκό	3	3+
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Σχετικό σε έργα HVAC, θέρμανσης	Σχετικό	2	3+
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Εξαρτάται από εμπιστοσύνη ESCO & παρακολούθηση	Μέτρια	2	3+
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Συχνά βασικός παράγοντας	Ναι	3	3+
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – προσαρμοσίμο μοντέλο	Υψηλή	3	3+
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Χρειάζεται κατάρτιση M&V, ρίσκου	Μέτρια	2	3+
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Νομικά, τεχνικά & οργανωτικά	Μέτρια	2	3+	
5	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Εκτιμώμενη ~10 % (δεν δίνεται ρητά)	Μέτριο (5–15 %)	2	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται νέο CapEx (software/λειτουργική παρέμβαση)	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή – απαιτεί ανάλυση δεδομένων, regression, SCADA integration	Υψηλή	1	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 9 – Υλοποιημένη λύση	TRL 9 – Εμπορική	3	1



Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Όχι ρητή – προκύπτει από μειωμένη κατανάλωση ρεύματος	Μέτρια (εκτίμηση)	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμόσιμο σε κάθε εργοστάσιο με CAS	Υψηλή – Οριζόντια	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται διακοπή – real-time προσαρμογή	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ιταλία – θετικό πλαίσιο για ενεργειακή διαχείριση / ISO 50001	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται με τοπικές κλιματικές συνθήκες	Αδιάφορο	1	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Υψηλή συμμετοχή και εμπλοκή ενεργειακής ομάδας	Υψηλή αποδοχή	3	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται ρητά – εκτιμάται έμμεση μέσω EnMS πολιτικής	Μερικώς	2	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – CAS παντού στη βιομηχανία	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί advanced analytics skills, control, regression	Υψηλή	1	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολυπλοκότητα εγκατάστασης λογισμικού / διαχείρισης δεδομένων	Σημαντικά	1	1
6	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	10–30 % (όπου δίνεται)	Υψηλό	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	2–5 έτη (τυπικό εύρος)	Μέτριο	2	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	100k–M€, project-based	Μέτριο	2	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή – θεσμική/νομική πολυπλοκότητα	Δύσκολη	1	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Ώριμες τεχνολογίες (BMS, HVAC, LED)	TRL 9 – Εμπορική	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Προκύπτει από εξοικονόμηση ενέργειας	Μέτρια (εκτίμηση)	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Οριζόντια – εφαρμογή σε πολλούς τομείς	Υψηλή	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται – λειτουργικά έργα	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Επιτυχία σε AT, BE, DE – προβλήματα στη NA Ευρώπη	Ευνοϊκό/Ουδέτερο	2	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Μη κρίσιμος παράγοντας για EnPC	Αδιάφορο	1	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Χαμηλή εμπιστοσύνη σε ESCOs σε κάποιες χώρες	Μέτρια αποδοχή	2	1
Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Σαφής υποστήριξη σε επιτυχημένες χώρες	Ναι	3	1	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – πολλαπλές περιπτώσεις ανά χώρα	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Υψηλή εξειδίκευση απαιτείται	Υψηλή	1	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Σημαντικά – νομικά, γραφειοκρατικά, συμβατικά	Σημαντικά	1	1
7	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν δίνεται ενιαίο % – ποιοτική αναφορά σε retrofit κ.ά.	N/A	N/A	3+
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται συγκεκριμένα	N/A	N/A	3+
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Πολλές low-cost λύσεις, όχι εξοπλισμός	Χαμηλό	3	3+
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή λόγω ανάγκης θεσμικής και κοινωνικής στήριξης	Υψηλή	1	3+
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Περιγράφονται ώριμες τεχνολογίες (insulation, LED κ.λπ.)	TRL 9 – Εμπορική	3	3+
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν ποσοτικοποιείται – θετικά αποτελέσματα αναφέρονται	Εκτίμηση: Μέτρια	2	3+
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Οικιακός τομέας, χαμηλού εισοδήματος μόνο	Εξειδικευμένη	1	3+
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν σχετίζεται – αφορά κατοικίες	Καμία / Άσχετο	3	3+
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ευνοϊκό στις περιπτώσεις με ενεργή πολιτική στήριξη	Ευνοϊκό	3	3+
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Ιδιαίτερα σχετικό – retrofit/insulation για κρύες περιοχές	Σχετικό	3	3+
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Πρωθείται μέσω ενημέρωσης & συμμετοχικότητας	Υψηλή αποδοχή	3	3+
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Απαραίτητη – τονίζεται συνεχώς	Ναι	3	3+
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή μεταξύ χωρών & κοινωνικών δομών	Υψηλή	3	3+
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτείται εκπαίδευση καταναλωτών και συμβούλων	Μέτρια	2	3+
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Οικονομικά, διοικητικά και συμπεριφορικά εμπόδια	Σημαντικά	1	3+	
8	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Επενδύσεις με μέσο IRR ~38%	Υψηλό (30–50 %)	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν δίνεται	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Κυμαίνεται – εξαρτάται από μέτρο	Μέσο	2	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Διακυβερνητικά/οργανωτικά εμπόδια	Μέτρια	2	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Υφιστάμενες και ώριμες τεχνολογίες	TRL 8–9	3	1

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Αναμένεται έμμεση λόγω μείωσης κατανάλωσης ενέργειας	Σχετική	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Επιχειρήσεις όλων των μεγεθών (κυρίως ΜΜΕ)	Γενική	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν αφορά άμεσα εξοπλισμό – διοικητική στρατηγική	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Υποστηρικτικό, πολιτικές ενέργειας στην Ολλανδία	Θετικό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν επηρεάζει	Ουδέτερο	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Συμπεριφορικά εμπόδια / αδράνεια	Μέτρια αποδοχή	2	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Παροχή πληροφοριών, πολιτικά μέτρα	Μέτρια	2	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Ισχυρή, μπορεί να επαναληφθεί και σε άλλες χώρες	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Χρειάζεται υποστήριξη στον σχεδιασμό στρατηγικών	Μέτρια	2	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Οργανωτικά, πληροφορίας, προτεραιοτήτων	Μέτρια	2	1
9	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης έως 20%	Υψηλό	3	2
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται	N/A	N/A	2
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 9 – Εφαρμοσμένη τεχνολογία σε πραγματικά περιβάλλοντα	Υψηλό	3	2
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Απαιτεί εξειδίκευση, αλλά εφαρμόσιμο	Μέτρια	2	2
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν απαιτεί νέο εξοπλισμό	Χαμηλό	3	2
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μέσω ενεργειακής βελτίωσης	Μέτρια	2	2
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Βιομηχανική χρήση – ευρεία εφαρμογή	Ευρεία	3	2
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Μικρή – δεν απαιτείται διακοπή	Μικρή	3	2
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Εφαρμογή σε ΕΕ – υποστηρικτικό πλαίσιο	Ενισχυτικό	3	2
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Ανεξάρτητο από κλιματικές συνθήκες	Ουδέτερο	2	2
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Εξοικείωση με Industry 4.0 απαιτείται	Μέτρια αποδοχή	2	2
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Σύμφωνο με πολιτικές ΕΕ – GHG & Digital	Υψηλή	3	2
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – πλήρως αναπαραγωγίμο	Υψηλή	3	2
Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαραίτητη κατανόηση βελτιστοποίησης	Μέτρια	2	2	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Προσαρμογή λογισμικού και ροής παραγωγής	Μέτρια	2	2
10	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν δίνονται ποσοστά – perception-based	N/A	N/A	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν παρέχεται	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Αντιλαμβάνεται ως εμπόδιο (πολύ υψηλό perceived)	Υψηλό (perceived)	1	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Οργανωτικά / ανθρώπινα εμπόδια κυριαρχούν	Υψηλή	1	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Δεν αμφισβητούνται τεχνολογίες – θεωρούνται ώριμες	TRL 9 – Εμπορική	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν υπάρχουν στοιχεία	N/A	N/A	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Ισχύει για πολλούς κλάδους MME	Υψηλή	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται – focus σε perceptions	Μικρή (εκτίμηση)	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ιταλία, Ολλανδία, UK – διαφορετικές πολιτικές συνθήκες	Ουδέτερο έως ευνοϊκό	2	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν εξετάζεται ως παράγοντας	Αδιάφορο	1	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Χαμηλή παρακίνηση, ανθρώπινη αδράνεια	Χαμηλή αποδοχή	1	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Έλλειψη ενίσχυσης ως barrier	Μερικώς	2	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – ισχύει για γενικά SMEs	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Έλλειψη πληροφόρησης/ικανοτήτων ως κρίσιμο εμπόδιο	Υψηλή ανάγκη	1	1
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολύ σημαντικά – organizational, informational, behavioral	Σημαντικά	1	1	
11	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Αναφορές σε σημαντική μείωση ανά στρατηγική – όχι ποσοτικό	Μέτριο (εκτίμηση)	2	5+
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν δίνεται	N/A	N/A	5+
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Διαφοροποιημένο: οργανωτικές χαμηλές, AI/ML υψηλότερες	Μέτριο (εκτίμηση)	2	5+
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Κυμαίνεται ανά στρατηγική · από Lean έως AI   TRL 9	Μέτρια-Υψηλή	2	5+
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 8–9 για τις περισσότερες εφαρμογές	Εμπορική	3	5+
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Ποιοτική αναφορά – δεν δίνεται αριθμός	Μέτρια (εκτίμηση)	2	5+

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Πολύ υψηλή – εφαρμογή σε κάθε βιομηχανία	Υψηλή	3	5+
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Οργανωτικές στρατηγικές χωρίς διακοπή   τεχνολογικές εξαρτώνται	Μικρή (εκτίμηση)	3	5+
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Αναλύονται περιπτώσεις από CA, Γερμανία, Κίνα	Ευνοϊκό	3	5+
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν είναι κρίσιμος παράγοντας – δεν διαφοροποιείται	Ουδέτερο	2	5+
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Αναγκαία η αποδοχή από εργαζομένους και Διοίκηση	Μέτρια αποδοχή	2	5+
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Ρητή αναφορά σε ρυθμίσεις, επιδοτήσεις, πολιτικά frameworks	Ναι	3	5+
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πλήρως επαναλήψιμες στρατηγικές σε πολλούς κλάδους	Υψηλή	3	5+
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτείται τεχνογνωσία κυρίως για AI και EnMS	Μέτρια	2	5+
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Τεχνικά, πολιτικά, οικονομικά και οργανωτικά εμπόδια	Σημαντικά	2	5+
12	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Έμμεση απόδοση μέσω CO <sub>2</sub> (~6–10%)	Μέτριο (εκτίμηση)	2	3
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	NPV10 > έτος 2035	Μακρύς	1	3
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	~416 εκατ. \$	Υψηλό	1	3
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Πολύπλοκη τεχνολογική μετάβαση	Υψηλή	1	3
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	AEL: TRL 9, PEMEL: TRL 7–8, SOEL: TRL 5–6	Κυμαινόμενη	2	3
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	-20% έως -60% σε πλήρη μετάβαση	Υψηλή	3	3
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Steelmaking – εφαρμογή και αλλού	Κλαδική	2	3
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Εκτιμάται σημαντική λόγω αλλαγής παραγωγικής τεχνολογίας	Μεγάλη (εκτίμηση)	1	3
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ρωσία – χαμηλή θεσμική ωριμότητα, ανάγκη επιδοτήσεων	Περιοριστικό	1	3
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Υψηλό δυναμικό ΑΠΕ (αιολική Krasnodar)	Σχετικό – Ευνοϊκό	3	3
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Τεχνική ισχυρή – διοικητικά αδύναμη	Μέτρια	2	3
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Απαιτείται 20% επιδότηση CapEx	Μερικώς	2	3
Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Εφαρμόσιμο σε πολλές βαριές βιομηχανίες	Υψηλή	3	3	
Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Υψηλή ανάγκη εξειδίκευσης για PEMEL/SOEL	Υψηλή	3	3	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Τεχνικά, οικονομικά και θεσμικά εμπόδια	Σημαντικά	1	3
13	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	~10–30 % ανά στρατηγική	Υψηλό	3	5+
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	<1 έτος σε πολλές περιπτώσεις	Πολύ Σύντομος	3	5+
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Ποικίλλει ανά τεχνική	Μέτριο	2	5+
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Από retrofit έως σύνθετα MVR/CCC	Δύσκολη	3	5+
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 8–9	Εμπορική	3	5+
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Σημαντική, αλλά χωρίς %	Μέτρια–Υψηλή	2.5	5+
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Οριζόντια εφαρμογή σε πολλούς κλάδους	Υψηλή	3	5+
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Μικρή σε retrofit, μέτρια σε άλλα	Μικρή–Μέτρια	2	5+
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Δυτικά/διεθνή πλαίσια – συνήθως υποστηρικτικά	Ευνοϊκό	3	5+
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Οι τεχνολογίες είναι κλιματικά ευέλικτες	Ουδέτερο–Θετικό	2	5+
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	WHR ευρέως αποδεκτό στη βιομηχανία	Υψηλή	3	5+
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	ETS, subsidies, tax reliefs σε πολλές χώρες	Ναι	3	5+
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – εφαρμόσιμη ευρέως	Υψηλή	3	5+
Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Μέτριες απαιτήσεις – μηχανολογικές/ενεργειακές	Μέτρια	2	5+	
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	CapEx, χώρος, πολυπλοκότητα σε μερικές τεχνικές	Μέτρια	2	5+	
14	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Έως –18 % εξοικονόμηση HVAC (έως –37% έναντι απλής ρύθμισης)	Υψηλό	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται υπολογιστικά	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Software-based – χωρίς CapEx για εξοπλισμό	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Απαιτεί integration & fine-tuning με BMS	Υψηλή	1	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Πιλοτική εφαρμογή σε λειτουργία (Battery LabFactory)	TRL 8–9	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μέσω HVAC savings – εκτίμηση >1 kt/year	Μέτρια (εκτίμηση)	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Υψηλή – εφαρμογή HVAC σε πολλούς βιομηχανικούς κλάδους	Οριζόντια	3	1
Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Καμία – λειτουργεί παράλληλα με υπάρχον σύστημα	Μικρή	3	1	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Γερμανία – προηγμένο τεχνολογικό και ερευνητικό περιβάλλον	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Μικρή επίδραση λόγω εφαρμογής σε εσωτερικό cleanroom	Ουδέτερο	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Υψηλή αποδοχή Industry 4.0 / ψηφιοποίησης	Υψηλή	3	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Έμμεση μέσω ερευνητικών / ευρωπαϊκών R&D σχημάτων	Μερική	2	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – HVAC εφαρμόζεται παντού	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί υψηλή τεχνογνωσία (data modeling& HVAC)	Υψηλή	1	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Τεχνικά – integration με BMS, υποδομή δεδομένων	Σημαντικά	1	1
15	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν δίνεται ως % – αξιολογείται απόδοση (exergy, sustainability)	N/A	N/A	4
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται – γίνεται AHP ranking	N/A	N/A	4
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Methanol & Ammonia σχετικά χαμηλό κόστος	Μέτριο–Χαμηλό	2	4
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	LH2 = υψηλή · Ammonia = χαμηλότερη · σχετίζεται με υποδομές	Μέτρια–Υψηλή	2	4
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 9 (Ammonia), TRL 8 (Methanol), TRL 7 (LH2)	Υψηλή	3	4
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση συνεισφορά – συγκρίσεις ανά τεχνολογία	Μέτρια	2	4
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Διατομεακή – εφαρμόζεται σε ενέργεια, μεταφορές, χημικά	Υψηλή	3	4
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν εξετάζεται – αφορά νέα εγκατάσταση, όχι retrofit	N/A	N/A	4
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Υπονοείται Ευρώπη / Γερμανία – ουδέτερο/ευνοϊκό	Ουδέτερο–Ευνοϊκό	2	4
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Σχετικό – εξαρτάται από τελική χρήση PtX	Σχετικό	2	4
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Δεν εξετάζεται ρητά	N/A	N/A	4
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Αναφέρεται ως κρίσιμος παράγοντας επιτυχίας	Μέτρια	2	4
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – μεταφέρσιμη τεχνολογία σε διάφορους τομείς	Υψηλή	3	4
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Υψηλή απαίτηση γνώσης ειδικά για LH2	Υψηλή	3	4
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Τεχνικά – κόστη, ασφάλεια, συμπίεση H <sub>2</sub>	Σημαντικά	2	4

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

16	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν παρέχεται ποσοστό – αναφέρεται μείωση λόγω ακρίβειας ελέγχου	N/A	N/A	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν παρέχεται κόστος ή ROI	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Χαμηλό – χρήση XMC4700] [Wi-Fi χωρίς νέο βαρύ εξοπλισμό	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Μέτρια – harsh industrial environment	Μέτρια	2	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Υψηλή – TRL 9, δοκιμασμένο πρωτότυπο	TRL 9 – Εμπορική	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση – μείωση αποβλήτων & απωλειών	Μέτρια (εκτίμηση)	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Χρήση σε θερμικές διεργασίες μετάλλων / αυτοκινητοβιομηχανία	Κλαδική	2	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται διακοπή – εγκαθίσταται σταδιακά	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ινδία – ανάγκη για αυτοματοποίηση, χαμηλό εργατικό κόστος	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Σχετικό – υψηλές θερμοκρασίες, ανάγκη για ανθεκτικά ηλεκτρονικά	Σχετικό	3	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Μέτρια αποδοχή – τεχνολογική λύση αντί ανθρώπινου παράγοντα	Μέτρια αποδοχή	2	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται – ανεξάρτητη ιδιωτική εφαρμογή	Όχι	1	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – εφαρμόσιμο σε πολλούς φούρνους θερμικής κατεργασίας	Υψηλή	3	1
Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί βασική γνώση IoT] [ελεγκτών	Μέτρια	2	1	
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Θερμοκρασία περιβάλλοντος, ακρίβεια μέτρησης, signal integrity	Μέτρια	2	1	
17	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Έμμεση μείωση μέσω αύξησης τιμών ενέργειας	Μέτριο	2	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν εκτιμάται ρητά	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Ελάχιστο, χρήση υπαρχόντων δεδομένων	Χαμηλό	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Στατιστική ανάλυση, όχι εγκατάσταση	Μικρή	3	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Υψηλή, βάσει δεδομένων 17 ετών	TRL 9	3	1



Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μέσω αύξησης τιμών ενέργειας	Μέτρια	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμόσιμο σε όλη τη χαλυβουργία	Γενικευμένη	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Πολωνία: υψηλό κόστος ενέργειας	Ουδέτερο έως αρνητικό	1-2	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Μη καθοριστικός παράγοντας	Ουδέτερο	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Εφαρμογή κυρίως σε πολιτικές και ΟΤΑ	Μέτρια αποδοχή	2	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Περιορισμένη επιδότηση / ενίσχυση	Χαμηλή	1	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή δυνατότητα σε άλλες βιομηχανίες	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Χρήση βασικών δεξιοτήτων στατιστικής	Μέτρια	2	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Οικονομικά – Ρυθμιστικά	Μέτρια	2	1
18	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν ποσοτικοποιείται	N/A	N/A	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν σχετίζεται	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν αφορά εξοπλισμό	N/A	N/A	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή πολυπλοκότητα MCDM με fuzzy	Δύσκολη	1	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Εφαρμογή ώριμων MCDM μεθόδων	TRL 9 – Εμπορική	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μέσω green supplier performance	Εκτίμηση μέτρια	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμογή σε όλο τον κλάδο ΑΠΕ	Οριζόντια	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτεί διακοπή παραγωγής	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ιράν – ουδέτερο θεσμικό περιβάλλον	Ουδέτερο	2	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Σχετικό – ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ.	Σχετικό	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Μέτρια – συμμόρφωση σε ESG στόχους	Μέτρια	2	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Περιορισμένη – δεν αναφέρεται ενίσχυση	Όχι	1	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – εφαρμόσιμο οριζόντια	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί εξειδικευμένη γνώση fuzzy MCDM	Υψηλή	1	1
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Έλλειψη δεδομένων, ποιοτική υποκειμενικότητα	Σημαντικά	1	1	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

19	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	SSR ~70% / Αυτοπαραγωγή	Υψηλό (>15%)	3	3
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Υπολογίζεται μέσω NPV optimization, όχι ρητά	Μέτριο (εκτίμηση)	2	3
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Πλήρης επένδυση σε PV] [BESS	Υψηλό	1	3
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Τεχνική πολυπλοκότητα, όχι λειτουργική	Μέτρια	2	3
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Ώριμες τεχνολογίες PV, BESS, DSM	TRL 9 – Εμπορική	3	3
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση – λόγω αύξησης αυτοπαραγωγής	Μέτρια (εκτίμηση)	2	3
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμόσιμη σε κατοικίες και μικρά επαγγελματικά	Κλαδική	2	3
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτεί διακοπή λειτουργίας	Μικρή	3	3
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ελλάδα: PV δυναμικό] [μέτριο DSM πλαίσιο	Ουδέτερο προς Ευνοϊκό	2	3
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Πολύ σχετικό – υψηλή ηλιοφάνεια	Σχετικό	3	3
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Αυξανόμενη αποδοχή PV/BESS	Μέτρια αποδοχή	2	3
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Net Metering – Περιορισμένη στήριξη DSM	Μερικώς	2	3
	20	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Εύκολα επαναλήψιμο σε παρόμοια κτίρια	Υψηλή	3
Εκπαίδευση / Γνώση		Πλαισιακό	Απαιτεί σχεδιασμό & τεχνική γνώση συστημάτων	Μέτρια	2	3
Αναμενόμενα Εμπόδια		Πλαισιακό	Οικονομικό κόστος, διασύνδεση, έλεγχος φορτίου	Μέτρια	2	3
Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας		Τεχνικό	10–15 %	Υψηλό	3	1
Χρόνος Απόσβεσης (Payback)		Τεχνικό	Δεν προσδιορίζεται	N/A	N/A	1
Επενδυτικό Κόστος (CapEx)		Τεχνικό	Χαμηλό – κυρίως software	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	1
Δυσκολία Εφαρμογής		Τεχνικό	Απαιτεί data infrastructure	Μέτρια	2	1
Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)		Τεχνικό	Ώριμα εργαλεία DSS, dashboards	TRL 9 – Εμπορική	3	1
Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Μείωση ~5–10 % στις εκπομπές	Μέτρια	2	1	
Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Ισχύει σε όλους τους ενεργοβόρους τομείς	Υψηλή – Οριζόντια	3	1	
Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Εν λειτουργία εφαρμογή	Μικρή	3	1	
Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Κίνα: πίεση στόχων] [μεγάλοι ρυπαντές	Ευνοϊκό	3	1	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται	Αδιάφορο	1	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Συνεργασία εργοστασίων – θετική στάση	Υψηλή	3	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Ναι – κρατικά KPIs, ρυθμίσεις	Ναι	3	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή σε παρόμοιες ενεργοβόρες βιομηχανίες	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Μέτριες απαιτήσεις (DSS, analytics)	Μέτρια	2	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Data integration, inertia	Μέτρια	2	1
21	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	~2-20 % (μεσοσταθμικά)	Μέτριο-Υψηλό	3	>3
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν προκύπτει	N/A	N/A	>3
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Κυμαίνεται από πολύ χαμηλό (λογισμικό) έως υψηλότερο (τεχνολογικός εξοπλισμός)	Μεταβλητό	2	>3
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Απαιτεί αναδιοργάνωση διαδικασιών & data management	Μέτρια	2	>3
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 7-9 (δοκιμασμένες τεχνικές σε παραγωγικά περιβάλλοντα)	Υψηλή	3	>3
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν αποτιμάται ποσοτικά, αλλά έμμεσα μέσω εξοικονόμησης	Εκτιμώμενη Μέτρια	2	>3
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Οριζόντια εφαρμοσιμότητα σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς	Υψηλή	3	>3
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Χαμηλή, ιδίως σε software-based εφαρμογές	Μικρή	3	>3
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Global scope χωρίς focus σε συγκεκριμένη χώρα	Ουδέτερο	2	>3
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν επηρεάζει το scheduling άμεσα	Αδιάφορο	1	>3
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Απαραίτητη αλλαγή κουλτούρας & αποδοχή ψηφιακής διαχείρισης	Μέτρια	2	>3
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν εξετάζεται πολιτική υποστήριξη	Όχι	1	>3
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή σε κάθε εργοστάσιο με προγραμματισμό παραγωγής	Υψηλή	3	>3
Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί γνώση optimization, OR tools, ICT συστημάτων	Υψηλή	3	>3	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Αντίσταση σε αλλαγή, data complexity, επανασχεδιασμός συστημάτων	Μέτρια	2	>3
22	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Έως 24.46 % (αλουμίνιο)	Υψηλό (>15 %)	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Έμμεση εκτίμηση ~2 έτη	Εκτίμηση: Σύντομος	2	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν δίνεται – μόνο αλλαγή υλικού	Μη διαθέσιμο	N/A	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Αλλαγή πλάκας – απλή παρέμβαση	Εύκολη	3	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	SAH διαθέσιμα στην αγορά	TRL 9 – Εμπορική	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έως 19.795 kg CO <sub>2</sub> /μήνα (αλουμίνιο)	Υψηλή	3	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Θέρμανση σε πολλαπλούς κλάδους	Μέτρια-Υψηλή	2	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται – ενσωματώσιμο	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Τυνησία – ΑΠΕ, ήλιος	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή ηλιακή ακτινοβολία	Πολύ Σχετικό	3	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Δεν προσδιορίζεται – εκτίμηση: Ουδέτερη	Ουδέτερη	2	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται υποστήριξη	Όχι	1	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Εφαρμόσιμο σε SAH σε όλο τον κόσμο	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Δεν απαιτεί ειδική τεχνογνωσία	Χαμηλή	3	1
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Ελάχιστα – κυρίως υλικά	Ελάχιστα	3	1	
23	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται ρητά % – κάλυψη 5 MWh/day	N/A	N/A	4
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Εκτίμηση >5 έτη – υψηλό CapEx	Μακρύς	1	4
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Πολύ υψηλό (έως 16–20M\$ ανά έργο)	Υψηλό	1	4
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Πολυπαραμετρική, απαιτεί σχεδιασμό σε HOMER	Δύσκολη	1	4
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	PV, Wind, H <sub>2</sub> , Batteries → fully commercial	TRL 9 – Εμπορική	3	4
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Εκτιμώμενη μείωση 30–35 %	Υψηλή	3	4
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμόσιμο σε πολλαπλές γεωγραφικές περιοχές	Οριζόντια	3	4

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται διακοπή – standalone σχεδιασμός	Μικρή έως Μέτρια	2	4
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ιράν – Περιοριστική πολιτική / χαμηλή υποστήριξη	Περιοριστικό	1	4
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Άμεσα κρίσιμος παράγοντας – GHI/Wind potential	Σχετικό	3	4
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Δεν εξετάζεται / τεχνική ανάλυση μόνο	Αδιάφορο	1	4
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Καμία υποστήριξη αναφέρεται – μάλλον ανύπαρκτη	Όχι	1	4
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – εφαρμόστηκε σε 15 τοποθεσίες	Υψηλή	3	4
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί γνώση προσομοίωσης (HOMER κ.λπ.)	Υψηλή	3	4
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολύ υψηλό CapEx & κλιματική ευαισθησία	Σημαντικά	1	4
24	Ποσοστό Εξοικονόμησης Κόστους	Τεχνικοοικονομικό	έως 229 % συγκριτικά με DA-only optimization (Copper Electrolysis)	Πολύ Υψηλό (> 20%)	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικοοικονομικό	Δεν υπολογίζεται απευθείας, αλλά αφορά μηδενικό επενδυτικό κόστος (optimization-based)	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικοοικονομικό	Δεν απαιτείται φυσική επένδυση, αξιολόγηση βάσει εφικτότητας ευελιξίας	Πολύ Χαμηλό	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Εξαρτάται από ύπαρξη τεχνικών δεδομένων διεργασίας – γενικά απαιτεί MILP μοντελοποίηση	Μέτρια	2	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 9 για βιομηχανική εφαρμογή, π.χ. ηλεκτρόλυση αλουμινίου, χαλκού, κ.ά.	Υψηλή (TRL 9)	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Περιβαλλοντικό	Έμμεση, μέσω μετατόπισης φορτίου σε ώρες ΑΠΕ	Σχετική / Έμμεση	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμόσιμη σε πολλούς τύπους ενεργοβόρων βιομηχανιών	Γενικευμένη	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Επιτρεπτή σε διεργασίες με υψηλό part-load – υποστηρίζεται στο μοντέλο	Χαμηλή έως Μέτρια	2	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Εφαρμογή σε αγορές με DA & ID – Γερμανική αγορά (case study)	Σχετικό	2	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν έχει άμεση επίδραση στο μοντέλο, αλλά σχετίζεται με ΑΠΕ & αρνητικές τιμές	Ουδέτερο	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Προτείνεται ως προσέγγιση σε πρώιμα στάδια αξιολόγησης – εξαρτάται από γνώση optimization	Μέτρια Αποδοχή	2	1

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται ρητά, αλλά δυνατότητες με ΑΠΕ & αρνητικές τιμές	Όχι / Χαμηλή	1	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή, εφαρμόσιμη σε ηλεκτρολύση, τσιμέντο, χάλυβα, κ.ά.	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί γνώση SP/MILP & μοντελοποίησης διεργασιών	Μέτρια	2	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Υπολογιστική πολυπλοκότητα, ανάγκη καλών δεδομένων διεργασίας	Μέτρια	2	1
25	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Μείωση 18% στο συνολικό ενεργειακό κόστος	Υψηλό (>15%)	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Οικονομικό	Άμεση απόσβεση εντός έτους (USD 2.6M savings)	Σύντομος (<2 έτη)	3	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Οικονομικό	Κόστος επένδυσης σε υποδομή (DER) [automation)	Υψηλό (αλλά αποσβέσιμο)	2	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Απαιτεί ανασχεδιασμό και έλεγχο παραγωγής	Μέτρια	2	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Εφαρμογή σε πραγματική βιομηχανία (TRL 9)	TRL 9 – Εμπορική	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν δίνεται άμεση μέτρηση CO <sub>2</sub> e	N/A	N/A	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμογή σε βιομηχανία με 14 MW φορτίο	Μεγάλης Κλίμακας	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Ενσωματωμένο στο υπάρχον δίκτυο, χωρίς διακοπή	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Ρωσία – φθινό φυσικό αέριο, χαμηλή διείσδυση ΑΠΕ	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Βόρειο κλίμα με υψηλό θερμικό φορτίο	Σχετικό	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Έλλειψη κινήτρων για εξοικονόμηση λόγω φθηνής ενέργειας	Περιορισμένη Αποδοχή	2	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν παρέχεται ενίσχυση – βασισμένο σε εσωτερικά οφέλη	Όχι	1	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Κατάλληλο για πολλές βιομηχανίες	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί βασικές γνώσεις σε ενεργειακή διαχείριση	Μέτρια	2	1
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολυπλοκότητα διαχείρισης κόστους ενέργειας και αερίου	Μέτρια	2	1	
26	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Μείωση κόστους ενέργειας μέσω DR χωρίς διακοπή	Μέτριο	2	2

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Χρόνος Απόσβεσης	Τεχνικό	Δεν δίνεται ρητά, αλλά αναφέρεται μειωμένο κόστος	N/A	N/A	2
	Επενδυτικό Κόστος	Τεχνικό	Απαιτείται λογισμικό & αυτοματισμοί	Μέτριο (εκτίμηση)	2	2
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Πολύπλοκη βιομηχανική διεργασία, εξαρτάται από κρίσιμα στάδια	Υψηλή	1	2
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Υψηλή – πραγματικές εφαρμογές, π.χ. σε Ταϊβάν	TRL 8–9	3	2
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν δίνεται ρητά – αναφέρεται περιβαλλοντική συμβολή	Εκτιμώμενη	2	2
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Μεγάλη βιομηχανική κλίμακα (χάλυβας, EAF)	Βιομηχανική	3	2
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Σημαντικό ρίσκο σε κρίσιμες διεργασίες	Μέτριο-Υψηλό	1	2
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Υλοποιήσεις σε Ασία (Ταϊβάν), πιθανές διαφορές σε ΕΕ	Ουδέτερο	2	2
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται ιδιαίτερα (εσωτερικές διεργασίες)	Ουδέτερο	2	2
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Περιορισμένη συμμετοχή, ανάγκη για εκπαίδευση	Μέτρια αποδοχή	2	2
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται θεσμική ενίσχυση	Όχι	1	2
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – δυνατότητα εφαρμογής σε πολλές μονάδες	Υψηλή	3	2
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Χρειάζεται γνώση βελτιστοποίησης και EMS	Μέτρια	2	2
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολυπλοκότητα παραγωγικής διαδικασίας	Μέτρια-Υψηλά	1–2	2
27	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	>5% σε EAF/BOF	Μέτριο (5–15%)	2	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Επενδυτικό αλλά χωρίς τιμές – σχετίζεται με ψηφιοποίηση	Μέτριο (εκτίμηση)	2	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή οργανωτική και τεχνολογική πολυπλοκότητα	Δύσκολη	1	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 8–9 · εφαρμόζονται σε πραγματικές χαλυβουργίες	Υψηλή	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μείωση λόγω χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας	Μέτρια (εκτίμηση)	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Μόνο στη χαλυβουργία	Εξειδικευμένη	1	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται παύση · ενσωμάτωση εν κινήσει	Μέτρια	2	1

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Πολωνία · ευνοϊκή πολιτική · ΕΣΠΑ · βιομηχανική στρατηγική	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Ουδέτερο · δεν επηρεάζει η εξωτερική θερμοκρασία	Ουδέτερο	2	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Υψηλή αποδοχή ψηφιοποίησης στη βιομηχανία	Υψηλή αποδοχή	3	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Υπάρχει (πολιτικές Industry 4.0, E.E.)	Ναι	3	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή για χαλυβουργίες · περιορισμένη σε άλλους κλάδους	Μέτρια	2	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί υψηλή τεχνογνωσία σε SCADA / MES / δεδομένα	Υψηλή	1	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Τεχνολογικά & οργανωτικά (ψηφιακό χάσμα, εκπαίδευση)	Σημαντικά	1	1
28	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	~15 % εξοικονόμηση μέσω optimized scheduling	Υψηλό (≥15 %)	3	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν δίνεται καμία οικονομική εκτίμηση	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται νέος εξοπλισμός, μόνο software/tools	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Μέτρια – απαιτεί data models, MES/SCADA	Μέτρια	2	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 8–9 – πλήρης προσομοίωση και βιομηχανική αξιολόγηση	Υψηλή	3	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μέσω ενεργειακής βελτίωσης	Μέτρια (εκτίμηση)	2	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Υψηλή – κατάλληλη για ευέλικτες γραμμές παραγωγής	Υψηλή	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται διακοπή παραγωγής	Μικρή	3	1
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Κίνα – πολιτική ώθηση προς Industry 4.0 (π.χ. Made in China 2025)	Ευνοϊκό	3	1
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται με κλιματικές συνθήκες	Αδιάφορο	1	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Υψηλή αποδοχή τεχνολογικών λύσεων στο συγκεκριμένο κλάδο	Υψηλή	3	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Ναι – πολιτικό πλαίσιο για έξυπνη βιομηχανία	Ναι	3	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – εφαρμόζεται σε κάθε job shop	Υψηλή	3	1
Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Υψηλή απαίτηση σε optimization/IT	Υψηλή	1	1	



Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Ενσωμάτωση σε MES/ERP, ανάγκη modeling	Μέτρια	2	1
29	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	~15 % εξοικονόμηση	Υψηλό (>15 %)	3	3
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται ρητά	N/A	N/A	3
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Κυρίως software & αισθητήρες – χωρίς ποσά	Μέτριο (εκτίμηση)	2	3
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή λόγω AI, cloud, data integration	Δύσκολη	1	3
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 7-9 (πιλοτικά & εμπορικά παραδείγματα)	Πιλοτική-Εμπορική	2	3
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Έμμεση μείωση μέσω εξοικονόμησης ενέργειας	Εκτίμηση: Μέτρια	2	3
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εφαρμόσιμο σε πολλούς τομείς	Υψηλή	3	3
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτεί διακοπή – modular cloud εφαρμογή	Μικρή	3	3
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Νιγηρία – έλλειψη πολιτικής στήριξης	Περιοριστικό	1	3
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται άμεσα (software-based)	Ουδέτερο	2	3
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Απαιτεί awareness, τεχνική αποδοχή	Μέτρια αποδοχή	2	3
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Καμία πολιτική υποστήριξη καταγεγραμμένη	Όχι	1	3
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – εφαρμόσιμο σε πολλούς κλάδους	Υψηλή	3	3
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί εξειδίκευση σε AI/ICT	Υψηλή	1	3
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Υψηλή πολυπλοκότητα υλοποίησης / διαλειτουργικότητας	Σημαντικά	1	3	
30	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Δεν δίνεται ποσοστό · Έμμεση εξοικονόμηση μέσω βελτιστοποίησης	N/A	N/A	3
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται	N/A	N/A	3
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Απαιτεί σημαντική υποδομή (sensors, υπολογιστική ισχύ)	Υψηλό	1	3
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Πολύπλοκη ενσωμάτωση σε legacy συστήματα	Δύσκολη	1	3
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 7 – Πιλοτικό στάδιο σε GT μονάδες	TRL 7 – Πιλοτικό	2	3
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Ποιοτική αναφορά – όχι μετρήσιμο	N/A	N/A	3
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Ικανή εφαρμογή σε διάφορες υποδομές	Υψηλή / Οριζόντια	3	3

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Ελεγχόμενη – απαιτεί σχεδιασμό στην αρχική εφαρμογή	Μέτρια	2	3
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Δεν εξαρτάται από συγκεκριμένο κράτος	Ουδέτερο	2	3
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται – τεχνολογία ουδέτερη γεωγραφικά	Αδιάφορο	1	3
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Απαιτεί ψηφιακή κουλτούρα – όχι πάντα διαθέσιμη	Μέτρια αποδοχή	2	3
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Όχι συγκεκριμένα · πιθανή στο πλαίσιο ΕΕ	Μερικώς	2	3
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Υψηλή – μπορεί να επεκταθεί σε πολλούς σταθμούς	Υψηλή	3	3
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί υψηλή εξειδίκευση (AI, μοντελοποίηση)	Υψηλή	1	3
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Σημαντικά – τεχνικά, οργανωτικά, οικονομικά	Σημαντικά	1	3
31	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	Παρουσιάζει 9–54% savings σε literature case studies	Μεγάλο εύρος (εκτίμηση)	2	6+ είδη εργαλείων
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν παρέχεται (review-based)	N/A	N/A	
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται CapEx – software level	Χαμηλό (εκτίμηση)	3	
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή (υπολογιστικά, ανάγκη integration)	Υψηλή	3	
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Χρήση ώριμων εργαλείων · TRL 8–9	Πολύ υψηλή	3	
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν δίνεται · υπονοείται μέσω energy savings	Εκτιμώμενη	2	
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Κυρίως για BEMS σε κτίρια, δυνητικά και στη βιομηχανία	Μέτρια	2	
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται · γίνεται σε επίπεδο ελέγχου	Μικρή	3	
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Δεν περιορίζεται γεωγραφικά · παγκόσμια εφαρμογή	Ουδέτερο	2	
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Άμεσα σχετικό · optimization βάσει τοπικών φορτίων	Σχετικό	2	
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Απαραίτητη εξοικείωση με EnMS και data-based operation	Μέτρια	2	
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Υποστηρίζεται σε ΕΕ/ΗΠΑ μέσω digitalization policies	Μερικώς	2	
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – θεμελιακή προσέγγιση για smart EnMS	Υψηλή	3	
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί προηγμένες γνώσεις optimization & BEMS	Υψηλή	3	
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολυπλοκότητα, έλλειψη data integration	Σημαντικά	3		

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

32	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	~2-6 % ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω TFP	Χαμηλό-Μέτριο	2	2
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν δίνεται	N/A	N/A	2
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δεν ποσοτικοποιείται – θεωρείται έμμεσο	N/A	N/A	2
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Υψηλή πολυπλοκότητα / ανάγκη θεσμών και R&D	Υψηλή	3	2
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Ποικίλει – Συσσωρευτικές τεχνολογίες	TRL 8-9	3	2
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν αναφέρεται ρητά – έμμεση επίδραση	N/A	N/A	2
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Πολυτομεακή, σε 26 βιομηχανίες	Οριζόντια	3	2
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν απαιτείται τεχνική διακοπή	Μηδενική	3	2
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Κίνα: κεντρικός σχεδιασμός & θεσμική υποστήριξη	Ευνοϊκό	3	2
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν έχει επιρροή στη στρατηγική	Αδιάφορο	1	2
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Υψηλή αποδοχή καινοτομίας & παραγωγισμός	Υψηλή	3	2
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Ναι – R&D επιδοτήσεις, FDI θεσμικά	Υψηλή	3	2
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πιθανή σε παρόμοιες χώρες ή περιφέρειες	Μέτρια-Υψηλή	2	2
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαραίτητη τεχνογνωσία & R&D capacity	Υψηλή	3	2
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Απαιτείται υψηλή απορροφητικότητα & δομές	Σημαντικά	2	2	
33	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	-2.45% έως -4.52%	Χαμηλό	1	1
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	Δεν προσδιορίζεται – αφορά πολιτική	N/A	N/A	1
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	Δημόσια επένδυση σε πολιτικές, όχι σε εξοπλισμό	Υψηλό (εκτίμηση)	3	1
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Πολύπλοκη εφαρμογή σε πολλαπλά επίπεδα διακυβέρνησης	Δύσκολη	3	1
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	Δεν αφορά τεχνολογία	N/A	N/A	1
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	Δεν δίνεται άμεση τιμή	N/A	N/A	1
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Εθνική στρατηγική σε 80+ πόλεις	Οριζόντια	3	1
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Δεν επηρεάζει λειτουργία επιχειρήσεων	Μηδενική	3	1
Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Κεντρικά σχεδιασμένο – ευνοϊκό	Ευνοϊκό	3	1	

Στρατηγικές Βελτιστοποίησης της Ενεργειακής Απόδοσης στη Βιομηχανία

	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Δεν σχετίζεται – πολιτική εφαρμογή	Αδιάφορο	1	1
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Top-down συμμόρφωση – χαμηλή συμμετοχή	Χαμηλή	1	1
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – κεντρική υποστήριξη	Ναι	3	1
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Εφαρμόζεται παντού εντός Κίνας	Υψηλή	3	1
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Δεν απαιτεί τεχνική γνώση από επιχειρήσεις	Χαμηλή	1	1
	Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Πολιτική επεκτασιμότητα περιορισμένη εκτός Κίνας	Μέτρια	2	1
34	Ποσοστό Εξοικονόμησης Ενέργειας	Τεχνικό	25.4 % συνολική	Υψηλό (>15 %)	3	6+
	Χρόνος Απόσβεσης (Payback)	Τεχνικό	1.73–3.0 έτη ανά τεχνολογία	Σύντομος (1–3 έτη)	3	6+
	Επενδυτικό Κόστος (CapEx)	Τεχνικό	~€35.000	Χαμηλό	3	6+
	Δυσκολία Εφαρμογής	Τεχνικό	Μέτρια οργανωτική και τεχνική	Μέτρια	2	6+
	Τεχνολογική Ωριμότητα (TRL)	Τεχνικό	TRL 9 (ώριμες λύσεις – PV, VSD, EMS)	TRL 9 – Εμπορική	3	6+
	Μείωση CO <sub>2</sub> e	Τεχνικό	~232 t CO <sub>2</sub> e / έτος (–22 %)	Υψηλή	3	6+
	Κλίμακα Εφαρμοσιμότητας	Τεχνικό	Υψηλή – εφαρμογή σε διάφορους κλάδους	Οριζόντια	3	6+
	Επιχειρησιακή Διακοπή (Downtime)	Τεχνικό	Μηδενική έως ελάχιστη – χωρίς διακοπή παραγωγής	Μικρή	3	6+
	Πλαίσιο Χώρας / Περιφέρειας	Πλαισιακό	Αίγυπτος – ανάγκη λόγω ενεργειακού κόστους	Ουδέτερο – Ευνοϊκό	2	6+
	Κλίμα / Γεωγραφία	Πλαισιακό	Ζεστό κλίμα – αυξημένες ανάγκες ψύξης	Σχετικό	2	6+
	Κουλτούρα & Συμπεριφορές	Πλαισιακό	Ισχυρή διοικητική υποστήριξη, υψηλή αποδοχή	Υψηλή	3	6+
	Υποστήριξη Πολιτικής / Κινήτρων	Πλαισιακό	Δεν αναφέρεται στήριξη / επιδότηση	Όχι	1	6+
	Επαναληψιμότητα σε Βιομηχανία	Πλαισιακό	Πολύ υψηλή – εφαρμόσιμη σε όλη τη βιομηχανία	Υψηλή	3	6+
	Εκπαίδευση / Γνώση	Πλαισιακό	Απαιτεί γνώση EMS, ISO 50001	Μέτρια	2	6+
Αναμενόμενα Εμπόδια	Πλαισιακό	Οργανωτική δυσκολία συντονισμού, όχι τεχνική	Μέτρια	2	6+	